

Distribución espacial de anomalías del NDVI derivado del sensor VEGETATION SPOT 4/5 y su relación con las coberturas vegetales, usos de la tierra y características geomorfológicas en la provincia de Santiago del Estero, Argentina

Spatial distribution of anomalies of NDVI derived from sensor VEGETATION SPOT 4/5 and its relation with vegetation cover, uses of ground and geomorphology in Santiago del Estero, Argentina

Jose Luis Tiedemann^{1*}

Hugo Raul Zerda²

Mariano Grilli³

Andrés C. Ravelo⁴

Resumen

Se determinaron las anomalías negativas (AN) y positivas (AP) del NDVI derivado del sensor VEGETATION SPOT 4/5, en la provincia de Santiago del Estero, Argentina. El periodo analizado (1998–2008) tuvo fuertes variaciones en los patrones de precipitación, por efecto del ENSO, por cuanto las anomalías del NDVI fueron evaluadas, mediante tabulación cruzada, en función de dos períodos: húmedo (PH) y seco (PS). Las AN, se relacionaron, durante todo el periodo, con vegetación halófila en áreas deprimidas salobres, con vegetación hidrófila en ambientes acuáticos y con suelo rocoso. Durante el PS, las AN se relacionaron con áreas deforestadas con fines agrícolas. Las AP, se relacionaron, durante todo el periodo, con el bosque Chaqueño denso y bosque Chaqueño Serrano denso. La mayor estabilidad y productividad de biomasa verde de los bosques, estaría relacionada, a su mayor biodiversidad, estratificación, al predominio de especies leñosas perennes de raíces profundas y a las estratégicas adaptaciones, morfológicas

1 Ing. Zoot., M. Sc.; Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales; Endereço: Av. Belgrano (sur) 1912, GB200ABT, Santiago del Estero Capital, Argentina; E-mail: mann@unse.edu.ar (*) Autor para correspondencia.

2 Dr. en Cs. Forestales; Facultad de Ciencias Forestales; Universidad Nacional de Santiago del Estero; Avenida Belgrano (sur) 1912, (cp 4200), Capital, Santiago del Estero, Argentina; E-mail: hzerda@unse.edu.ar

3 Dr. Cs. Biológicas; Área SIG y estudio de plagas CREAN (Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales) Docente de la Universidad Nacional de Córdoba. Inv. Asistente CONICET; E-mail: mgrilli@crean.agro.uncor.edu

4 PhD. Área Agrometeorología; Ingeniero Agrónomo; Director CREAN (Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales) <http://www.crean.unc.edu.ar/>; Inv. Independiente CONICET, Docente de Posgrado e investigador de La Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: ravelo@crean.agro.uncor.edu

Recebido para publicação em 23/03/2010 e aceito em 22/09/2010

y fisiológicas, para el uso eficiente del agua. Las regiones geomorfológicas no se relacionan entre si entre períodos.

Palabras claves: sensor VEGETATION SPOT 4/5; anomalías del NDVI; deforestación; vegetación nativa; sequía; excesos hídricos; geomorfología.

Abstract

The negative (AN) and positive (AP) anomalies of the NDVI derived from sensor VEGETATION SPOT 4/5 were determined in the province of Santiago del Estero, Argentina. The analyzed period (1998-2008) presented strong variations in rainfall patterns, as a result of the ENSO, inasmuch as the anomalies of the NDVI were evaluated, by means of crossed tabulation, based on two periods: humid (PH) and dry (PS). The AN, were related with halophytic species of depressed areas, with vegetation aquatic hydrophilic and rocky ground. During the dry period, the AN were related to deforested areas with agricultural aims. The AP, were related, throughout the period with the forest dense Chaco Semiarid and forest dense Chaco Serrano. The greater stability and productivity of green biomass of forest, would be related, greater biodiversity, stratification, with a predominance of woody perennials with deep roots and strategic morphological and physiological adaptations, for the efficient use of water. The geomorphological regions are unrelated to each other between both periods. Key words: sensor VEGETATION SPOT 4/5; anomalies of NDVI; deforestation; vegetation native; drought; excess water and geomorfology.

Key words: sensor VEGETATION SPOT 4/5; anomalies of NDVI; deforestation; native vegetation; drought; excess water; geomorfology.

Introducción

Las sequías en Sahel, en el Sudeste de África, en Brasil y Australia; el fuego en Indonesia y Brasil, y las inundaciones en las costas de Perú, Ecuador y USA son algunas manifestaciones por calentamiento del ENSO (El Niño/Oscilaciones del Sur) (ANYAMBA y EASTMAN, 1996; ANYAMBA et al., 2001). El ENSO es un indicador clave de variabilidad climática interanual a escala global, y la región en estudio durante el período analizado, habría estado fuertemente influenciada por él o su fase fría La Niña; según Anyamba et al. (2002) la transición entre estas fases es

generalmente inversa. Este fenómeno ha causado dramáticos cambios en los patrones interanuales de precipitaciones, resultando en precipitaciones por encima de lo normal en algunas regiones y por debajo de lo normal en otras (Anyamba et al., 2001, 2002). Ravelo y Rotondo (1987) analizaron la variabilidad espacial y temporal de sequías y excesos hídricos en zonas semiáridas y húmedas mediante el índice de sequía de Palmer, estos autores determinaron que la variabilidad de las sequías y de los excesos hídricos es mayor en zonas semiáridas. Minetti (2008) determinó mediante el índice de tendencia regional de sequías que el Noroeste Argentino, región donde se encuentra la provincia de Santiago

del Estero, entre 1998 y 2008 tuvo un periodo con excesos hídricos y un periodo de sequía. El fenómeno ENSO (El Niño/Oscilaciones del Sur) es reconocido como un indicador clave de variabilidad climática interanual a escala global y que la región en el periodo analizado estaría fuertemente influenciada por él y su fase fría La Niña; según Anyamba et al. (2002) la transición entre estas fases es generalmente inversa.

La sequía es un periodo en que se reduce el crecimiento de la vegetación por déficit de precipitaciones e induce a un decrecimiento en la capacidad fotosintética que puede ser detectado y cuantificado mediante anomalías del NDVI (TUCKER y CHOUDHURY, 1987). A partir de series temporales derivadas de los sensores AVHRR y VEGETATION, Budde et al. (2004) valoraron y confeccionaron mapas de anomalías positivas y negativas del NDVI en Senegal, las anomalías negativas se relacionaron con áreas de baja productividad con procesos de erosión como bosques y pastizales degradados afectados por sequías. Lasaponara (2006) determinó la variabilidad interanual de bosques, arbustos, pastizales y cultivos agrícolas en Sicilia mediante anomalías del NDVI resaltando la potencial utilidad para realizar estudios ambientales de las series temporales derivadas del sensor VEGETATION. Weier y Herring (2007) monitorearon la dinámica de la vegetación en Estados Unidos mediante anomalías del NDVI, identificaron áreas con elevada actividad fotosintética o anomalías positivas del NDVI en el Norte y Sur de Dakota, Alberta y Saskatchewan y las asociaron con abundantes precipitaciones, a su vez, identificaron áreas con anomalías negativas del NDVI en el Este y las asociaron con sequías severas. A su vez, Gutman et al.

(1996) detectaron eventos naturales extremos como sequías o inundaciones, mediante un prototipo para el monitoreo global de la tierra basado en mapas mensuales de anomalías estandarizadas del NDVI este concepto de monitoreo ha sido empleado en estudios climáticos durante décadas mediante datos derivados del AVHRR-NOAA.

Sumado al significativo impacto socio-económico de las anomalías climáticas globales, la provincia de Santiago del Estero tiene actualmente una grave situación ambiental a nivel local, según Zerda (2005) se debe a los severos y continuos cambios producidos en el uso y coberturas del suelo por la deforestación. El monocultivo erosionó el valor cultural del bosque nativo convirtiéndolo en un estorbo para el desarrollo de prácticas agrícolas simplistas.

La información multidimensional aportada por el NDVI y sus anomalías, posibilitará el monitoreo de los cambios producidos en las coberturas vegetales a escalas espaciales y temporales precisas y oportunas, facilitando, la toma de decisiones para realizar tareas de prevención y control de actividades antrópicas insustentables. A su vez, nos da la posibilidad de conocer la respuesta de las coberturas de la tierra ante variaciones climáticas extremas como sequías o excesos de humedad de manera simultánea en todo el territorio provincial. Con el fin de aportar herramientas para la preservación y uso sustentable de las coberturas vegetales nativas, los objetivos de este trabajo son: a) determinar la distribución espacial de anomalías del NDVI en el periodo húmedo (1998-2003) y seco (2004-2008) de Santiago del Estero, b) cuantificar las superficies anómalas, c) relacionar su distribución espacial con las coberturas vegetales, usos de la tierra y características geomorfológicas, y

d) determinar las relaciones entre el NDVI de las regiones geomorfológicas entre períodos.

Materiales y Métodos

La provincia de Santiago del Estero (Figura 1), el área en estudio, se localiza entre $25^{\circ} 40'$ y $30^{\circ} 30'$ de latitud Sur y entre $61^{\circ} 40'$ y $65^{\circ} 10'$ de longitud Oeste, y posee una superficie de 145.758 km^2 (TORRES BRUCHMAN, 1981). El tipo climático es semiárido *BShw*, según la clasificación climática de Köppen (TORRES BRUCHMAN, 1981). La precipitación en el Este de la provincia es de 800 mm, en el centro 550 mm y en el extremo Sudoeste 450 mm, incrementándose en el extremo noroeste hasta 800 mm. Minetti (2009) determinó, mediante el índice tendencias regionales de sequías, que el Noroeste Argentino, región

donde se encuentra la Provincia de Santiago del Estero, tuvo un periodo húmedo (PH) desde el 1998 al 2003 y un periodo seco (PS) desde el 2004 al 2008. La evapotranspiración anual es de 1.100 mm, con déficit hídrico anual. La isoterma de los 47°C cubre a la provincia, siendo la media anual histórica de $27,7^{\circ}\text{C}$ (TORRES BRUCHMANN, 1981).

La vegetación de Santiago del Estero está formada por bosques xerófitos, estepas halófilas y sabanas edáficas o inducidas por incendios y deforestación (CABRERA, 1976, SAyDS, 2004). Sin embargo, la deforestación con fines agrícolas y ganaderos produjo severos cambios en las coberturas vegetales nativas, predominando en el Este y Oeste de la provincia paisajes de fragmentos de bosque y pastizales con monocultivos agrícolas (ZERDA y MOREIRA, 2001 y 2004).

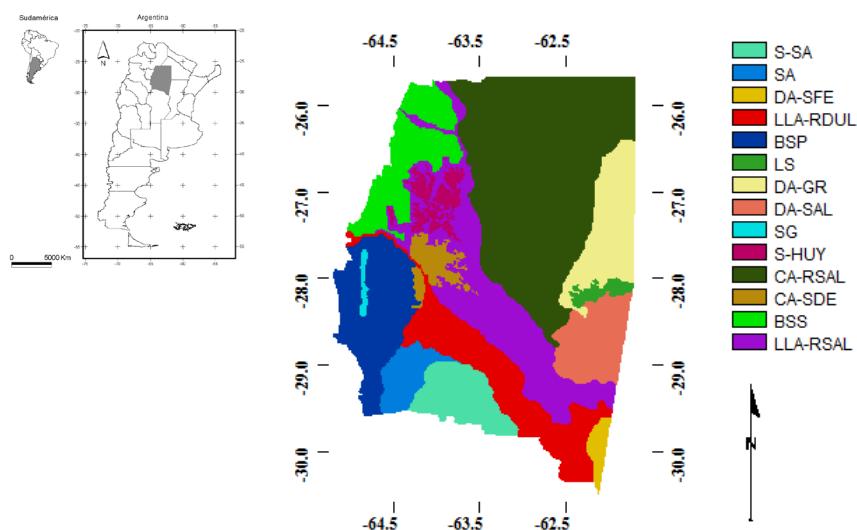


Figura 1. La Provincia de Santiago del Estero y regiones geomorfológicas: Sierras de Sumampa y Ambargasta (S-SA), Salinas de Ambargasta (SA), Dorsal Agrícola Santafecina (DA-SFE), Llanura Aluvial del Río Dulce (LLA-RDUL), Bajada de las Sierras Pampeanas (BSP), Lagunas Saladas (LS), Dorsal Girardet-Roversi (DA-GR), Dorsal Agrícola del Salado (DA-SAL), Sierras de Guasayan (SG), Saladillos de Huyamampa (S-HUY), Cono Aluvial del río Salado (CA-RSAL), Cono Aluvial del Santiago del Estero (CA-SDE), Bajada de las Sierras Subandinas (BSS), Llanura Aluvial del Río Salado (LLA-RSAL)

La variable utilizada es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (TUCKER, 1979). El NDVI derivado del VEGETATION, es la combinación aritmética de las porciones roja e infrarroja del espectro y se obtiene de la siguiente ecuación: $NDVI_{VGT2} = (\text{NIR } \lambda 0.782 - 0.890 \mu\text{m} - \text{RED } \lambda 0.615 - 0.690 \mu\text{m}) / (\text{NIR } \lambda 0.782 - 0.890 \mu\text{m} + \text{RED } \lambda 0.615 - 0.690 \mu\text{m})$.

Se derivaron 387 mapas originales de NDVI de Sudamérica, estandarizados a 8 bits, sensor remoto VEGETATION SPOT 4/5, desarrollado por el Centro Nacional de Estudios Espaciales, Francia. Los píxeles de cada mapa de NDVI poseen una resolución espacial de 1 km² y una resolución temporal decádica clasificados en base al criterio NDVI Máximo Valor Compuesto al límite de la atmósfera (PASSOT, 2000). La provincia de Santiago del Estero, el área de estudio, fue extractada de 387 mapas de NDVI de Sudamérica mediante máscaras binarias.

De la serie temporal resultante, se confeccionó un mapa de NDVI medio, correspondiente al periodo húmedo 1998-2003 (NDVI PH) y un mapa de NDVI medio del periodo seco 2004-2008 (NDVI PS). Los mapas de NDVI del PH y PS fueron clasificados en base al umbral de un desvío estándar (σ) con respecto al NDVI medio (EASTMAN et al., 1995; LEE y WONG, 2001; VOLCANI et al., 2005).

Las tres clases utilizadas fueron:

Clase 1 = < Media - σ = Anomalías Negativas (AN) (16% píxeles)

Clase 2 = [Media ± σ] = Variación Normal (VN) (68% píxeles)

Clase 3 = > Media + σ = Anomalías Positivas (AP) (16% píxeles)

La variación espacial de anomalías entre periodos se determinó por tabulación cruzada entre los mapas clasificados del PH

y PS (EASTMAN et al., 1995; JENSEN, 1996). Se confeccionaron polígonos para cada clase mediante interpretación visual y delineación en pantalla, con los cuales se relacionó la distribución espacial de anomalías del NDVI con las coberturas de la tierra. Para esto se utilizaron imágenes de alta resolución derivadas del sensor LANDSAT 5-TM, los mapas de vegetación predominante, usos y procesos de la tierra, desarrollados por Zerda y Moreira (2006), en base al criterio de zonificación de Santiago del Estero, y las regiones geomorfológicas (ANGUEIRA et al., 2007).

Las relaciones entre regiones geomorfológicas y entre períodos se determinaron mediante el coeficiente de correlación de Pearson (LEE y WONG, 2001). El número mínimo de muestras n para cada región se determinó mediante la metodología propuesta por Fitzpatrick-Lins (1981), siendo el número mínimo de muestras $n = t^2_{(n-1)\alpha/2} \times (CV\%)^2/e^2$, en donde CV% es el coeficiente de variación expresado en porcentaje, y e es el error probable, se consideró como aceptable un error del 5%, y $t = 2$, es el desvío estándar normal de 1,96 para un intervalo de confianza de dos colas del 95% (EASTMAN et al., 1995). Para diferenciar a cada región entre períodos se le adicionó, a cada una de ellas, al final de su sigla la letra H (húmedo) y S (seco) (Tabla 2).

Resultados y Discusiones

De cada mapa confeccionado fueron enmascaradas, mediante máscaras binarias, los píxeles menores a -2σ o anomalías negativas extremas del NDVI (clase 1, Figura 2). Esta clase abarcó una superficie de 6360 km², el 4,5% de la superficie total, el 1% asociado a ciudades, el 10% asociado

a cuerpos de agua en la llanura aluvial del río Dulce (LLA-RDUL), el 21% asociado a cuerpos de agua en las Lagunas Saladas (LS), el 14% asociado a cuerpos de agua en los saladillos de Huyamampa (S-HUY) y el 94% asociado a cuerpos de agua y suelo salino en las Salinas de Ambargasta (SA).

En la figura 2, se presenta la variación espacial de anomalías positivas (AP), anomalías negativas (AN) y variación Normal (VN) del NDVI en Santiago del Estero, y en la tabla 1, el porcentaje de las superficies anómalas en base a la distribución espacial de las regiones geomorfológicas de Santiago del Estero.

La clase 2 (Figura 2 y Tabla 1) abarcó 14.515 km² el 10% de la superficie total, se destaca en esta clase el persistente

comportamiento AN en ambos períodos, estas se distribuyeron en las áreas deprimidas de las lagunas Saladas (LS, 30%), saladillos de Huyamampa (S-HUY, 35%) y llanura aluvial de río Dulce (LLA-RDUL, 27%) y estarían relacionadas con Jumeales de (*Allenrolfea sp.*) y (*Heterostachys sp.*) y vinalares de (*Prosopis ruscifolia*), algarrobales de Algarrobo blanco y negro (*Prosopis alba* y *nigra*) (ZERDA y MOREIRA, 2006). En la bajada de Sierras Subandinas (BSS, 12%), bajada de Sierras Pampeanas (BSP, 15%), cono aluvial de Santiago del Estero o área de riego (CA-SDE, 14%) y dorsal agrícola Girardet-Roversi (DA-GR, 9%) estarían asociadas con áreas desmontadas para agricultura, similares resultados obtuvieron Budde et al. (2004) al cuantificar la distribución espacial

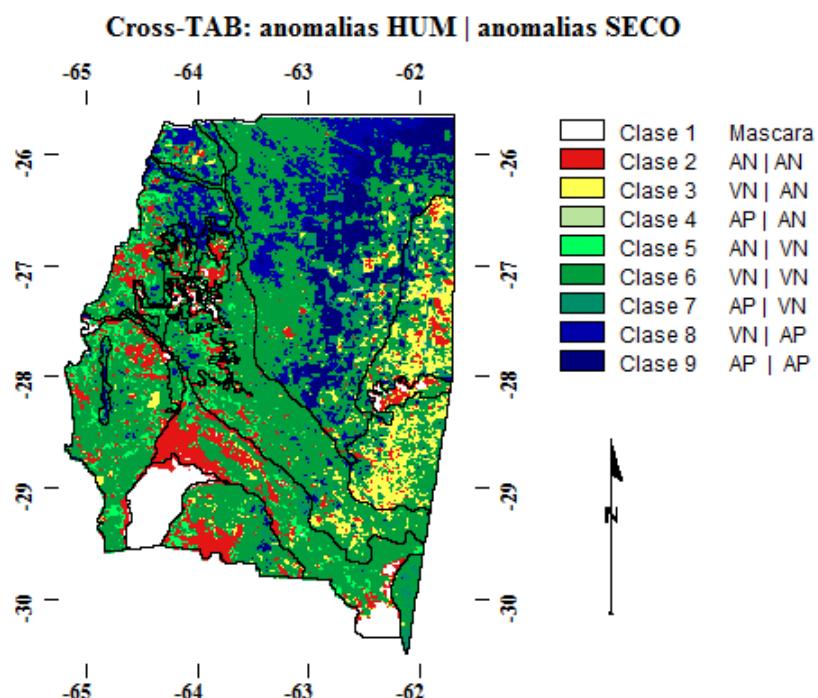


Figura 2. Distribución espacial de anomalías del NDVI derivadas del sensor VEGETATION SPOT4/5, en el periodo húmedo y seco en la provincia de Santiago del Estero

Tabla 1. Variación de la distribución espacial de las anomalías del NDVI en porcentaje de la superficie de las regiones geomorfológicas de Santiago del Estero

| Regiones | clase 2 AN AN | clase 3 VN AN | clase 4 AP AN | clase 5 AN VN | clase 6 VN VN | clase 7 AP VN | clase 8 VN AP | clase 9 AP AP | Sup. Tot. km ² |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| S-SA | 25 | 5 | 0 | 8 | 56 | 2 | 1 | 2 | 7.150 |
| SG | 2 | 0 | 0 | 3 | 59 | 2 | 11 | 23 | 570 |
| DA-SFE | 4 | 1 | 0 | 1 | 69 | 24 | 0 | 1 | 1.515 |
| DA-GR | 9 | 31 | 2 | 0 | 31 | 17 | 0 | 9 | 10.092 |
| DA-SAL | 5 | 42 | 0 | 0 | 45 | 6 | 0 | 1 | 7.983 |
| BSS | 12 | 2 | 0 | 15 | 49 | 0 | 20 | 1 | 7.241 |
| BSP | 15 | 3 | 0 | 14 | 67 | 0 | 1 | 0 | 13.482 |
| CA-RSAL | 1 | 3 | 0 | 1 | 48 | 7 | 18 | 22 | 45.866 |
| CA-SDE | 14 | 2 | 0 | 21 | 56 | 0 | 6 | 0 | 3.215 |
| LLA-RSAL | 7 | 4 | 0 | 6 | 72 | 2 | 8 | 2 | 24.661 |
| LLA-RDUL | 27 | 3 | 0 | 8 | 51 | 1 | 0 | 0 | 15.201 |
| LS | 30 | 13 | 0 | 0 | 34 | 0 | 0 | 0 | 1.413 |
| SA | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.092 |
| S-HUY | 35 | 1 | 0 | 15 | 34 | 0 | 1 | 0 | 3.277 |
| % Sup. Total x clase | 10 | 7 | 0 | 5 | 52 | 4 | 8 | 8 | |
| Sup. x clase km ² | 14.515 | 10.364 | 307 | 7.746 | 75.754 | 6.485 | 12.125 | 12.103 | |

de anomalías del NDVI en Senegal, ellos determinaron que las AN se relacionaban con áreas de baja productividad, en procesos de erosión como bosques degradados y pastizales sobre pastoreado. Se destaca que el 25% de las Sierras de Sumampa-Ambargasta (S-AS) tuvo AN y se relacionaron con suelos rocosos de las zonas más elevadas, y con pastizales naturales ralos, similar resultado obtuvieron Li et al. (2004) al determinar bajos valores de NDVI en cultivos agrícolas, sabanas y estepas de Senegal, asociados con áreas naturalmente improductivas.

La clase 3 (Figura 2 y Tabla 1) abarcó 10.364 km² el 7% de la superficie total, el 31% de la DA-GR y el 42% de la DA-SAL, pasaron de VN en el periodo húmedo a AN en el seco, estas se asociaron con áreas desmontadas, la respuesta es

consistente de acuerdo a resultados de Zerda (2005) que indica el predominio de cultivos de oleaginosas, cereales y forrajeras en la DA-GR y en la DA-SAL; estas áreas presentan un comportamiento normal ante la disponibilidad de humedad edáfica del PH, por el contrario en el PS los monocultivos fueron severamente afectados por la sequía debido a que carecen de estrategias para el uso eficiente del agua. Estas condiciones de estrés hídrico reducirían críticamente la tasa de fotosíntesis (PETER y EVE, 1995; WEISS et al., 2004), pudiendo también producirse una elevada mortandad de hojas y plantas (RAY, 1995; KARNIELI et al., 2002; WEISS et al., 2004). La clase 4 (Figura 2 y Tabla 1) se distribuye en el 2% de la superficie de DA-GR, si bien la superficie no es significativa (307 km²), toma relevancia el

pasaje directo de AP en el PH a AN en el PS. Pudo haber influido en esto, el crecimiento en más de 1,5 millones de ha de los desmontes con fines agropecuarios durante el período 1970-2002 (ZERDA y MOREIRA, 2001, 2004).

Las clases 5, 6 y 7 (Figura 2 y Tabla 1) abarcaron un total de 89.985 km², estas se relacionaron con la distribución espacial del bosque xerofítico abierto, áreas desmontadas en regeneración, estepas halófitas y sabanas edáficas (CABRERA, 1976), en el 52% de la superficie tuvo un comportamiento normal durante todo el período analizado y el 61% durante el PS, esta respuesta ante la sequía estaría relacionada con las estrategias adaptativas desarrolladas por estas especies para el uso eficiente del agua (KARNIELI et al., 2002, WANG et al., 2003) las precipitaciones tienen un gran impacto sobre la vegetación en períodos de sequía (KARNIELI et al., 2002; JI y PETERS, 2003) de acuerdo a Nicholson et al. (1990) y Karnieli et al. (2002), la vegetación de ambientes áridos responde de manera clara e inmediata a eventos de precipitaciones, especialmente las especies anuales, el pastizal natural tiene un efecto *buffer* ante fluctuaciones climáticas (WANG et al., 2003), debido a la excelente relación entre la superficie de absorción de sus raíces con la superficie de hoja para transpiración (RAY, 1995). A su vez, la variabilidad normal en la dorsal agrícola de Santa Fe (DA-SFE, 24%) estaría relacionada con su régimen hídrico superior y al predominio de cultivos perennes (ZERDA, 2005).

Las clases 8 y 9 (Figura 2 y Tabla 1) se distribuyeron en 24.218 km², el 16% de la superficie provincial, se destaca el persistente comportamiento AP en ambos períodos, son las áreas de mayor estabilidad

y productividad de Santiago del Estero en el período analizado, se relacionaron con el bosque Chaqueño Serrano denso y bosque Chaqueño denso. En el bosque Chaqueño Serrano de las sierras de Guasayán (SG, 34%) se encuentra especies arbóreas diferentes al bosque Chaqueño denso, como ser: horco quebracho (*Schinopsis haenkeana*), molle de beber (*Lithaea ternifolia*), espinillares de acacias, palmares, galerías de especies de menor porte, ceibo (*Erythrina falcata*), sauce criollo (*Salix humboldtiana*), entre otras (RAGONESE y CASTIGLIONI, 1968). El bosque Chaqueño fragmentado de la bajada de Sierras Subandinas (BSS, 20%) en la dorsal Girardot-Roversi (DA-GR, 9%) y en el cono aluvial del río Salado (CA-RSAL, 40%) se encuentran mayormente formados por quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis lorentzii*), quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*), itín (*Prosopis kuntzei*), mistol (*Zizyphus mistol*), algarrobo blanco (*Prosopis alba*), el algarrobo negro (*Prosopis nigra*) y el estrato graminoso (RENOLFI, 1986).

La distribución espacial del bosque en el sector Este (Clase 9), se relaciona con unas de las áreas con mayor régimen de precipitaciones de la provincia. El bosque responde con elevados valores de NDVI, y con baja sensibilidad del NDVI a la variación interanual de las precipitaciones. El bosque posee un efecto *buffer* ante fluctuaciones climáticas (WANG et al., 2003), la gran estabilidad y productividad se debería a la elevada biodiversidad con predominio de especies perennes leñosas de raíces profundas que lo componen y a especies anuales de gran adaptación ante adversidades climáticas, estas responden rápidamente ante eventos de precipitaciones especialmente en períodos secos (NICHOLSON et al.,

1990; KARNIELI et al., 2002; WANG et al., 2001, 2003).

No se encontraron relaciones significativas entre el NDVI de las regiones geomorfológicas ($p>0,05$) entre periodos (Tabla 2). Considerando que cada región relacionada con si misma tiene un $r=1$, las relaciones significativas ($p<0,01$) obtenidas marcarían el efecto del periodo sobre cada región en particular. La región que mejor se relacionó entre periodos fue la Sierras de Guasayán (SG, $r=0,93$) esto es consistente debido a que esta región fue una de las más estables y productivas (SG clase 8 y 9, Tabla 1). A su vez, el cono aluvial del río Salado, de gran productividad y estabilidad entre periodos, tuvo una moderada relación (CA_RSAL, $r=0,75$), esta respuesta estaría relacionada a su gran extensión y la gran diversidad de coberturas vegetales que se distribuyen en su superficie. La región con menor relación fue las Lagunas Saladas (LS, $r=0,64$), este resultado estaría relacionado, a que esta región tuvo en el 37% de su superficie AN durante todo el periodo (LS clase 2 y 3, Tabla 1).

Conclusiones

Las anomalías del NDVI posibilitaron detectar y cuantificar las áreas de mayor estabilidad y productividad de la provincia, estas se relacionaron con la distribución espacial del bosque Chaqueño denso y con el bosque Chaqueño Serrano denso. Las coberturas vegetales nativas, especialmente el bosque nativo denso, responden de manera estable ante adversidades climáticas, como sequías, debido a su elevada biodiversidad y a las estratégicas adaptaciones, morfológicas y fisiológicas, para el uso eficiente del agua.

Las anomalías del NDVI posibilitaron detectar y cuantificar las áreas de mayor

inestabilidad de origen geomorfológico y antrópico de la provincia, se destaca que las áreas desmontadas por el hombre con fines agrícolas responden de manera normal ante la disponibilidad de humedad edáfica del periodo húmedo y son severamente afectadas en el periodo seco. La importancia de la cobertura vegetal nativa se observa claramente el área de riego del río Dulce (CA-SDE) que aún ante la disponibilidad de agua todo el año solamente 193 km² de su superficie tuvo AP en el periodo seco y se relacionaron con fragmentos de bosque nativo residual.

La gran sensibilidad del NDVI derivado del sensor VEGETATION SPOT4/5, lo convierte en una invaluable herramienta para el monitoreo de la dinámica espacial de adversidades climáticas extremas como sequías, esto se debe a que la provincia no dispone del número adecuado de estaciones meteorológicas para toda su extensión.

Las imágenes derivadas del sensor LANDSAT-5 TM, las regiones geomorfológicas, usos y procesos de la tierra y las regiones naturales de la provincia posibilitaron asociar y explicar la distribución espacial de las anomalías del NDVI con la distribución espacial de las coberturas vegetales y determinar su respuesta ante variaciones climáticas extremas como sequías y excesos de humedad.

Las regiones geomorfológicas no se relacionan entre sí entre periodos, por cuanto, cada una de ellas, le imprimen a la región características particulares a escala de paisaje. A su vez, la dinámica de cada región en si misma fue afectada moderadamente de un periodo a otro.

Referencias

Tabla 2. Matriz de correlación de Pearson entre el NDVI de las regiones geomorfológicas de Santiago del Estero en el periodo húmedo y seco. Las relaciones significativas ($p < 0,05$) entre regiones se marcaron con negrita.

| BSPH | 0.85 | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------|-------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|------------------|----------------|-------------|---------------|--------------|-------------|-------------|--|--|
| BSSH | p=.000 | | | | | | | | | | | | | | |
| CA-RSALH | .2521 | .1073 | 0.75 | | | | | | | | | | | | |
| CA-SDEH | .0676 | .0187 | .1052 | 0.89 | | | | | | | | | | | |
| DA-GRH | -.1890 | .0118 | -.3063 | .1081 | 0.79 | | | | | | | | | | |
| DA-SALH | .0562 | -.0599 | -.1605 | .0001 | .1250 | 0.68 | | | | | | | | | |
| DA-SFEH | -.0266 | .0610 | -.0485 | .0541 | -.1089 | .0488 | 0.84 | | | | | | | | |
| LLA-RDU-LH | .0551 | .1039 | -.0199 | .2568 | -.2070 | -.0410 | -.0604 | 0.89 | | | | | | | |
| LLA-RSA-LH | .1559 | -.1463 | -.1005 | .0905 | .0230 | -.1443 | .1900 | .1434 | 0.72 | | | | | | |
| LSH | .2562 | .0210 | -.0185 | -.0206 | -.0724 | -.1676 | -.0376 | -.1844 | .0217 | 0.64 | | | | | |
| SGH | -.2519 | -.0643 | .0072 | -.1490 | .1147 | .0592 | .0970 | -.0984 | -.1107 | .0857 | 0.93 | | | | |
| S-HUYH | .1633 | -.2055 | .1433 | .0016 | -.3027 | .0011 | -.1287 | -.0339 | -.1320 | .0683 | .0508 | 0.91 | | | |
| S-SAHH | .0223 | .0287 | -.1565 | -.1572 | -.0743 | .0177 | -.0722 | .0717 | .0498 | -.0003 | -.0469 | -.0171 | 0.90 | | |
| | BSPS | BSSS | CA-RSALS | CA-SDES | DA-GRS | DA-SALS | LLA-RDULS | LLA-LSS | SGS | S-HUYS | S-SAS | | | | |

ANGUEIRA, C.; PRIETO, D.; LOPEZ, J.; BARRAZA, G. Geomorfología. En: **Sistemas de Información Geográfica de Santiago del Estero**, CD ROM, Instituto de Tecnología Agropecuaria, EEA Santiago del Estero, 2007. ISBN – 987-521-170-2.

ANYAMBA, A; EASTMAN, J. R. Interannual variability of NDVI over Africa and its relation to El Niño/Southern Oscillation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n.13, p. 2533-2548, 1996.

ANYAMBA, A.; TUCKER, J. C.; EASTMAN, J. R. NDVI anomaly patterns over Africa during the 1997/98 ENSO warm event. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 10, p. 1847-1859, 2001.

ANYAMBA, A.; TUCKER, J. C.; MAHONEY, R. From El Niño to La Niña: Vegetation Response Patterns over East and Southern Africa during the 1997–2000 Period. **Journal of Climate**, v. 15, p. 3096-3103, 2002.

BUDDE, E.; TAPPAN, G.; ROWLAND, J.; LEWIS, J.; TIESZEN, L. L. Assessing land cover performance in Senegal, West Africa using 1-km integrated NDVI and local variance analysis, **Journal of Arid Environments**, v. 59, p. 48-498, 2004.

CABRERA, L. A. **Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería**. 2^a Ed. Tomo II, Editorial ACME S.A.C.I., Buenos Aires, Argentina, 1976. 85 p.

EASTMAN, J. R.; MCKENDRY, J. E.; FULK, M. A. **Change and times series analysis. Explorations in Geographic Information Systems Technology**. UNITAR Second Edition, Palais des Nations, Geneva, Suiza, 1995. 116p.

FITZPATRICK-LINS, K. Comparison of Sampling Procedures and Data Analysis for a Land use land-cover map. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 343-351, Bethesda, 1981.

GUTMAN, G.; IGNATOV, A.; OLSON, S. Global monitoring using AVHRR time series. **Advances in Space Research**, v. 17, n.1, p. 51-54, 1996.

JENSEN, R. J. **Introductory Digital Image Processing**. A Remote Sensing Perspective. Pentice Hall, 2 Ed., New Jersey, USA, 1996. 416 p.

JI, L.; PETERS, A. J. Assessing vegetation response to drought in the northern great plains using vegetation and drought indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 1, p. 85-98, 2003.

KARNIELI, A.; GABAI, A.; ICHOKU, C.; ZAADY, E.; SHACHAK, M. Temporal dynamics of soil and vegetation spectral responses in a semi-arid environment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 3, n.19, p. 4073-4087, 2002.

LASAPONARA, R. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series,

Ecological Modelling, v. 194, n. 4, p. 429-434, 2006.

LEE, J.; WONG, D. W. **Statistical Analysis with ArcView GIS**. John Wiley & Sons, INC. New York, USA, 2001. 192 p.

Li, J.; Lewis, J.; Rowland, J.; Tappan, G.; Tieszen, L. L. Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. **Journal of Arid Environments**, v. 59, n. 3, p. 463-480, 2004.

MINETTI, L. J. 2008. **Tendencia regional de sequías del Noroeste Argentino**. Disponible en: <http://www.labclisud.com.ar/Portada_indice.asp>. Acceso: 20 dez. 2008.

NICHOLSON, S. E.; DAVENPORT, L. M.; MALO, A. R. A comparison of the vegetation response to rainfall in the Shael and East Africa, using Normalized Difference Vegetation Index from NOAA AVHRR. **Climatic Change**, v. 17, ns. 2, 3, p. 209-241, 1990.

PASSOT, X. **Vegetation Image processing method in the CTIV**. In: **VEGETATION 2000 PROCEEDINGS**. Ed. Gilbert Saint, VEGETATION programme Scientist; Centre National Détudes Spatiales. Lake Maggiore, p. 15-22, Italy, 2000.

PETERS, A. J.; EVE, M. D. Satellite monitoring of desert plant community response to moisture availability. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 37, ns. 1-3, p. 273-287, 1995.

RAGONESE, A. E.; CASTIGLIONI, J. C. La vegetación de la Republica Argentina. La Vegetación del Parque Chaqueño, **Serie fitogeográfica INTA**, v. 11, n.12, p.133-160, 1968.

RAVELO, A. C.; ROTONDO, V. H. Variabilidad de sequías en regiones semiáridas y húmedas. En: **Primeras jornadas nacionales de zonas áridas y semiáridas**. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, 1987. 415 p.

RAY, T. W. **Remote Monitoring of Land Degradation in Arid/Semiarid Regions**. 1995. 415f. Thesis (Doctor of Phillosophy)- Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of tecnology, Pasadena, California, 1995.

RENOLFI, R. F. Vegetación del chaco Santiagueño. En: **Desmonte y Habilitación de Tierras en Zonas Semiáridas**. Taller internacional, Red de cooperación técnica en uso de recursos naturales en la región chaqueña semiárida, Santiago del Estero, Argentina, 1986, p. 55-65.

SECRETARIA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA NACIÓN ARGENTINA - SAyDS. Inventário Nacional de Bosques Nativos y Sistema Nacional de Evaluación Florestal. Serviço especial para la empresa Aeroterma S.A., Buenos Aires, 2004. (aprobado por el consejo de Assistencia Técnica CAT-UNSE).

TORRES BRUCHMANN, E. **Climatología General y Agrícola de la Provincia de**

Santiago del Estero. Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, 1981. 199p.

TUCKER, J. C. Red and Photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation,. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

TUCKER, J. C.; CHOUDHURY, J. B. Satellite remote sensing of drought conditions. **Remote Sensing of Environment**, v. 23, n. 2, p. 243-251, 1987.

VOLCANI, A.; KARNIELI, A.; SVORAY, T. The use of remote sensing and GIS for spatio-temporal analysis of the physiological state of a semi-arid forest with respect to drought years. **Forest Ecology and Management**, v. 215, ns. 1 - 3, p. 239-250, 2005.

WANG, J.; PRICE, K. P.; RICH, P. M. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n.18, p. 3827-3844, 2001.

WANG, J.; PRICE, K. P.; RICH, P. M. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 11, p. 2345-2364, 2003.

WEIER, J.; HERRING, D. **Measuring Vegetation (NDVI & EVI), earth observatory, NASA.** 2007. Disponible en: http://earthobservatory.nasa.gov/Library/Measuring_Vegetation/printall.php. Acesso en: 24 fev. 2010.

WEISS, J., L.; GUTZLER, D., S.; ALLERD COONROD, J., E.; DAHM, C.; N. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. **Journal of Arid Environments**, v. 58 n. 2, p. 249–272, 2004.

ZERDA, H. R. Percepción remota y SIG en la planificación y la gestión ambiental. En: **Santiago del Estero:** una mirada ambiental. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina, 2005. p. 453.

_____.; MOREIRA, M. L. **Monitoreo ambiental: investigación sobre los incendios de bosques y el avance de las fronteras agropecuarias en Santiago del Estero.** Informe final de proyecto de investigación 2000-1, Universidad Católica de Santiago del Estero. 2001. Inédito, 63 p, mapas y anexos.

_____. **Monitoreo ambiental. Informe final de proyecto de investigación 2002-3,** Universidad Católica de Santiago del Estero. 2004. Inédito, 64 págs., mapas y anexos.

_____. **Subregiones Naturales de Santiago del Estero.** En: condiciones Naturales, Atlas Geográfico de Santiago del Estero. Colucci et al. (2006). Atlas geográfico de la provincia de Santiago del Estero. Ed. Universidad Católica de Santiago del Estero. 2006. CD - ROM. ISBN 950-31-0065-8.