

Modelo de la Sequía en la Costa Norte de Perú usando los Índices ENOS y las Imágenes NDVI del Sensor AVHRR a Bordo del Satélite NOAA

Joel Rojas Acuña¹, Eleazar Rufasto Campos², José Carlos Eche Llenque¹, Flavio Carrillo Gomero³

¹Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú

²Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo – Lambayeque, Perú

³Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú

Resumen— Se propone un modelo de predicción del inicio de la sequía en la costa norte de Perú utilizando la serie de tiempo de los promedios mensuales de las imágenes índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de los sensores AVHRR a bordo de la serie de satélite NOAA, los índices El Niño Oscilación Sur (ENOS), y la técnica de regresión lineal múltiple. Se obtuvieron la serie de tiempo de los promedios mensuales de las anomalías estandarizadas de los índices NDVI y ENOS en el periodo de julio 1981 a diciembre 2003. La evolución mensual del NDVI en el año 2000 en todo Perú muestra que los meses de sequía comienzan en agosto y terminan en diciembre. El NDVI promedio de todo Perú varía de 0.0 (suelo desnudo) a 0.7 (suelo vegetado). La desviación estándar del NDVI muestra que en la costa norte varía menos en comparación con la sierra y la selva. El modelo aplicado a la costa norte concuerda aproximadamente con los datos medidos por satélite.

Abstract— It proposes a model for predicting the onset of drought on the North Coast of Peru using the time series of average monthly of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the AVHRR sensor images on NOAA satellite series, the El Niño Southern Oscillation indexes (ENSO), and the multiple linear regression technique. We obtained the time series of average monthly of time series of standardized anomalies about NDVI and ENSO in the period since 1981 to 2003. The evolution of the NDVI monthly in 2000 throughout Peru shows that the months of drought began in August and ending in December in all the country. The NDVI average throughout Peru varies from 0.0 (bare soil) to 0.7 (ground vegetation). The NDVI standard deviation shows that on the coast is lower than the mountain and jungle. The model is applied to the North Coast that is consistent approximately with the satellite data measures.

Palabras clave— NDVI, NOAA, sequía, Índices ENOS.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la sequía es un fenómeno climático normal, recurrente, difícil de definir por depender de condiciones físicas-ambientales, necesidades sociales locales, y de las perspectivas meteorológicas, hidrológicas, agrícolas y socioeconómicas. Por consiguiente, predecir una sequía es difícil debido a su gran complejidad. Por una parte tiene diversas facetas - climática, hidrológica, edáfica, etc.- que pueden no coexistir temporal y/o espacialmente. Por otro lado, su ocurrencia no depende sólo del comportamiento de la naturaleza sino que en ella influyen, de forma decisiva, factores humanos y socio-económicos. Es la sociedad la que, con su organización y gestión de recursos, delimita su umbral de sensibilidad a la sequía. Conceptualmente, la sequía puede definirse como el tiempo prolongado en el que se observa un déficit hídrico inusual, que altera sensiblemente el desarrollo normal de la vida colectiva y del ambiente natural de una región o localidad. La implicancia de este concepto varía, dependiendo de las características climáticas y de las necesidades de cada región, por lo que es imposible establecer una definición precisa de carácter universal. La escasez de precipitación –sequía meteorológica/climática– provoca la carencia de recursos hídricos (sequedad prolongada) –sequía hidrológica (deficiencia de agua en ríos, lagos, reservorios, subsuelo, etc.)– ocasiona daños económicos graves en el sector agrícola, que pueden transmitirse a todo el conjunto de actividades socio-económicas. Desde este punto de vista, resulta necesario implementar en el país un sistema de vigilancia de la sequía. El gobierno peruano, a través del Instituto de Defensa Civil, ha propiciado un proyecto nacional del Sistema de Vigilancia de la Sequía en todo el Perú [21]. En dicho proyecto se

¹Joel Rojas Acuña, e-mail: jrojas@unmsm.edu.pe.

José Carlos Eche Llenque, e-mail: jechel@unmsm.edu.pe.

²Eleazar Rufasto Campos, e-mail: rufasto@hotmail.com

³Flavio Carrillo Gomero, e-mail: fcarrillog@unmsm.edu.pe.

identificó indicadores de peligro e indicadores de impacto. Uno de estos indicadores de peligro, desarrollado en la UNMSM, es el uso de los datos NDVI del sensor AVHRR. Este indicador se aplicará al territorio peruano para el período 1981-2003 [21].

Los avances en el uso de los datos de satélite para vigilar las condiciones de la vegetación de la superficie de la Tierra hacen posible investigar la evolución espacial y temporal de la sequía desde el espacio en una escala global y regional. Desde 1981 los datos colectados por el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution) han sido utilizados para generar índices tales como el NDVI. Este índice ha sido aplicado exitosamente para clasificar los tipos de vegetación [24],[17], y vigilar las condiciones de crecimiento de la vegetación [12][19]. El NDVI ha sido usado para hacer el seguimiento del estado fenológico del crecimiento de la vegetación a una escala regional [9], para vigilar la evolución de la sequía [10][14] y estimar la productividad de las cosechas [19]. Liu y Ferreira [15] reportaron una buena correlación entre la precipitación total mensual y el NDVI mensual acumulado. Di et al [6], a través de una simulación numérica, encontraron una buena correlación entre la precipitación y el NDVI diarios. Por lo tanto, el NDVI puede ser utilizado apropiadamente para inferir la sequía como un resultado de la escasez de precipitación. Los datos de precipitación colectados por estaciones de observación a menudo poseen una pobre resolución espacial, especialmente, en regiones remotas de difícil acceso, por consiguiente, el NDVI proporciona una valiosa fuente de información para vigilar la sequía con una alta resolución espacial [8][11].

Los patrones de variabilidad climática en los trópicos están teleconectados a las anomalías del calentamiento del agua en el Océano Pacífico Oriental y Central, a los cambios en el sistema de circulación de la celda de Walker, etc. El término “El Niño” fue usado originalmente por los pobladores de la costa norte peruana para describir el lento calentamiento anual de la corriente oceánica en el Océano Pacífico Tropical cerca del ecuador y a lo largo de la costa de Perú y Ecuador próximo a la Navidad de cada año [23]. La componente atmosférica usada para investigar el Fenómeno El Niño es denominada “Oscilación Sur” (la oscilación del sur se refiere a la variación de la presión atmosférica). Los científicos han llamado “El Niño Oscilación Sur (ENOS)” al fenómeno que involucra ambas componentes: atmósfera y océano. El Fenómeno El Niño es definido como la fase de calentamiento del ENOS y está caracterizado por el aumento de Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) en las costas de Perú y Ecuador del Océano Pacífico. Mientras que El Fenómeno “La Niña” es

definido como la fase fría del ENOS y está caracterizado por un enfriamiento de la TSM en la misma región [23].

El principal objetivo de este artículo es contribuir al desarrollo e implementación de un procedimiento de predicción de periodos de sequía para la región Costa Norte (Lambayeque, Piura y Tumbes) usando las imágenes NDVI – AVHRR mensual en el periodo julio 1981 hasta diciembre 2003, los datos TSM in-situ de las Regiones Oceánicas 1, 2, 3, y 4, y los datos IOS (oscilación de la presión atmosférica) similares a los propuestos por Liu y Negron [16][1].

II. DATOS IMÁGENES

A. Datos imágenes NDVI - AVHRR - NOAA

El conjunto de datos GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) [7] es un producto denominado índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) disponible (acceso libre) por un periodo de 22 años desde 1981 a 2003 (ver Fig. 1). Este conjunto de datos es obtenido de las imágenes procedentes del instrumento Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bordo de la serie de satélites NOAA 7, 9, 11, 14, y 16. El conjunto de datos NDVI han sido corregidos por calibración, visión geométrica, aerosoles de los volcanes y otros efectos no relacionados al cambio de vegetación. El NDVI, en general, es una medida del estado hídrico de la vegetación y es usado en modelos climáticos para calcular fotosíntesis, el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y la superficie del suelo, evapotranspiración y la absorción y emisor de energía por la superficie del suelo. Los datos GIMMS fueron originalmente generados para caracterizar cambios biofísicos definidos en el proyecto ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project) [27].



Fig. 1. NDVI de Sudamérica procedente del sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA (julio 1981).

B. Datos índices ENOS

Los datos usados en este trabajo denominados índices ENOS son las anomalías estandarizadas de la temperatura de superficie del mar para diferentes regiones El Niño y los Índices de Oscilación Sur (IOS). Estos datos han sido obtenidos de la página Web de la NOAA [4].

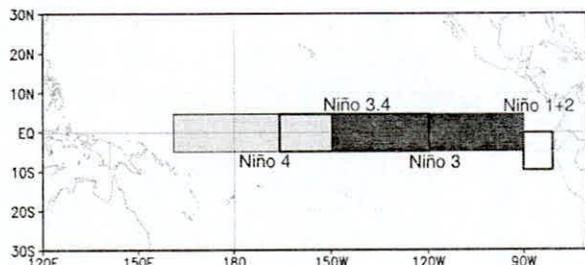


Fig. 2. Regiones El Niño [4].

1) Temperatura de la Superficie del Mar

En este estudio se han utilizado los datos de la Temperatura de la Superficie del Mar de diferentes regiones El Niño. La Figura 2 muestra la ubicación de las regiones El Niño. La Temperatura de la Superficie del Mar en las regiones oceánicas 1,2 y 3,4 se muestran en la Figura 3 y son obtenidos del Centro de Predicción del Clima [4].

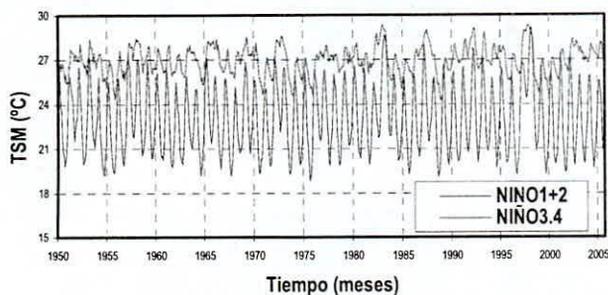


Fig. 3. Temperatura de la Superficie del Mar en las regiones oceánicas 1,2 (líneas de color negro) y 3,4 (líneas de color azul) [4].

2) El Índice de Oscilación Sur (IOS)

El Índice de Oscilación Sur (IOS) es definido como la diferencia de presión del nivel del mar estandarizado entre Papeete, Tahití (149°W, 17°S) y Darwin, Australia (131°E, 12°S). La presión de Tahití se muestra en la Figura 4 en el periodo 1981 a 2007.

II. METODOLOGÍA

A. Anomalía Estandarizada del NDVI

El NDVI ha sido calculado utilizando la banda 1 (0.58 – 0.68 μm) y la banda 2 (0.725 – 1.10 μm) del sensor AVHRR de la serie de satélites NOAA, utilizando la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1},$$

donde ρ_1 es el valor de la reflectancia de la banda 1, ρ_2 es el valor de la reflectancia de la banda 2. El rango de variación del NDVI es de -1 a +1. La serie de tiempo de los datos NDVI usados en este estudio son los valores promedios de todos los píxeles de 8km x 8 km de la áreas de estudio (costa norte y Loreto). Estos datos son usados para calcular los datos de la anomalía de NDVI. Wilks [27] sugirió que, debido a la variación estacional de los eventos climáticos el uso de datos de anomalía estandarizada en lugar de valores promedio es más conveniente para investigar la diferencia NDVI anual de la normal. La anomalía estandarizada, z , es calculada con la siguiente ecuación:

$$z = \frac{x - x_p}{\sigma},$$

donde z es la anomalía estandarizada, x es el dato NDVI, x_p es promedio muestral y σ es la desviación estándar.

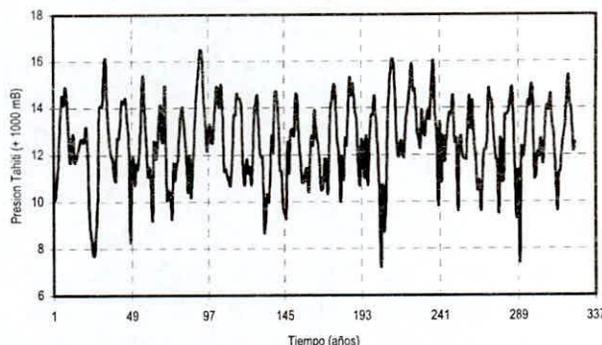


Fig. 4. Presión de Tahití en el periodo 1981 a 2007 [4].

1) Área de Estudio

El área de estudio comprende las regiones políticas Tumbes – Piura - Lambayeque y Loreto (ver Figura 5). Se determinara las anomalías NDVI de esas dos regiones y se correlacionará con las anomalías estandarizada TSM (ver Figura 6) y IOS (ver Figura 7) en el mismo período.

C. Temperatura de la superficie del mar y anomalías de índices de temperatura y presión ENOS

El Índice de Oscilación Sur (IOS) es definido como la diferencia de presión del nivel del mar estandarizado entre las estaciones Papeete, Tahití (149°W, 17°S) y Darwin, Australia (131°E, 12°S) [7]. En la literatura, existen varias definiciones del índice El Niño basadas en los datos TSM o Anomalías IOS, por ejemplo:

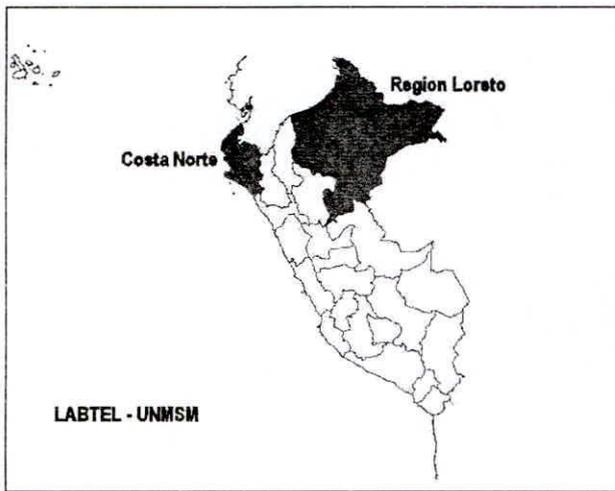


Fig. 5. Mapa del Perú con las ubicaciones de las áreas en estudio.

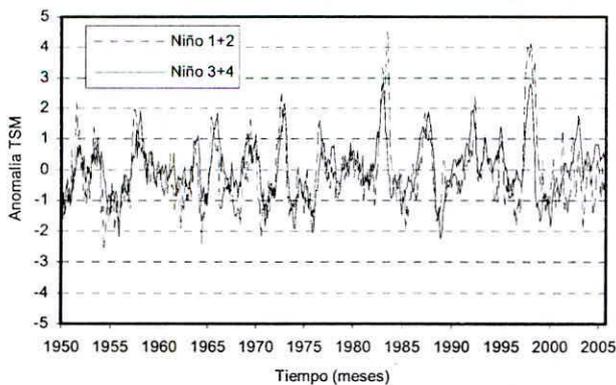


Fig. 6. Anomalia estandarizada de la Temperatura Superficial del Mar para las regiones oceánicas 1,2 y 3,4 [7].

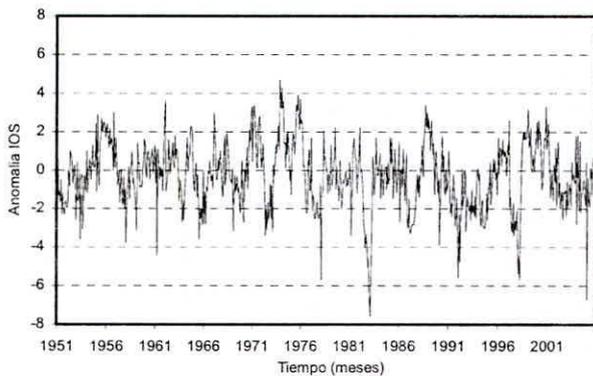


Figura 7a. Anomalia estandarizada del Índice de Oscilación Sur (IOS) [7].

a) correlacionada con los valores negativos de IOS [26] [22][20].

b) correlacionada con la TSM [5] —El evento El Niño está caracterizado por un aumento de la TSM más alto que 2°C por un periodo de 12 meses que resulta en una anomalía de TSM en al menos 1°C por al menos tres meses;

c) para la región oceánica 3-4, Trenberth [23] definió que el episodio ENOS ocurre mientras que el valor de la anomalía TSM es más alto que 0.4°C (El

Niño) y también mientras que el valor de la anomalía es mas bajo que -0.4°C (La Niña).

En este estudio, utilizamos datos TSM de dos regiones oceánicas 3,4 (5° N – 5° S y 120° W – 170° W) y 1,2 (0-10° S y 90° W - 80° W) (Figura 2).

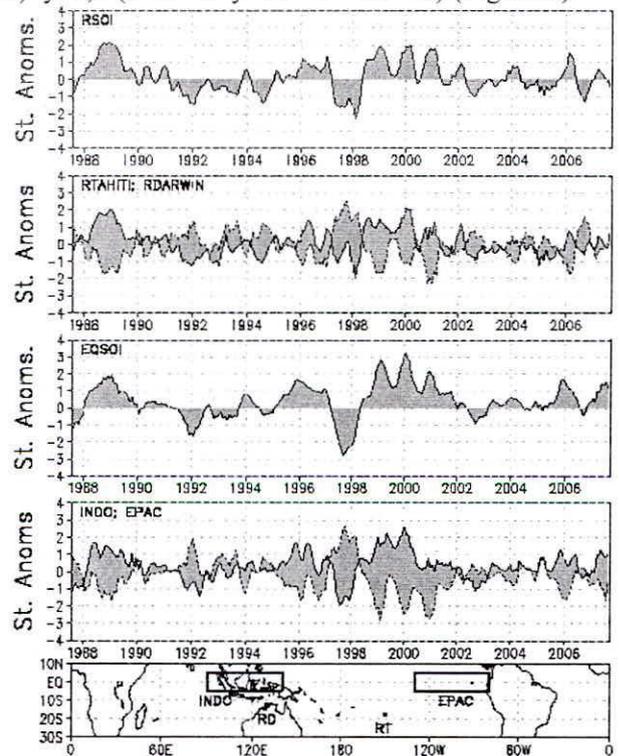


Fig. 7b. Anomalia estandarizada IOS de varias regiones [4].

2) Anomalia estandarizada IOS

Las anomalías IOS son desviaciones del período base considerado. La desviación estándar para Tahití es dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{Tahiti} = \sqrt{\frac{\sum (x_{Tahiti} - \bar{x}_{Tahiti})^2}{N}}$$

Donde

N = número de meses.

x_{Tahiti} = valor actual de Tahití

\bar{x}_{Tahiti} = valor promedio de Tahití

Así,

$$z_{Tahiti} = \frac{x_{Tahiti} - \bar{x}_{Tahiti}}{\sigma_{Tahiti}}$$

es el valor estandarizado de Tahití. Similarmente, la desviación estándar para Darwin es dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{Darwin} = \sqrt{\frac{\sum (x_{Darwin} - \bar{x}_{Darwin})^2}{N}}$$

Donde

N = número de meses.

x_{Darwin} = valor actual de Darwin

\bar{x}_{Darwin} = valor promedio de Darwin

Así,

$$z_{Darwin} = \frac{x_{Darwin} - \bar{x}_{Darwin}}{\sigma_{Darwin}}$$

Para calcular la desviación estándar mensual se usa la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\text{mensual}} = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_{\text{Tahiti}} - \sigma_{\text{Darwin}})^2}{N}}$$

Finalmente, la ecuación IOS será como sigue:

$$IOS = \frac{\sigma_{\text{Tahiti}} - \sigma_{\text{Darwin}}}{\sigma_{\text{mensual}}}$$

III. RESULTADOS

A. Mapas del Perú: Promedio y Desviación Estándar del NDVI

En la Figura 8 se muestra la distribución del NDVI promedio (8a) y su correspondiente desviación estándar (8b) de todo Perú para la serie de tiempo que corresponde a julio 1981 – diciembre 2003 del AVHRR - NOAA para píxeles espaciales de 8 x 8 km. En la Figura (8a) se observa que el NDVI varía de 0.0 a 0.7. En la región geográfica costa, el promedio es cerca de cero. La región sierra, esta dividida en dos subregiones, en la del norte el NDVI (0.4-0.5) es mayor que en la parte sur (0.1-0.3). En la región selva el NDVI es mayor que en las regiones costa y sierra (0.5-0.7). La desviación estándar (DE) del NDVI, Figura (8b), muestra que en la costa su DE es muy pequeño, cerca de 0.0. En la sierra varía de norte a sur desde 0.05 a 0.2. En la selva la DE es mayor y varía desde 0.15 a 0.3. Ambas Figuras delimitan muy bien las tres regiones geográficas peruanas. En la Figura 8, se presenta los límites de las principales zonas ecológicas de Brack [2] sobrepuestas en el mapa del NDVI para el período julio 1981 - diciembre 2003. La heterogeneidad del patrón del NDVI al norte del paralelo 9°S se refleja en la multiplicidad de zonas ecológicas tipificadas por Brack. Por otro lado, las ecozonas siguen el patrón de los Andes en la parte central y sur del país. Es evidente que el mapa del NDVI contiene información valiosa para afinar la posición de los límites de las zonas ecológicas propuestas por Brack, en particular, los límites de la Selva Alta y Selva Baja, y las zonas al norte del paralelo 9.5° S. La Figura 8b muestra los límites de las zonas ecológicas de Brack sobre el mapa de la desviación estándar (DE) del NDVI. La desviación cero corresponde a los desiertos, éstos están bien delimitados por el límite de la zona del Desierto del Pacífico. La Puna y la Serranía Esteparia muestran baja variabilidad. La más alta variabilidad se da en las zonas de selva [18].

B. Evolución mensual del NDVI en el Perú.

Los datos NDVI mensuales del Perú fueron procesados para el período julio 1981 a diciembre 2003. En la Figura 9, se muestra un ejemplo de las imágenes NDVI mensuales de Perú para el período de un año (enero – diciembre 2000). La escala de colores indica los valores del NDVI, aumentando desde cero, color marrón en la izquierda, hasta más alto que 0.7, color azul oscuro en la derecha. Las áreas grandes en rojo y naranja, que corresponden a valores NDVI más

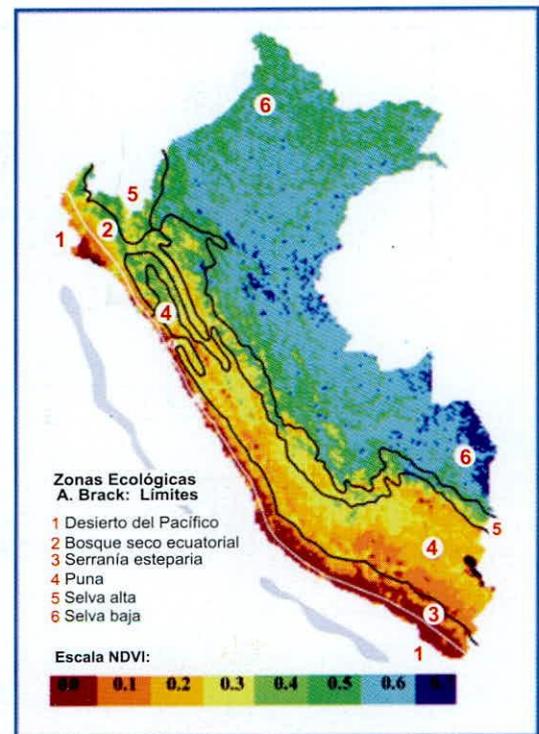
bajos que 0.3, aparecieron en agosto a diciembre, indicando que la estación seca está centrada en esos 5 meses. Por lo tanto la iniciación y magnitud de la anomalía NDVI negativa dentro de esos cinco meses fue usado para caracterizar el comienzo e intensidad de la sequía.

C. Anomalías estandarizadas de NDVI, IOS y TSM

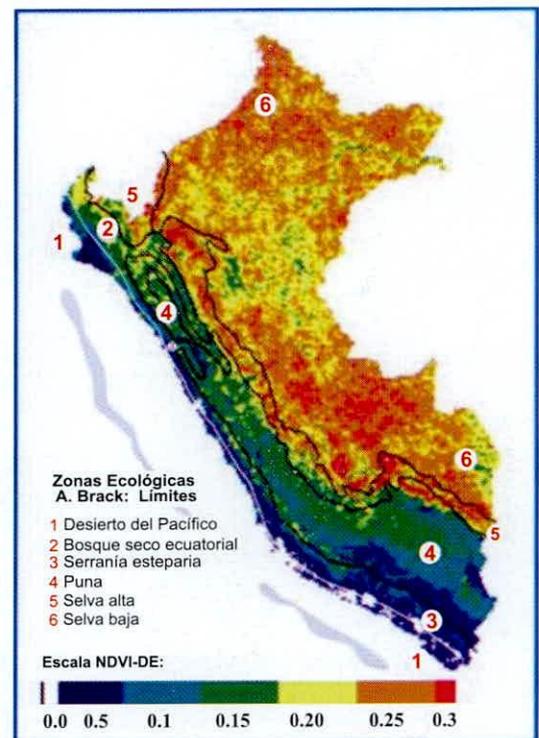
Los datos de anomalía estandarizada mensual de los índices NDVI, IOS y TSM de enero 1981 a diciembre 2003 serán usados para desarrollar un procedimiento de predicción de la sequía en tres regiones (costa norte, Loreto y Perú). En la Figura 10 a 15, se muestran los gráficos de la serie de tiempo de las anomalías estandarizada NDVI de la Costa Norte y Loreto versus la anomalía estandarizada de IOS y TSM para la región oceánica 1,2 y 3,4. Según la comparación de la evolución dinámica del NDVI de la costa norte versus la TSM de la región oceánica Niño 3,4 (ver Fig. 10) fue observado que, en general, los valores de anomalía NDVI responden positivamente a los valores de la anomalía de la TSM de las regiones oceánicas 3,4, especialmente durante los eventos El Niño de 1982/1983, 1986/1987, 1992/1993, 1997/1998 y 2002/2003, donde fueron observados que los picos no son opuestos y en los eventos La Niña de 1984/1985, 1988/1989 y 1999/2000, donde fueron claramente observados que los picos son opuestos. En la Figura 12, se muestra los gráficos de la serie de tiempo de las anomalías estandarizada NDVI de la región Loreto versus la anomalía IOS y la TSM para la región oceánica 3,4. Según la comparación de la evolución dinámica del NDVI de la región Loreto versus la TSM de la región oceánica Niño 3,4, fue observado que, en general, los valores de anomalía NDVI responden positivamente a los valores de la anomalía de la TSM de las regiones oceánicas 3,4 especialmente durante los eventos El Niño de 1982/1983, 1986/1987, 1992/1993, 1997/1998 y 2002/2003, donde fueron observados que los picos están en la misma dirección y en los eventos La Niña de 1984/1985, 1988/1989 y 1999/2000, donde fueron claramente observados que los picos son opuestos. Para la anomalía NDVI en la región de Loreto la amplitud es mas pequeña que en la costa norte. Las Figuras 11 y 13 muestran la serie de tiempo de las anomalías estandarizada NDVI de la costa norte y Loreto, respectivamente, versus las anomalías estandarizada IOS para el período julio 1981 a diciembre 2003. En ambos, la anomalía NDVI responde negativamente a los valores IOS, especialmente durante los eventos El Niño 1982/1983, 1986/1987, 1992/1993, 1997/1998, donde fueron observados que los picos están en dirección opuesta. Las Figuras 14 y 15 muestran las anomalías estandarizadas NDVI versus las anomalías estandarizadas

TSM para las regiones oceánicas Niño 1+2 que se encuentran en las costas de Perú. Los picos de las anomalías NDVI de la costa norte y la TSM de la región Niño 1+2 coinciden en todos los años Niños pero la anomalía NDVI de Loreto no coinciden y es muy baja su señal para comparar con la TSM.

Según un análisis de la respuesta del NDVI a la TSM de la región oceánica Niño 3,4 y IOS, fue observado que el NDVI correlaciona muy bien con los índices ENOS en muchos casos. Sin embargo, hubo algunos casos en la cual solo una débil o ninguna correlación fue encontrada. Por lo tanto, una buena correlación entre la anomalía estandarizada NDVI de la costa norte y Loreto y cada anomalía estandarizada de cada índice ENOS es difícil de encontrar. En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de correlación del NDVI y los índices ENOS para la región Costa Norte, en el periodo 1981–2003. Muchos investigadores han considerado que el Clima en la Costa Norte de Perú esta influenciado por varios sistemas de circulación atmosférica aumentado por la TSM en varias regiones y originadas desde el Océano Pacífico. Estos sistemas influenciadores son a menudo cuantificados por los índices ENOS. Por lo tanto, en este estudio, los índices ENOS con un valor r más alto que 0.2 fue seleccionado como un factor del comienzo de la sequía para la construcción del modelo. De acuerdo a la Tabla 1, los índices ENOS, incluidos TSM de la región oceánica Niño 3,4 y IOS, fueron usados para desarrollar los modelos del comienzo de la sequía ENOS. Con la finalidad de verificar que las series de tiempo de cada variable presentan un patrón distinto de variación anual cíclica o no, los valores de la autocorrelación (r) y los límites de control de las variables han sido obtenidos a partir del análisis de autocorrelación de las series de tiempo. En la Tabla 2 se muestra el análisis de autocorrelación de las series de tiempo, en comparación con los coeficientes de correlación (r) y los límites de control ($\pm CL$) del NDVI, TSM en las regiones oceánicas Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3,4; TSM en el Atlántico Norte (NATL), TSM en el Atlántico Sur (SATL), TSM en el Trópico (TROP), Índice de Oscilación Sur (IOS), TSM en la Trayectoria 1 (SHIP 1), TSM en Dipolo 1 (NATL- SATL) y dipolo 2 (SATL, NATL). La Tabla 2 muestra que todas las variables seleccionadas tienen valores de r mayores que el valor del límite de control (Control Limit-CL) al menos con cinco meses de desfase en el tiempo (ver filas de Lag 1 – 5). Esto demuestra que todas estas variables de serie de tiempo tienen cierto patrón de variación cíclico predecible.



(a)



(b)

Fig. 8. (a) NDVI promedio: período julio 1981 – diciembre 2003. (b) Desviación Estándar de la serie temporal de NDVI: período julio 1981 – diciembre 2003, superpuestas a estas Figuras (a y b) están los límites de las zonas ecológicas de Brack [2] [18].

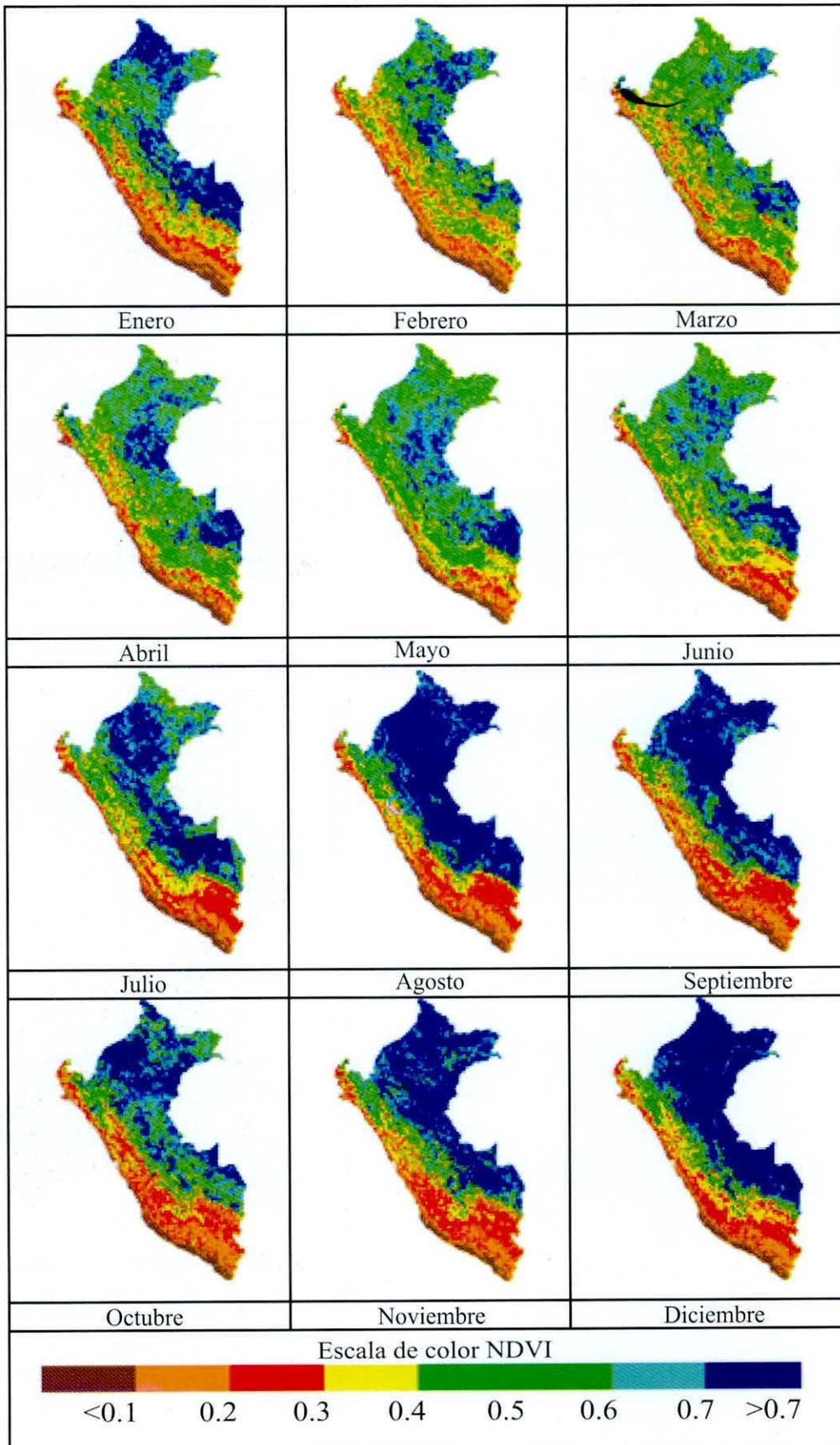


Fig. 9. Evolución temporal del NDVI del Perú para el periodo Enero – Diciembre 2000

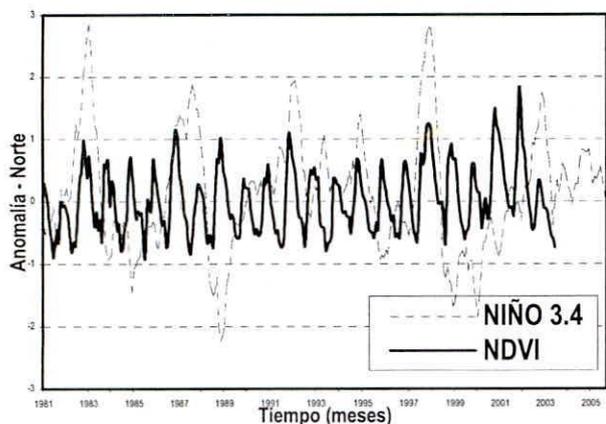


Fig. 10. Anomalia estandarizada del NDVI para la costa norte de Perú y la anomalia estandarizada de la TSM de la región oceánica 3,4 para el período julio 1981 a diciembre 2003.

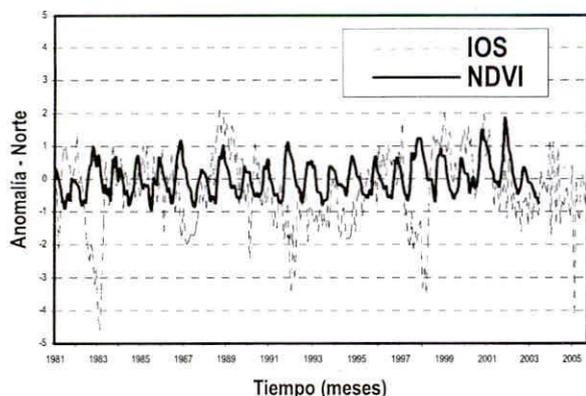


Fig. 11. Anomalia estandarizada del NDVI de la costa norte de Perú y la anomalia IOS (1981-2003).

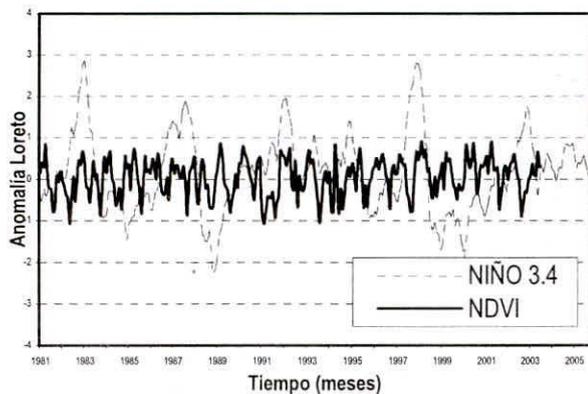


Fig. 12. Anomalia NDVI de la región Loreto de Perú y la anomalia de la TSM de la región oceánica 3,4 (1981-2003).

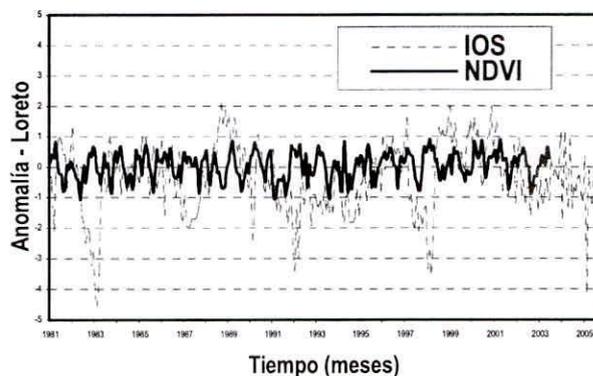


Fig.13. Anomalia NDVI para la región Loreto de Perú y la anomalia SOI (1981- 2003).

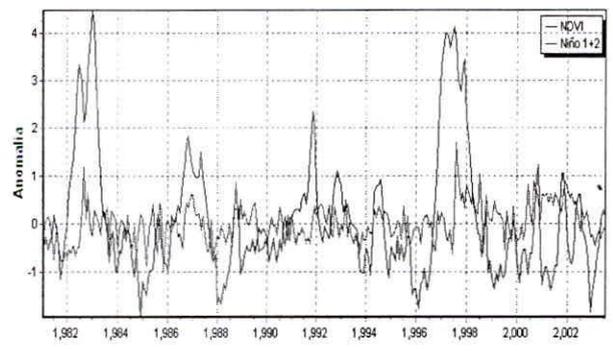


Fig. 14. Comparación de la anomalia del NDVI de la costa norte y la anomalia de la TSM de la región oceánica Niño 1+2.

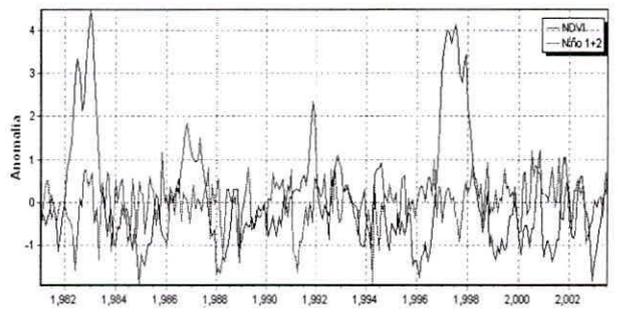


Figura 15. Comparación de la anomalia del NDVI de la región Loreto y la anomalia de la TSM de la región oceánica Niño 1+2

B. Modelo de Sequía ENOS

En este trabajo estamos considerando que las anomalías negativas del NDVI infieren sequía como una función del tiempo y de los índices ENOS. Los índices ENOS con un coeficiente de correlación (r) mayores que 0.2 han sido seleccionados como variables independientes. El proceso de correlación fue realizado, primero, usando el mismo mes de NDVI e índice ENOS y luego por dislocación el NDVI con un desfase de tiempo de un mes con la finalidad de elegir el correcto desfase de tiempo para producir el más alto coeficiente de correlación. Siguiendo este proceso un conjunto de coeficientes de correlación fueron obtenidos mientras las series de tiempo de anomalías de los índices ENOS de julio 1981 a diciembre 2003 se correlacionaron con la serie de las anomalías del NDVI de julio 1981 a diciembre de 2003. Los resultados

muestran que los valores de *r* para NDVI/TSM (Niño1+2), NDVI/TSM(NATL), NDVI/TSM(SHIP-1) y NDVI/TSM(TROP) fueron 0.317, 0.316, 0.244 y 0.323 respectivamente.

1) *Modelo 1*

El primer modelo ha sido construido usando los datos de la anomalía estandarizada del NDVI de la costa norte de Perú como variable dependiente y las anomalías estandarizadas de la TSM de las regiones Niño1+2, SHIP1 y TROP (Figura 16) como variables independientes. Los datos usados han sido el NDVI de cuatro meses (Julio a diciembre en el periodo 1981–1988). Este modelo muestra un coeficiente de regresión (R^2) de 0.264 a un nivel de significancia de 1%.

2) *Modelo 2*

El segundo modelo ha sido construido usando los datos de la anomalía estandarizada del NDVI de la Costa Norte como variable dependiente y la anomalía estandarizada de los índices de la TSM de las regiones Niño1+2, SHIP1, TROP y NATL como variables independiente. Los datos usados han sido el NDVI de seis meses (Julio a diciembre en el periodo 1981 – 1988). Este modelo muestra un coeficiente de regresión (R^2) de 0.35 a un nivel de significancia de 1%. La Figura 17 muestra el modelo observado y el simulado.

TABLA 1. MATRIZ DE CORRELACIÓN PARA LA REGIÓN COSTA NORTE. LOS VALORES EN NEGRITA SON SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES DE 0 CON UN NIVEL DE SIGNIFICACIÓN $\alpha=0.05$

Variables	Regiones	NDVI	TSM de las regiones oceánicas										
		Costa Norte	Niño1,2	Niño 3	Niño 4	Niño3,4	NATL	SATL	TROP	SOI	SHIP1	DIP1	DIP2
NDVI	Norte	1	0.252	0.158	0.000	0.091	0.153	0.042	0.243	-0.125	0.255	0.083	-0.083
TSM de las regiones oceánicas	Niño1+2	0.252	1	0.821	0.393	0.642	0.219	-0.192	0.716	-0.494	0.974	0.312	-0.312
	Niño 3	0.158	0.821	1	0.704	0.942	0.141	-0.144	0.871	-0.695	0.781	0.216	-0.216
	Niño 4	0.000	0.393	0.704	1	0.867	0.110	-0.222	0.734	-0.667	0.382	0.253	-0.253
	Niño3,4	0.091	0.642	0.942	0.867	1	0.087	-0.163	0.844	-0.762	0.620	0.190	-0.190
	NATL	0.153	0.219	0.141	0.110	0.087	1	0.131	0.420	0.052	0.200	0.652	-0.652
	SATL	0.042	-0.192	-0.144	-0.222	-0.163	0.131	1	0.064	0.181	-0.216	-0.666	0.666
	TROP	0.243	0.716	0.871	0.734	0.844	0.420	0.064	1	-0.579	0.674	0.267	-0.267
	SOI	-0.125	-0.494	-0.695	-0.667	-0.762	0.052	0.181	-0.579	1	-0.511	-0.099	0.099
	SHIP1	0.255	0.974	0.781	0.382	0.620	0.200	-0.216	0.674	-0.511	1	0.316	-0.316
	DIP1	0.083	0.312	0.216	0.253	0.190	0.652	-0.666	0.267	-0.099	0.316	1	-1.000
DIP2	-0.083	-0.312	-0.216	-0.253	-0.190	-0.652	0.666	-0.267	0.099	-0.316	-1.000	1	

TABLA 2A. ANÁLISIS DE AUTOCORRELACIÓN POR COMPARACIÓN DEL NDVI Y LOS ÍNDICES ENOS.

Lag	NDVI			TSM de Regiones Oceánicas									
	r	±CL		Niño 1+2		Niño 3		Niño 4		Niño 3,4		IOS	
1	0.575	0.119	0.930	0.119	0.945	0.119	0.958	0.119	0.955	0.119	0.712	0.119	
2	0.488	0.154	0.822	0.197	0.851	0.199	0.897	0.201	0.875	0.200	0.619	0.169	
3	0.346	0.174	0.714	0.241	0.749	0.245	0.828	0.252	0.775	0.249	0.540	0.199	
4	0.329	0.184	0.612	0.269	0.645	0.276	0.748	0.288	0.665	0.281	0.446	0.219	
5	0.221	0.192	0.520	0.289	0.533	0.297	0.661	0.314	0.548	0.303	0.366	0.231	
6	0.181	0.196	0.433	0.302	0.419	0.310	0.579	0.333	0.426	0.317	0.297	0.239	
7	0.098	0.198	0.347	0.310	0.304	0.318	0.505	0.347	0.309	0.325	0.224	0.245	
8	0.061	0.199	0.257	0.316	0.190	0.322	0.430	0.358	0.198	0.329	0.147	0.248	
9	0.015	0.199	0.171	0.319	0.088	0.324	0.359	0.365	0.101	0.331	0.113	0.249	
10	-0.054	0.199	0.098	0.320	0.005	0.324	0.293	0.370	0.027	0.331	0.048	0.249	

TABLA 2B. ANÁLISIS DE AUTOCORRELACIÓN POR COMPARACIÓN DEL NDVI Y LOS ÍNDICES ENOS.

Lag	NDVI			TSM de Regiones Oceánicas											
	r	±CL		NATL		SATL		TROP		SHIP 1		DIP 1		DIP 2	
1	0.575	0.119	0.875	0.119	0.868	0.119	0.948	0.119	0.921	0.119	0.865	0.119	0.865	0.119	
2	0.488	0.154	0.745	0.190	0.699	0.189	0.866	0.200	0.812	0.196	0.703	0.188	0.703	0.188	
3	0.346	0.174	0.617	0.228	0.534	0.223	0.776	0.247	0.709	0.239	0.543	0.223	0.543	0.223	
4	0.329	0.184	0.505	0.250	0.394	0.240	0.688	0.280	0.613	0.267	0.399	0.241	0.399	0.241	
5	0.221	0.192	0.406	0.264	0.284	0.249	0.596	0.303	0.525	0.287	0.268	0.250	0.268	0.250	
6	0.181	0.196	0.322	0.273	0.190	0.254	0.507	0.319	0.438	0.300	0.168	0.254	0.168	0.254	
7	0.098	0.198	0.272	0.278	0.119	0.256	0.411	0.330	0.341	0.309	0.106	0.256	0.106	0.256	
8	0.061	0.199	0.236	0.282	0.034	0.257	0.303	0.338	0.239	0.314	0.067	0.256	0.067	0.256	
9	0.015	0.199	0.208	0.285	-0.029	0.257	0.195	0.342	0.146	0.317	0.058	0.257	0.058	0.257	
10	-0.054	0.199	0.163	0.287	-0.057	0.257	0.099	0.343	0.073	0.318	0.053	0.257	0.053	0.257	

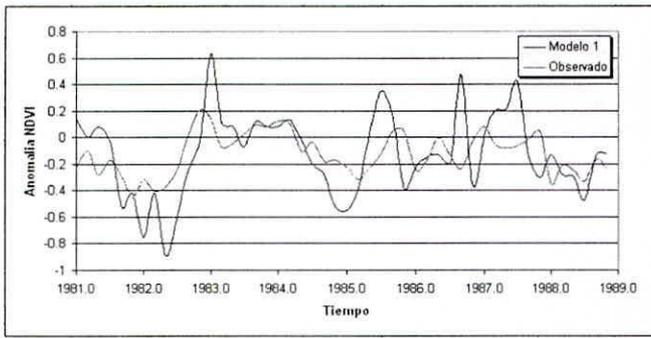


Fig. 16. Modelo 1 de predicción del inicio de la sequía en la Costa Norte.

La ecuación del Modelo 1 está dada por:
 $NDVI = -0.146 - 0.551 \times TSM(R-Niño1+2) + 0.596 \times TSM(R-SHIP1) + 0.22 \times TSM(R-TROP)$

TABLA 3A - PARÁMETROS DEL MODELO 1.

Fuente	Valor	Desviación típica	t	Pr > t	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
Intersección	-0.146	0.041	3.576	0.001	-0.229	-0.064
Niño1+2	-0.551	0.171	3.227	0.002	-0.895	-0.207
SHIP1	0.596	0.164	3.627	0.001	0.265	0.927
TROP	0.220	0.203	1.086	0.283	-0.189	0.629

TABLA 3B - ANÁLISIS DE LA VARIANZA

Fuente	GDL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Pr > F
Modelo 1	3	1.210	0.403	5.271	0.003
Error	44	3.366	0.076		
Total corregido	47	4.575			

Calculado contra el modelo Y=Media(Y)

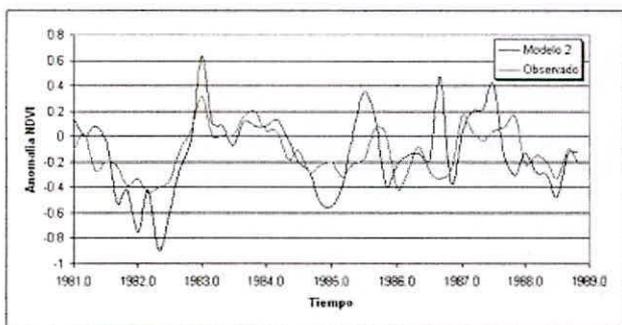


Fig. 17. Modelo 2 de predicción de la sequía en la Costa Norte.

La ecuación del Modelo 2 está dada por:
 $NDVI = -0.123 - 0.578 \times TSM(R-Niño1+2) + 0.664 \times TSM(R-SHIP1) - 0.007 \times TSM(R-TROP) + 0.332 \times TSM(R-NATL)$

3) Modelo 3

El modelo 3 ha sido construido usando los datos de la anomalía estandarizada del NDVI de la Costa Norte como variable dependiente y la anomalía estandarizada de los índices de la TSM de las regiones Niño1+2,

SHIP1 y NATL como variable independiente. Los datos usados han sido el NDVI de seis meses (Julio a diciembre en el periodo 1981 – 1988). Este modelo muestra un coeficiente de regresión (R^2) de 0.35 a un nivel de significancia de 1%. La Figura 18 muestra el modelo observado y el simulado.

TABLA 4A - PARÁMETROS DEL MODELO 2

Fuente	COEFI	Desviación típica	t	Pr > t	Límite Inferior (95%)	Límite Superior (95%)
Intersección	-0.123	0.040	-3.066	0.004	-0.204	-0.042
Niño1+2	-0.578	0.163	-3.554	0.001	-0.906	-0.250
SHIP1	0.664	0.159	4.182	0.000	0.344	0.984
TROP	-0.007	0.215	-0.033	0.974	-0.441	0.427
NATL	0.332	0.139	2.380	0.022	0.051	0.613

TABLA 4B - ANÁLISIS DE LA VARIANZA

Fuente	GDL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Pr > F
Modelo 2	4	1.601	0.400	5.788	0.001
Error	43	2.974	0.069		
Total corregido	47	4.575			

Calculado contra el modelo Y=Media(Y)

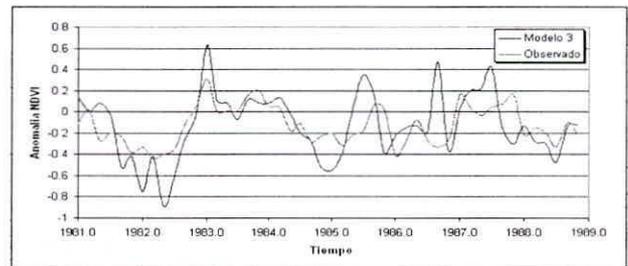


Fig. 18. Modelo 3 de predicción de la sequía en la Costa Norte.

La ecuación del Modelo 3 está dada por:
 $NDVI = -0.123 - 0.580 \times TSM(R-Niño1+2) + 0.665 \times TSM(R-SHIP1) + 0.33 \times TSM(R-NATL)$

TABLA 5A - PARÁMETROS DEL MODELO 3

Fuente	Valor	Desviación típica	t	Pr > t	Límite inferior (95%)	Límite Superior (95%)
Intersección	-0.123	0.039	-3.196	0.003	-0.201	-0.046
Niño1+2	-0.580	0.149	-3.888	0.000	-0.881	-0.279
SHIP1	0.665	0.155	4.290	< 0.0001	0.353	0.977
NATL	0.330	0.124	2.670	0.011	0.081	0.579

TABLA 5B - ANÁLISIS DE LA VARIANZA

Fuente	GDL	Suma de los cuadrados	Media de los cuadrados	F	Pr > F
Modelo 3	3	1.601	0.534	7.897	0.000
Error	44	2.974	0.068		
Total corregido	47	4.575			

Calculado contra el modelo Y=Media(Y)

IV. CONCLUSIONES

El NDVI promedio, de todos los píxel de 8 x 8 km², de todo Perú varía de 0.0 a 0.7 (Figura 8a). En la costa el promedio, es muy bajo: cerca de cero. La sierra está dividida en dos sub-regiones: la parte norte: el NDVI es mayor (cerca de 0.4), la parte sur el NDVI es menor (cerca de 0.1). En la selva peruana el NDVI es mayor que en las regiones costa y sierra (de 0.5 a 0.7). La desviación estándar (DE) del NDVI (Figura 8b) muestra que en la costa el DE es muy pequeño, cerca de 0.0. En la sierra varía de norte a sur desde 0.05 a 0.2. En la selva la DE es mayor y varía desde 0.15 a 0.3. La evolución mensual del NDVI (Figura 9) del año 2000 en todo Perú presentó baja variabilidad durante todo el año en la costa. En la sierra, el NDVI en el norte varió desde 0.4 a 0.5 y en el sur varió desde 0.1 a 0.3. Finalmente, el NDVI de la selva varió entre 0.5-0.7. Los valores NDVI simulados concuerdan muy bien con los valores observados de 1981 a 1989 para todos los tres modelos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la UNMSM en el año 2006 y por INCAGRO en el año 2007. Por la sugerencia del modelo y su aplicación a Perú con imágenes NDVI – AVHRR - NOAA se agradece al Dr. Robinson Negrón (quien fue egresado de esta facultad y realizo sus estudios de postgrado en la Universidad de Sao Paulo en Brasil y ahora trabaja en la Universidad de Tulane en los Estados Unidos). Por la iniciativa de trabajar en eventos extremos se agradece al Dr. Leonidas Ocola, profesor principal de la Facultad de Ciencias Físicas e investigador del Instituto Geofísico del Perú.

REFERENCIAS

- [1] Anyamba, A., and Eastman, J., (1996). Interannual variability of NDVI over Africa and its relation to El Niño / Southern Oscillation. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2533–2548.
- [2] Brack, A. (2004). *Ecología. Enciclopedia Temática del Perú*. Editora El Comercio, Lima, Perú. Pp 190. weather. Memo Indian Meteorology Department, 24, 75–131.
- [3] Cane, M., Zebiak, S., and Dolan, S., (1986). Experimental forecast of El Niño. *Nature*, 321, 827–832.
- [4] CPC-NOAA (2008) - <http://www.cpc.noaa.gov/>
- [5] Cane, M.A., S.E. Zebiak, and S.C. Dolan, 1986: Experimental forecasts of El Niño. *Nature*, 321, 827-832.
- [6] Di, L., Rundquist, D. C., and Han, L., (1994). Modeling relationship between NDVI and precipitation during vegetative growth cycles. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2121–2136.
- [7] GLCF, (2008) - <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms/>
- [8] Justiniano, H., y J. Luna. (2005). “Análisis de sequías aplicación a la cuenca del Lago Poopo, Bolivia – Oruro”. Tesis de Licenciado en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Andrés, 143 Pág.
- [9] Justice, C. O., Townshend, J. R., Holben, B. N., and Tucker, C. J., (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1271–1318.
- [10] Kogan, F., and Sullivan, J., (1993). Development of global droughts-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advanced Space Research*, 13, 219–222.
- [11] Kogan, F.N., (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:621–636.
- [12] Kogan, F., (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1405–1419.
- [13] Liu, W., Massambani, O., and Nobre, C., (1994). Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. *International Journal of Climatology*, 14, 343–354.
- [14] Liu, W., and Kogan, F., (1996). Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2761–2782.
- [15] Liu, W. T., and Ferreira, A., (1991). Monitoring crop production regions in the Sao Paulo State of Brazil using normalized difference vegetation index. *Proceeding of the 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Rio de Janeiro, 27–31 May, Vol. 2 (Chicago: ERIM), pp. 447–455.
- [16] Liu W.T. y Negron R. I. (2001). ENOS drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. *Int. J. Remote Sensing*, 2001, vol. 22, no. 17, 3483–3501
- [17] Menenti, M., Azzali, S., Verhoef, W., and Van Swol, R., (1993). Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Advanced Space Research*, 13, 233–237.
- [18] Ocola, L. (2007). Comunicación personal.
- [19] Prince, S. D., (1991). Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grassland 1981–1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1301–1312.
- [20] Rasmusson, E. J., and Wallace, J.M., (1983). Meteorological aspects of the El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 112, 1195–1202.
- [21] Rojas, J., M. Sullón y J. Salas (2005). Sistema de Vigilancia de la Sequía – Primer y Segundo Producto. Informe presentado a OXFAM – Internacional.
- [22] Stoekenius, T., (1981) Interannual variations of tropical precipitation patterns. *Monthly Weather Review*, 109, 1233–1247.
- [23] Trenberth, K., (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of American Meteorology Society*, 78, 2771–2777.
- [24] Tucker, C. J., Townshend, J. R., and Goff, T. R., (1985). African land- cover classification using satellite data. *Science*, 227, 369–375.
- [25] Tucker, C.J., J.E. Pinzon, and M.E. Brown (2004), Global Inventory Modeling and Mapping Studies, NA94apr15b.n11-Vig, 2.0, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, 04/15/1994.
- [26] Walker, G. T., (1923). Correlation in seasonal variations of eather, VIII. A preliminary study of world
- [27] Wilks, D. S., (1995). *Statistical methods in the atmospheric Sciences*. International Geophysics Series, Vol. 59 (New York: Academic).