

Modelo de Inicio de la Sequía en el Perú y en la Costa Norte usando los Índices ENOS y los Índices de Vegetación del AVHRR / NOAA

Joel Rojas Acuña¹
Eleazar Rufasto Campos²
José Carlos Eche Llenque¹
Flavio Carrillo Gomero¹

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos - UNMSM
Av. Venezuela s/n. Pabellón de Física. Ciudad Universitaria, Lima 1.

² Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo - UNPRG

Av. Juan XXIII 391 - Lambayeque - Perú

¹jrojasa@unmsm.edu.pe

²erufasto@hotmail.com

¹jocarelle@hotmail.com

¹fcarrillog@unmsm.edu.pe

Resumen. Se propone un modelo de predicción de inicio de la sequía en el Perú y la costa norte utilizando la serie de tiempo de los promedios mensuales de las imágenes NDVI - AVHRR - 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 de 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.

Palabras clave: NDVI, NOAA, Sequía, Índices ENOS.

Abstract. A model to predict the onset of draught in Peru and in the northern coast is proposed which uses the time series of monthly averages from the NDVI-AVHRR-NOAA images, the El Niño Southern Oscillation (ENOS) indices, and the technique of multiple linear regression. The time series of monthly averages of the standard anomalies of the NDVI and ENOS indices for the period from July 1991 to December 2003 was obtained. The monthly evolution of NDVI for the year 2000 in all Peru shows that the months of draught start in August and end in December. The mean NDVI in all Peru varies from 0.0 (naked soil) to 0.7 (soil with vegetation). The standard deviation of NDVI shows that in the northern coast it varies less in comparison with the Sierra and Jungle.

Keywords: NDVI, NOAA, Draught, ENOS indices

1. Introducción

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 (Tucker et al. 1985; Menenti et al. 1993), y vigilar las condiciones de crecimiento de la vegetación (Kogan, 1990; Prince, 1991). El NDVI ha sido usado para hacer el seguimiento del estado fenológico del crecimiento de la vegetación a una escala regional (Justice et al. 1985), para vigilar la evolución de la sequía (Kogan y Sullivan, 1993; Liu y Kogan, 1996) y estimar la productividad de las cosechas (Prince, 1991). Liu y Ferreira (1991)

reportaron una buena correlación entre la precipitación total mensual y el NDVI mensual acumulado. Di et al (1994), 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 (Justiniano y Luna, 2005; Kogan, 1997). El objetivo de este trabajo es contribuir al desarrollo e implementación de un procedimiento de predicción de periodos de sequía para la región Costa Norte de Perú usando las imágenes NDVI–AVHRR mensual en el periodo jul-81 hasta dic-03, los datos TSM in-situ de las Regiones Oceánicas 1, 2, 3, y 4, y los datos IOS.

2. Datos Imágenes

2.1 Datos imágenes NDVI - AVHRR – NOAA

El conjunto de datos GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) (GLCF, 2008; Tucker et al. 2004) es un producto denominado Normalized Difference Vegetation Index, (NDVI) disponible por un periodo de 22 años desde 1981 a 2003. Este conjunto de datos es obtenido de las imágenes procedentes del instrumento 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) Wilks (1995).

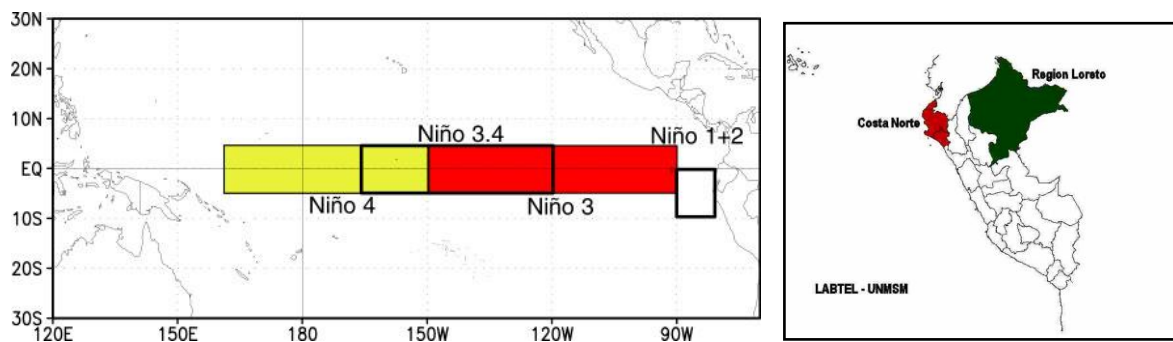


Figura 1. (a) Regiones El Niño (CPC-NOAA, 2008). (b) Mapa del Perú con las áreas de estudio.

2.2 Datos índices ENOS

Los datos usados en este trabajo 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 NOAA (CPC-NOAA, 2008). En este estudio se han utilizado los datos de la Temperatura de la Superficie del Mar de diferentes regiones El Niño. La Figura 1a muestra la ubicación de las regiones El Niño. La Temperatura de la Superficie del Mar en las regiones oceánicas 1,2 y 3,4 son obtenidos del Centro de Predicción del Clima (CPC-NOAA).

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).

3. Metodología

3.1 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:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1)$$

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). Estos datos son usados para calcular los datos de la anomalía de NDVI. Wilks (1995) 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,

$$z = \frac{x - x_p}{\sigma} \quad (2)$$

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

3.2 Área de Estudio

El área de estudio comprende la región Costa Norte de Perú (Figura 1b). Se determinara las anomalías NDVI de esa región y se correlacionará con las anomalías estandarizada TSM (Temperatura Superficie del Mar) y IOS en el mismo período.

4. Resultados

4.1 Mapas del Perú: Promedio y Desviación Estándar del NDVI

En la Figura 2 se muestra la distribución del NDVI promedio y su correspondiente desviación estándar de todo Perú para la serie de tiempo que corresponde a jul81–dic03 del AVHRR para píxeles espaciales de 8 x 8 km. En la Figura 2a 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, está dividida en dos sub-regiones, 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 muestra que en la costa sur DE es muy pequeño, cerca de 0.0. En la sierra varia 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. Se delimitan muy bien las tres regiones geográficas peruanas. En la Figura 2a se presenta los límites de las principales zonas ecológicas de Brack (2004) sobrepuestas en el mapa del NDVI para el período jul-81–dic-03. 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 2b muestra los límites de las zonas ecológicas de Brack sobre el mapa de la desviación estándar (DE) del NDVI. La desviación

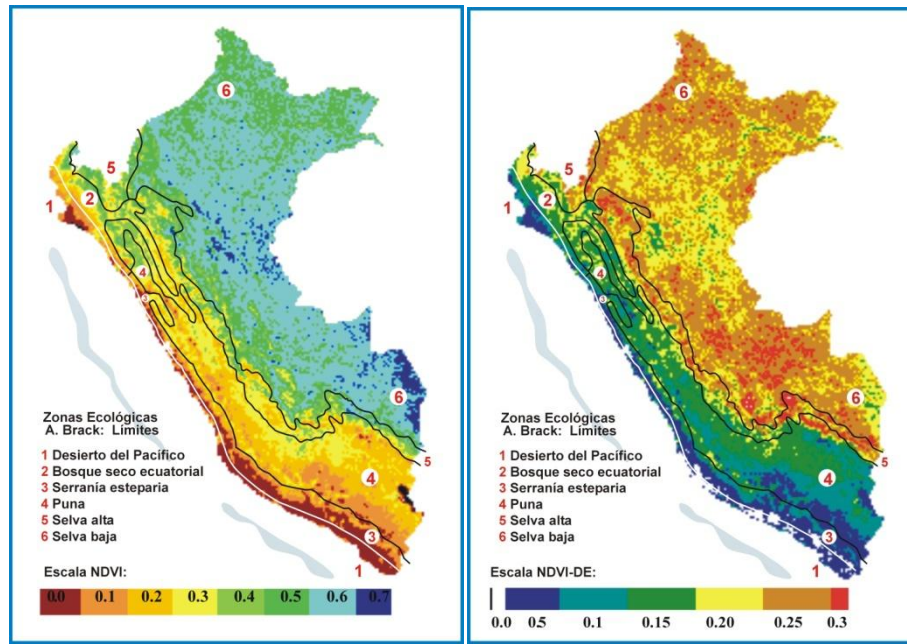
cero corresponde a los desiertos, éstos están bien delimitados por el límite de la zona del Desierto del Pacífico. La Puna y la Serranía Esteparia muestran baja variabilidad. La más alta variabilidad se da en las zonas de selva.

4.2 Evolución mensual del NDVI en el Perú

Los datos NDVI mensuales del Perú fueron procesados para el período jul81 a dic03. En la Figura 3, se muestra un ejemplo de las imágenes NDVI mensuales de Perú para el período de un año (ene–dic 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.

4.3 Anomalías estandarizadas de NDVI, IOS y TSM

Los datos de anomalía estandarizada mensual de los índices NDVI, IOS y TSM de jul-81 a dic-03 serán usados para desarrollar un procedimiento de predicción de la sequía en región costa norte. En la Figura 4a y 4b, se muestran la serie de tiempo de las anomalías estandarizada NDVI de la Costa Norte 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 (Figura 4) fue observado que 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 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 está influenciado por varios sistemas de circulación atmosférica aumentado por la TSM en varias regiones y originadas desde el Océano Pacífico. Estos sistemas influenciados 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 fueron seleccionados 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 un cierto patrón de variación cíclico predecible.



(a)

(b)

Figura 2. (a) NDVI promedio período jul-81–dic-03. (b) Desviación Estándar de la serie temporal de NDVI período jul-81–dic-03, superpuestas están los límites de las zonas ecológicas (Brack, 2004).

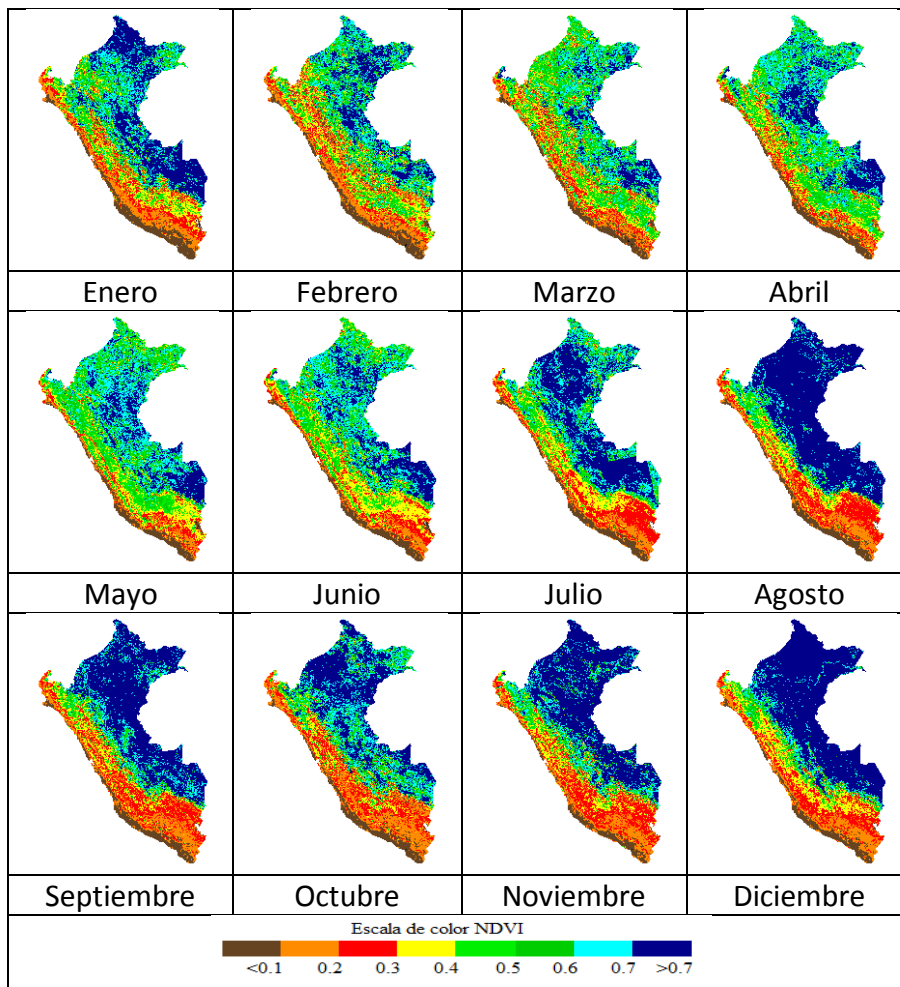


Figura 3. Evolución temporal del NDVI del Perú para el periodo Enero – Diciembre 2000

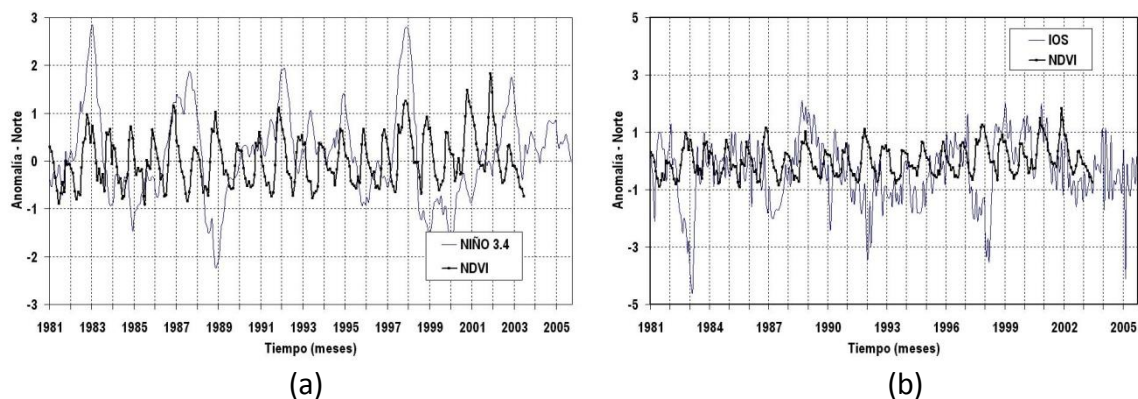


Figura 4. (a) Anomalia estandarizada del NDVI para la costa norte de Perú y la anomalia estandarizada de la TSM de la región oceánica 3.4 para el período jul-81 a dic-03. (b) Anomalia estandarizada del NDVI de la costa norte de Perú y la anomalia IOS (jul-81 a dic-03).

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
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 2. 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	
			r	±CL	r	±CL	r	±CL	r	±CL	r	±CL
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

4.4 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.

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 5a) 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%. La ecuación del Modelo 1 esta dado por:

$$\text{NDVI} = -0.146 - 0.551 \times \text{TSM}(\text{R-Niño}1+2) + 0.596 \times \text{TSM}(\text{R-SHIP}1) + 0.22 \times \text{TSM}(\text{R-TROP}) \quad (3)$$

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 5b muestra el modelo observado y el simulado. La ecuación del Modelo 2 esta dado por:

$$\text{NDVI} = -0.123 - 0.578 \times \text{TSM}(\text{R-Niño}1+2) + 0.664 \times \text{TSM}(\text{R-SHIP}1) - 0.007 \times \text{TSM}(\text{R-TROP}) + 0.332 \times \text{TSM}(\text{R-NATL}) \quad (4)$$

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 5c muestra el modelo observado y el simulado. La ecuación del Modelo 3 esta dado por:

$$\text{NDVI} = -0.123 - 0.580 \times \text{TSM}(\text{R-Niño}1+2) + 0.665 \times \text{TSM}(\text{R-SHIP}1) + 0.33 \times \text{TSM}(\text{R-NATL}) \quad (5)$$

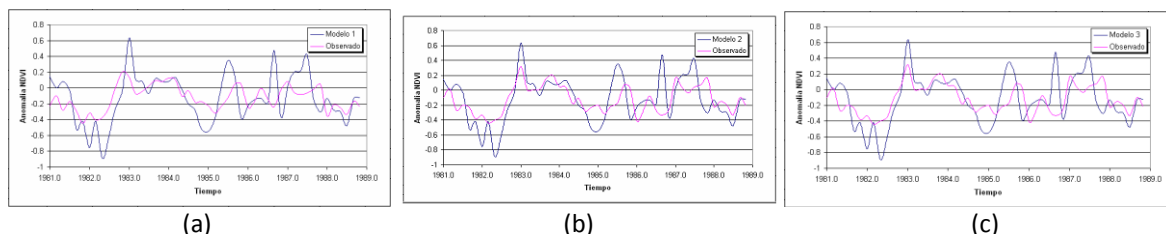


Figura 5. (a) Modelo 1 de predicción del inicio de la sequía en la Costa Norte. (5b). Modelo 2 de predicción del inicio de la sequía en la Costa Norte. (5c). Modelo 3 de predicción del inicio de la sequía en la Costa Norte.

5. Conclusiones

El NDVI promedio, de todos los píxel de 8 x 8 km², de todo Perú varía de 0.0 a 0.7. En la costa el promedio, es muy bajo: cerca de cero. La sierra, esta 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 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 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 los tres modelos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la UNMSM en el año 2006 y por programa INCAGRO del Ministerio de Agricultura en los años 2007-2009.

Referencias Bibliograficas

- Brack, A.** (2004). Ecología. Enciclopedia Temática del Perú. Editora El Comercio, Lima, Perú. Pp 190. weather. Memo Indian Meteorology Department, 24, 75–131.
- CPC-NOAA** (2008) - <http://www.cpc.noaa.gov/>
- 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.
- GLCF,** (2008) - <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms/>
- 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.
- 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.
- Kogan, F., and Sullivan, J.,** (1993). Development of global droughts-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advanced Space Research*, 13, 219–222.
- Kogan, F.N.,** (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:621–636.
- Kogan, F.,** (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1405–1419.
- Liu, W., Massambani, O., and Nobre, C.,** (1994). Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. *International Journal of Climatology*, 14, 343–354.
- Liu, W., and Kogan, F.,** (1996). Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2761–2782.
- 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.*
- 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
- 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.
- Prince, S. D.,** (1991). Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grassland 1981–1988. *Int. J. of Remote Sensing*, 12, 1301–1312.
- Tucker, C. J., Townshend, J. R., and Goff, T. R.,** (1985). African land- cover classification using satellite data. *Science*, 227, 369–375.
- 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.*
- Wilks, D. S.,** (1995). *Statistical methods in the atmospheric Sciences. International Geophysics Series, Vol. 59 (New York: Academic).*