

Variabilidad fenológica del bosque y del pastizal nativo en el Chaco Semiárido de la Provincia de Santiago del Estero, Argentina

Phenological variability of forest and native pastures in the Semiarid Chaco of the Santiago del Estero Province

Jose Luis Tiedemann¹(*)

Hugo Raul Zerda²

Mariano Grilli³

Andrés Carlos Ravelo⁴

Resumen

Los parámetros estacionales del bosque y pastizal nativo del Chaco semiárido de Santiago del Estero fueron extractados a partir de series temporales del índice de vegetación NDVI derivadas del satélite SPOT VEGETATION, mediante el programa TIMESAT. El inicio y el fin de las estaciones de crecimiento del bosque en el período seco, presentaron un mínimo desplazamiento con respecto a las estaciones de crecimiento del período húmedo. Este desplazamiento estaría relacionado con la respuesta de las especies que conforman el estrato inferior y medio del bosque ante la variación de las precipitaciones entre períodos. El inicio y fin de las estaciones de crecimiento del pastizal nativo no presentaron variaciones temporales entre períodos. Esta respuesta estaría relacionada con la gran adaptación de esta cobertura a las adversidades climáticas extremas como las sequías. Los puntos medios y el NDVI máximo de las estaciones de crecimiento del bosque y del pastizal nativo, coinciden temporalmente con el otoño, esta respuesta estaría relacionada con una mayor efectividad de las precipitaciones, y con una menor evapotranspiración y temperatura. La producción total integrada y

1 Ing. Zoot.; M. Sc.; Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales; Dirección: Avenida Belgrano (sur) 1912, G4200ABT, Santiago del Estero Capital, Argentina; E-mail: mann@unse.edu.ar
(*) Autor para la correspondencia.

2 Dr. en Cs. Forestales; Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero; Dirección: Avenida Belgrano (sur) 1912, (CP 4200), Capital, Santiago del Estero, Argentina, Tel: 0385-509550/ fax: 543854509555; 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

la productividad estacionalmente activa de las estaciones de crecimiento del bosque y del pastizal nativo, no fueron afectadas por el período. La estabilidad del bosque estaría relacionada con su biodiversidad, con su estructura estratificada, y por las especies leñosas de porte y raíces profundas que lo conforman; mientras que la estabilidad del pastizal nativo estaría relacionada con sus estratégicas adaptaciones, morfológicas, fisiológicas y de comportamiento para el uso eficiente del agua.

Palabras clave: NDVI; SPOT VEGETATION; TIMESAT; bosque; pastizal nativo; fenología vegetal.

Abstract

The seasonal parameters of the forest and native pasture of the semi-arid Chaco of Santiago del Estero were abstracted from temporary series of the vegetation index NDVI derived from satellite SPOT VEGETATION using the software TIMESAT. The beginning and ending of the growing season of the forest in the dry period, presented/displayed a minimum displacement with respect to the growing season of the humid period. This displacement would be related to the answer of the species conformed the lower and mid layer of the forest to the precipitation variability between periods. The beginning and ending of the growing season of the native pasture did not present temporary variations between periods. This response could be related to the great adaptation of this cover to extreme climatic adversities like droughts. The average and the maximum NDVI of the growing season for the forest and the native pasture, agreed temporarily during the autumn season. This response could be related to greater precipitation efficiency, and to a lower evapotranspiration and temperature. The total production integrated and the productivity seasonal active during the growing season of the forest and the native pasture were not affected between periods. The stability of the forest could be related to its high biodiversity, its stratified structure, and by the ligneous species with deep roots whereas the stability of the native pasture could be related to its strategic adaptations in morphology and physiology and the efficient water use.

Key words: NDVI; VEGETATION SPOT; TIMESAT; forest; grassland native; plant phenology.

Introducción

La Fenología estudia los eventos periódicos que ocurren durante el ciclo de vida de las plantas, tales como la brotación de hojas, la floración, el fructificación y la senescencia de hojas. La variabilidad de dichos eventos

se encuentran fuertemente influenciados por la precipitación y la temperatura (REED et al., 1994; CLELAND et al., 2007), por la composición de especies, estratificación y topografía (FISHER et al., 2006), por los cambios en las coberturas de la tierra (HEUMANN et al., 2007), por el cambio

climático global (CLELAND et al., 2007) y el incremento de la temperatura global (LINDERHOLM, 2006).

En las últimas décadas, los sensores remotos fueron utilizados para observar los cambios fenológicos de la vegetación (CLELAND et al., 2007) y proveyeron una manera eficiente para realizar el monitoreo de cambios en la vegetación en diferentes escalas espaciales (KANG et al., 2003). La disponibilidad de series temporales de datos derivados de satélites como el NOAA y SPOT VEGETATION, con resolución temporal diaria y moderada resolución espacial de 1 km² por pixel, fueron claves para el desarrollo de estudios fenológicos sobre grandes extensiones. Las series temporales posibilitaron la determinación de las fases de crecimiento activo de la vegetación (REED et al., 2003) a escalas globales, continentales y regionales (KANG et al., 2003; CHEN et al., 2004; CLELAND et al., 2007).

Los eventos fenológicos específicos, como la floración y la fructificación, no pueden detectarse a través de sensores remotos y solo pueden detectarse fases fenológicas generales análogas como el comienzo, fin y longitud de la estación de crecimiento (REED et al., 2003). Reed et al. (1994) a partir de series temporales del índice NDVI de bosques y pasturas en E.E.U.U., derivaron parámetros fenológicos generales como son: el comienzo de actividad vegetativa, pico máximo de NDVI, tasa de crecimiento, tasa de senescencia, fin de actividad vegetativa y tiempo integrado del NDVI. White et al. (1997) desarrollaron modelos fenológicos predictivos de ecosistemas específicos para ser aplicados a escala continental mientras que Heumann et al. (2007) estimaron los cambios en la fenología de la vegetación de las regiones de Sahel, Sudán y Guinea,

a partir de series temporales de NDVI. Se determinaron significativas tendencias positivas en la longitud y en el fin de las estaciones de crecimientos de Sudan y Guinea, y sin tendencias positivas en el Sahel. Chen et al. (2000) mediante umbrales de frecuencias fenológicas acumulativas y su correspondiente actividad vegetativa, examinaron las relaciones estacionales entre los estados fenológicos de comunidades vegetales y el NDVI a escala regional en China. El NDVI es el índice de vegetación estándar para estudios fenológicos, principalmente por su disponibilidad y su aplicabilidad a estudios de la vegetación (REED et al., 2003). El objetivo de este trabajo fue: determinar los parámetros estacionales y productivos del bosque y pastizal nativo del Chaco Semiárido de Santiago del Estero y su respuesta ante la variación en los patrones de precipitación en el período 1998-2008.

Materiales y métodos

La Provincia de Santiago del Estero se localiza entre 25° 40' y 30° 30' de latitud Sur y entre 61° 40' y 65° 10' de longitud Oeste (Figura 1) y posee una superficie de 145.758 km² (TORRES BRUCHMAN, 1981).

El tipo climático es semiárido BShw según la clasificación climática de Köppen, la evapotranspiración anual oscila entre los 900-1.100 mm, con déficit hídrico todo el año. La temperatura media anual histórica es de 27,7 °C (Torres Bruchman, 1981). De acuerdo a PROHASKA (1959) la Provincia de Santiago del Estero se encuentra en el lugar más cálido de América del Sur, en donde se producen máximas absolutas de 47 °C. La precipitación es de 550 mm (Torres Bruchman, 1981). Minetti (2009) determinó mediante el índice tendencias regionales de

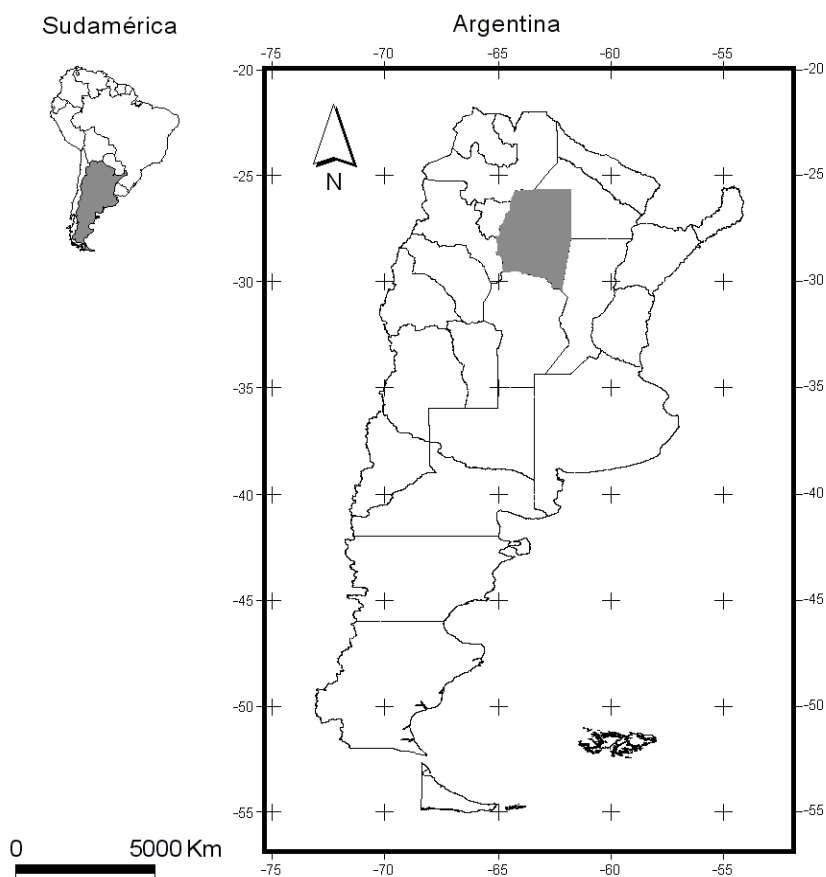


Figura. 1. Ubicación del área de estudio, la Provincia de Santiago del Estero, Argentina

sequías que esta región tuvo un período húmedo (PH) entre los años 1998 y 2003 y un período seco (PS) entre los años 2004 y 2008. El ENSO es ampliamente reconocido como un indicador clave de variabilidad climática interanual a escala global. De acuerdo a Foreign Agricultural Service (FAS) (2009) el área en estudio durante el período analizado estuvo fuertemente influenciada por él o por su fase fría (La Niña). Según Anyamba et al., (2002) la transición entre estas fases es generalmente inversa.

El bosque Chaqueño occidental, xerofítico y abierto, es considerado la vegetación *clímax* de la región (Secretaría

de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación - SAyDS, 2004). De acuerdo a SAyDS (2007), el bosque Chaqueño occidental está estructuralmente conformado por cuatro estratos bien definidos: el estrato superior conformado por especies como el quebracho colorado Santiagueño (*Schinopsis lorentzii*) y el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*), el estrato medio conformado por los géneros *Zizyphus*, *Cercidium*, *Celtis*, *Acanthosyris*, *Jordania*, *Caesalpineia*; *Prosopis*, *Mimozyanthus*, *Geoffroea*, *Cercidium*, *Caesalpineia*, el estrato arbustivo, conformado por los géneros *Acacia*, *Mimosa*, *Geoffroea*, *Prosopis*, *Atamisquea*,

entre otras, y finalmente el estrato herbáceo conformado por gramíneas del género *Setaria* sp, *Gouinia* sp, *Digitaria* sp, *Eragrostis* sp, *Gymnopogon* sp, *Panicum* sp, *Heteropogon* sp, *Trichloris* sp, *Chloris* sp, y dicotiledóneas del género *Ruellia* sp, *Justicia* sp, *Holocheilus* sp, *Trixis papillosa*, *Hyptis* sp, entre otras.

De todas las unidades de vegetación Chaqueña, el pastizal nativo es la que presenta la estructura más simple. Su origen puede ser edáfico, pirógeno natural o por deforestación. Posee un estrato herbáceo dominante con predominio de gramíneas (RENOLFI, 1992). En los pastizales nativos de origen edáfico la gramínea típica es el aibe (*Elionurus muticus*) y otros géneros asociados como *Bothriochloa*, *Schizachyrium*, *Heteripogon*, *Aristidas*, *Pappophorum*, *Eragrostis*, *Chloris*, *Paspalum*. En los pastizales de origen pirógeno o de deforestación los géneros dominantes son *Trichloris*, *Setaria*, *Digitaria*, *Pappophorum*, *Chloris*, las leguminosas presentes en el pastizales nativos corresponden a los géneros, *Calactia*, *Rhynchosia*, *Adesmia*, *Stylosanthes*, *Desmodium*, *Cassia*, *Desmanthus*, *Neptunia*, *Indigofera*, *Macroptilum*, *Crotalaria*, *Zornia*, *Poiretria*, entre otras (RENOLFI, 1992; SAyDS, 2007).

Para determinar los parámetros estacionales del bosque y del pastizal nativo se utilizó la serie temporal de NDVI 1998-2008, derivados del sensor VEGETATION a bordo de la plataforma SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*) desarrollado por el Flemish Institute for *Technological Development*, perteneciente al *Global Vegetation Monitoring Project* (<http://free.vgt.vito.be/>). La resolución radiométrica del sensor VEGETATION es de ocho bits, su resolución espacial es de 1 km² por píxel, su resolución temporal fue compuesta cada

diez días en base al criterio NDVI Máximo Valor Compuesto al límite de la atmósfera, la resolución geométrica es de 1,15 km in nadir, y el ancho de cobertura es de 2250 km, con una superposición de píxeles inferior a 0,5 km (PASSOT, 2000).

Debido la sequía regional imperante (MINETTI, 2009; FAS, 2009), la serie temporal de NDVI fue dividida en dos períodos: a) la serie temporal del período húmedo (PH) fue conformada por 154 mapas de NDVI S10, su resolución temporal se extiende desde el 01/06/1998 hasta el 01/09/2004 y contiene seis estaciones unimodales de crecimiento conformadas por los años: 98-99; 99-00; 00-01; 01-02; 02-03; 03-04 y b) la serie temporal del período seco (PS), conformada por 125 mapas de NDVI S10, su resolución temporal se extiende desde el 21/05/2004 hasta el 21/11/2008 y contiene cuatro estaciones unimodales de crecimiento conformadas por los años: 04-05; 05-06; 06-07; 07-08.

Con el fin de captar específicamente, los parámetros fenológicos del bosque chaqueño semiárido y pastizal nativo se delimitaron áreas de muestreo que presentaran dos características principales: a) que la superficie de cada área de muestreo estuviera totalmente cubiertas por bosque o pastizal nativo, y b) que cada área seleccionada mantuviera la totalidad de la superficie cubierta con bosque o pastizal durante todo el período analizado 1998-2008. En base a lo antes expuesto se delimitó un área de 40 km² de bosque chaqueño semiárido (Figura 2 B) y un área de 24 km² de pastizal nativo (Figura 2 A).

Con el objeto de extraer las variaciones representativas del cambio fenológico del bosque y del pastizal nativo se utilizó el programa TIMESAT. Este programa fue desarrollado exclusivamente para suavizar

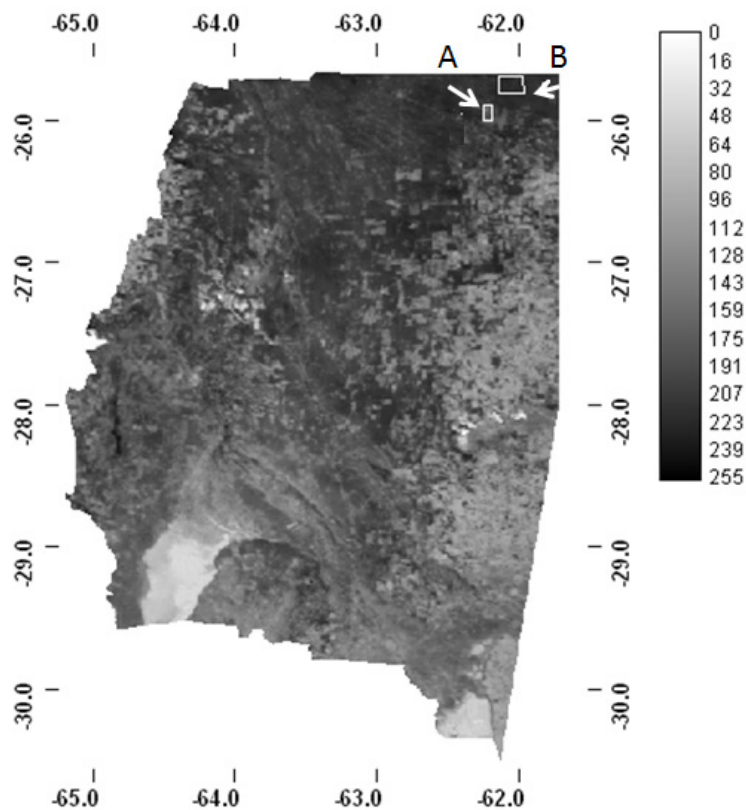


Figura 2. Mapa de NDVIVEGETATION-SPOT (escala 8 bits) de la Provincia de Santiago del Estero. Áreas de muestreo: A) pastizal nativo, B) bosque chaqueño semiárido

y extraer parámetros fenológicos de series temporales derivadas de sensores remotos (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004). TIMESAT permite implementar un método basado en el ajuste por mínimos cuadrados, denominado promedio móvil ponderado o filtro de Savitzky-Golay (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004). El filtro de Savitzky-Golay es simple y robusto, y fue ampliamente utilizado por su elevada eficiencia en la reducción de contaminación y ruido global en series temporales de NDVI (SAVITZKY; GOLAY, 1964, citado por CHEN et al., 2004; HIRD y MCDERMID, 2009).

Los parámetros operativos utilizados en TIMESAT para determinar los parámetros estacionales del bosque y del pastizal nativo fueron: número de estaciones 0,5; N° interacciones 3; fuerza de adaptación 2; método generador de parámetros estacionales filtro de Savitzky-Golay; window Savitzky-Golay 2.4.4; umbral 20%.

Los parámetros estacionales a extraer son los siguientes: Inicio (a): se considera el inicio de la estación de crecimiento al punto en el tiempo de la función de ajuste que ha incrementado su valor en un 20%, con respecto a la distancia que existe entre el punto

mínimo izquierdo y el punto máximo de la curva ajustada (JÖNSSON; EKLUNDH, 2006). Los umbrales utilizados usualmente oscilan entre el 5% y 20%. Estos tienen una elevada variabilidad espacial por influencia del clima local (KANG et al., 2003) como la temperatura del suelo y radiación diaria (WHITE et al., 1997). Chen et al., (2000) utilizó el umbral arbitrario del 5% para explorar las relaciones entre fenología de las plantas y mediciones de verde derivados de satélite en China. Jönsson y Eklundh, (2002; 2004) utilizaron el umbral del 10% para extraer parámetros estacionales a partir de series temporales de NDVI. En nuestro caso adoptamos el umbral del 20%, como una variación aceptable del valor de NDVI para el tiempo t , (JÖNSSON y EKLUNDH, 2006, DELBART et al., 2006; HEUMANN et al., 2007). Fin (b): el fin de la estación de crecimiento es el punto mínimo derecho de la curva de ajuste y se define de manera similar que el punto mínimo izquierdo o comienzo de la estación de crecimiento. Punto medio (e): el punto medio (PM) de la estación de crecimiento es el punto en el tiempo de la función de ajuste que se encuentra en el medio de los puntos temporales izquierdo y derecho de la función de ajuste que han incrementado en un 90% con respecto al mínimo derecho e izquierdo respectivamente. Longitud (g): la longitud de la estación de crecimiento es la diferencia en tiempo existente entre último y primer mapa de NDVI S10 incluidos entre los puntos a y b. Amplitud: la amplitud de la estación de crecimiento es la diferencia entre el valor del NDVI máximo (e) y la base. Base: la base de la estación de crecimiento es la media entre el NDVI mínimo izquierdo (a) y el NDVI mínimo derecho (b). Primer integral (h): es la superficie comprendida entre la función de ajuste y el nivel medio

de los mínimos izquierdo (a) y derecho (b). Esta integral representa la productividad integrada de la vegetación fotosintéticamente activa (PVFA) en la estación de crecimiento del bosque y del pastizal. Mediante la prueba de T para muestras independientes se realizó la comparación de medias (esperanzas) de la PVFA de las estaciones de crecimientos del bosque y del pastizal (distribuciones), utilizado el PH y PS como criterio clasificatorio. La PVFA de todas las estaciones de crecimientos del bosque y del pastizal, fueron comparadas de forma simultánea (INFOSTAT, 2004). Segunda integral (i): es la superficie comprendida entre la función de ajuste y el nivel cero, representando la producción total integrada (PTI) del bosque y pastizal. La comparación de medias (esperanzas) de la PTI de las estaciones de crecimiento del bosque y del pastizal se realizaron mediante la prueba de T para muestras independientes en forma simultánea (INFOSTAT, 2004). Los parámetros estacionales del bosque y pastizal nativo, extraídos de las estaciones de crecimiento del período húmedo y en el período seco fueron promediados.

Resultados y discusión

De acuerdo a Bradley et al. (2007) la temperatura global se ha incrementado en 0,6 °C en los últimos 30 años, y fue relacionada con cambios en número de heladas, en el fotoperíodo, y en los grados totales de crecimiento. Linderholm (2006) señala que el calentamiento global produjo cambios en la longitud de las estaciones de crecimiento. Por otra parte, Linderholm (2006) y Bradley et al. (2007) muestran que en ecosistemas como los del área en estudio la fenología de la vegetación podría ser más afectada por la precipitación y la

evapotranspiración que por la temperaturas y foto período. Adicionalmente, en áreas donde los patrones de precipitación son fuertemente influenciados por El Niño/La Niña debido al cambio climático global, es esperable que la frecuencia e intensidad del evento El Niño/La Niña en esas áreas se incremente (CLELAND et al., 2007).

Durante el PH, el inicio de la estación de crecimiento del bosque (Tabla 1) fue el 1 de octubre con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 10 días, el pico máximo fue el 1 de mayo, con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 30 días y el fin de las estaciones de crecimiento fue el 1 de agosto con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 20 días (Tabla 1). Durante el PS el inicio de las estaciones de crecimiento del bosque (Tabla 1) fue el 21 de octubre, con

una variación entre estaciones de crecimiento de ± 10 días, el pico máximo fue el 11 de marzo, con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 30 días y el fin de las estaciones de crecimiento fue el 21 de agosto (Tabla 1). La fecha de inicio y fin media de las estaciones de crecimiento del bosque del PS tuvo un desplazamiento de 20 días con respecto a las estaciones de crecimiento del PH, sin embargo, la longitud de las estaciones de crecimiento fueron similares en ambos períodos; todas las estaciones de crecimiento del bosque tuvieron una variación mínima en cuanto a su fecha de ocurrencia (± 10 y 20 días). En ambiente y vegetación totalmente diferente, Delbart et al. (2005) determinaron variaciones de ± 15 días en el inicio de las estaciones de crecimiento en Siberia central mediante NDWI derivado de

Tabla 1. Parámetros estacionales medios del bosque Chaqueño semiárido y del pastizal nativo en el período húmedo (PH) y seco (PS); EC= Estaciones de crecimiento, a) inicio de las EC, e) PM= punto medio de EC, b) fin de las EC, e) NDVI máximo, f) Amplitud, i) Producción total integrada h) Productividad de la vegetación estacionalmente activa y DS = desvío estándar

Cobertura	EC	Inicio (a)	PM (e)	Fin (b)	NDVI Máx. (e)	DS NDVI Máx.	DS Base	DS Base	Ampl (f)	DS Ampl	PTI (i)	PVEA. (h)
Bosque Chaqueño	98-04 PH	01 Oct ± 10 días	01 May ± 30 días	01 Ago ± 20 días	232	± 9	173	± 13	59	± 10	4594	902
Bosque Chaqueño	04-08 PS	21 Oct ± 10 días	11 Mar ± 30 días	21 Ago	234	± 13	165	± 10	69	± 10	4945	1107
Pastizal Nativo	98-04 PH	11 Oct ± 20 días	21 Mar ± 30 días	01 Ago ± 20 días	222	± 10	124	± 15	98	± 18	3682	1299
Pastizal Nativo	04-08 PS	11 Oct ± 20 días	01 Mar ± 20 días	01 Ago ± 20 días	222	± 11	120	± 8	102	± 13	4149	1521

VEGETATION SPOT. De acuerdo Bradley et al. (2007) el inicio y fin de las estaciones de crecimiento son fuertemente afectados, en corto término, por fluctuaciones en las precipitaciones. El mínimo desplazamiento del inicio y fin de las estaciones de crecimiento del PS del bosque estaría fuertemente relacionado con la diversidad de especies que conforman el estrato inferior y medio de esta cobertura, estos estratos responden de manera diferenciada ante la disponibilidad o no de humedad (WANG et al., 2003). De acuerdo a Doktor et al. (2009) la diferencia temporal en la respuesta del verde del estrato inferior con respecto al estrato superior es generalmente de dos semanas.

Durante el PH, el inicio de las estaciones de crecimiento del pastizal nativo (Tabla 1) fue el 11 de octubre, con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 20 días, el pico máximo de verde fue el 21 de marzo, con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 30 días. El fin de las estaciones de crecimiento del pastizal nativo fue el 01 de agosto con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 20 días. Durante el PS el inicio de las estaciones de crecimiento (Tabla 1) fue el 11 de octubre, con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 20 días, el pico máximo fue el 01 de marzo, con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 20 días y el fin de las estaciones de crecimiento fue el 01 de agosto con una variación entre estaciones de crecimiento de ± 20 días (Tabla 1). La fecha de ocurrencia media del inicio y fin de las estaciones de crecimiento del pastizal nativo fue similar en ambos períodos, todas las estaciones de crecimiento tuvieron una mínima variación temporal (± 20 días), esta respuesta estaría relacionada con la gran adaptación del pastizal nativo a las

variaciones climáticas extremas (WANG et al., 2003).

Delbart et al. (2006) determinaron variaciones de ± 19 días en el inicio de las estaciones de crecimiento en el período 1982-2004 a partir de NDVI y NDWI derivados de AVHRR-NOAA y VEGETATION SPOT, en ecosistemas del norte de Eurasia. La variación en las fechas de ocurrencia del inicio y fin de las estaciones de crecimiento del bosque y pastizal podría considerarse como mínimas, sobre todo si comparamos resultados obtenidos por Chen et al. (2000), quienes al explorar las relaciones entre fenología de las plantas y mediciones de NDVI derivado de satélite de tres sitios con diferencias en clima y vegetación, determinaron que la longitud de las estaciones de crecimiento variaron de 188 días en el norte y de 259 días en el sur del área en estudio.

Es importante destacar que el proceso de síntesis NDVI, diez días máximo valor compuesto incide sobre las fechas de ocurrencia del inicio y fin de las estaciones de crecimiento del bosque y pastizal. En este sentido, Brown y De Beurs (2008) vieron significativamente disminuida la determinación del inicio de las estaciones de crecimiento de cultivos anuales en el oeste de África, en el proceso de síntesis de NDVI diez días máximo valor compuesto del sensor VEGETATION SPOT, por la elevada contaminación residual de nubes.

Durante el PH, las estaciones de crecimiento del bosque y del pastizal nativo tuvieron una base media mayor que las estaciones de crecimiento del PS (Tabla 1). Esta respuesta estaría relacionada con la respuesta de la vegetación ante la disponibilidad de humedad, de acuerdo a Wang et al. (2001) y Li et al. (2004) cuando el agua en el suelo no es un factor limitante,

la vegetación es menos dependiente de las precipitaciones. Los valores de la base dependen de los valores alcanzados por el NDVI mínimo de inicio y fin de la estación de crecimiento (JÖNSSON y EKLUNDH, 2004; HEUMANN et al., 2007). Al no ser limitante la disponibilidad de humedad, la pendiente media de la curva de crecimiento de NDVI estacional de ambas coberturas sería menor, por cuanto, el NDVI mínimo de inicio y fin alcanzado, al umbral del 20%, sería mayor y por ende su promedio con respecto a los valores alcanzados en el período seco.

En el PH, la amplitud media de las estaciones de crecimiento del bosque y del pastizal nativo fue menor que las estaciones de crecimiento del PS. De acuerdo a Jönsson y Eklundh (2004) y Heumann et al. (2007) la amplitud de las estaciones de crecimiento depende de los valores alcanzados por la base y el NDVI máximo. Debido a que el NDVI máximo del bosque y del pastizal nativo, fue similar en ambos períodos, la amplitud media fue directamente influenciada por la base media.

La producción total integrada media y la productividad de la vegetación estacionalmente activa media del bosque y del pastizal nativo, no tuvieron diferencias significativas ($p > 0,05$) en entre períodos. Las coberturas vegetales nativas responden de manera estable ante adversidades climáticas extremas como sequías (efecto *buffer*) (WANG et al., 2003). El bosque por su biodiversidad, estructura estratificada, por la presencia de especies leñosas de porte y raíces profunda (WANG et al., 2003). El pastizal nativo por sus estratégicas adaptaciones, morfológicas, fisiológicas y de comportamiento para el uso eficiente del agua (RAY, 1995; KARNIELI et al., 2002; WANG et al., 2003).

Heumann et al. (2007) al analizar los cambios producidos en la fenología de la vegetación en el Sahel, Sudán y Guinea a partir de series temporales de NDVI mediante TIMESAT, determinaron, que los incrementos en la producción integrada del NDVI en Sahel (zonas con menor disponibilidad de humedad) se correspondían con incrementos en la amplitud de las estaciones de crecimiento. Mientras que en Sudán y Guinea (zonas con mayor disponibilidad de humedad) la producción integrada del NDVI se correspondía con incrementos en la longitud y decrementos en la amplitud de las estaciones. En este trabajo, durante el PH, las estaciones de crecimiento del bosque y pastizal nativo, tuvieron una base media mayor y una amplitud media menor; mientras que en el PS las estaciones de crecimiento tuvieron una base media menor y una amplitud media mayor. Se destaca, que la longitud de las estaciones de crecimientos del bosque y el pastizal nativo, fue similar entre períodos, por cuanto, este parámetro, podría estar relacionado con la similar productividad de ambas coberturas entre períodos. En este sentido, Cleland et al. (2007) determinaron que, la longitud de las estaciones de crecimiento, incide fuertemente en la productividad del ecosistema.

La fecha de ocurrencia de los PM y NDVI máximo del bosque y del pastizal nativo coincide con la estación climática del otoño, en ambos períodos. Esta respuesta, estaría fuertemente relacionada con la mayor efectividad de las precipitaciones de otoño, con la menor temperatura y evapotranspiración de esa estación climática. De acuerdo a Torres Bruchmann (1981) en Santiago del Estero, las precipitaciones de otoño tienen un porcentaje de efectividad del 94,4%.

Conclusiones

La serie temporal de NDVI derivada del sensor VEGETATION SPOT y el programa TIMESAT posibilitaron extraer los parámetros estacionales del bosque y pastizal nativo de la Provincia Santiago del Estero, Argentina, en el periodo 1998-2008.

No todos los parámetros estacionales de las coberturas bosque y pastizal del Chaco semiárido fueron afectados por la variación de los patrones de precipitación entre períodos.

Los parámetros estacionales del bosque con variación entre períodos fueron: el inicio, el fin, la base y la amplitud. Los parámetros estacionales del pastizal nativo con variación entre períodos fueron: la base y la amplitud.

Los parámetros estacionales del bosque y pastizal nativo sin variación entre períodos fueron: la longitud, el NDVI máximo, la producción total integrada

media y la productividad de la vegetación estacionalmente activa media.

La Provincia de Santiago del Estero necesita contar con estaciones que registren información sobre los eventos fenológicos de sus coberturas vegetales. Esta información posibilitara, entre otras cosas, un mejor ajuste entre las observaciones fenológicas de terreno y las derivadas de satélites.

Agradecimientos

- El presente trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto CICYT-UNSE 23/B099, denominado "Monitoreo ambiental mediante imágenes satelitales y SIG: dinámica de la vegetación y del fuego en la provincia de Santiago del Estero, Argentina".

- Todas las imágenes pertenecen (copyright) al *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), y producidas y distribuidas por el Flemish Institute for Technological Research (VITO).

Referencias

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, n. 21, p.3096-3103, 2002.

BRADLEY, B. A.; JACOB, R. W.; HERMANCÉ, J. F.; MUSTARD, J. F. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v.106, n.2, p.137–145, 2007.

BROWN, M. E.; DE BEURS, K. M. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.5, p.2261-2271, 2008.

CHEN, X.; TAN, Z.; SCHWARTZ, M. D.; XU, C. H. Determining the growing season of land vegetation on the basis of plant phenology and satellite data in Northern China. **International Journal of Biometeorology**, v.44, n.2, p.97-101, 2000.

- CHEN, J.; JONSON, P.; TAMURA, M.; GU, Z.; MATSUSHITA, B.; ELKMUNDH, L. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. **Remote Sensing of Environment**, v.91, n.3-4, p.332-344, 2004.
- CLELAND E. E.; CHUINE I.; MENZEL A.; MOONEY H. A.; SCHWARTZ, M. D. Shifting plant phenology in response to global change. **TRENDS in Ecology and Evolution**, v.22, n.7, p.357-364, 2007.
- DELBART, N.; KERGOAT, L.; LE TOAN, T.; L'HERMITTE, J.; PICARD, G. Determination of phenological dates in boreal regions using normalised difference water index. **Remote Sensing of Environment**, v.97, n.1, p.26-38, 2005.
- DELBART, N.; TOAN, T. L.; KERGOAT, L.; FEDOTOVA, V. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982–2004). **Remote Sensing of Environment**, v.101, n.1, p.52-62, 2006.
- DOKTOR, D.; BONDEAU, A.; KOSLOWSKI, D.; BADECK, F. Influence of heterogeneous landscapes on computed green-up dates based on daily AVHRR NDVI observations. **Remote Sensing of Environment**, v.113, n.12, p.2618-2632, 2009.
- FISHER, J. I.; MUSTARD, J. F.; VADEBONCOEUR, M. A. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. **Remote Sensing of Environment**, v.100, n.2, p.265-279, 2006.
- FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE (FAS). **Drought in Southern South America - ARG - MODIS NDVI Anomaly**, 2009. Disponible en: <<http://earthobservatory.nasa.gov/naturalhazards/view.php?id=37239>>. Acceso en: 4 mar. 2009.
- HEUMANN, B. W.; SEAQUIST, J. W.; EKLUNDH, L.; JONSSON, P. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. **Remote Sensing of Environment**, v.108, n.4, p.385-392, 2007.
- HIRD, J. N.; MCDERMID, G. J. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. **Remote Sensing of Environment**, v.113, n.1, p.248-258, 2009.
- INFOSTAT. **InfoStat**, versión 2004. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. 1. Edición, Editorial Brujas, Argentina, 2004.
- JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality Extraction by Function fitting to Time-Series of satellite Sensor Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, n.8, p.1824-1832, 2002.
- JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT - a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v.30, p.833-845, 2004.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. **TimesatGUI**. Users guide for version TIMESAT 2.2, 2006. 17 p.

KANG, S.; RUNNING, W. S.; LIM, J.; ZHAO, M.; PARK, C.; LOEHMAN, R. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v.86, n.2, p.232-242, 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.23, n.19, p.4073-4087, 2002.

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.

LINDERHOLM, H. W. Growing season changes in the last century. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.137, n.1-2, p.1-14, 2006.

MINETTI, L. J. **Tendencia regional de sequías del Noroeste Argentino**. 2009. Disponible en: <http://www.labclisud.com.ar/Portada_indice.asp>. Acceso en: 7 set. 2009.

PASSOT, X. VEGETATION Image processing methods in the CTIV. In: SAINT, G. (Ed.). **VEGETATION 2000 PROCEEDINGS**. VEGETATION programme Scientist; Centre National D'études Spatiales. Lake Maggiore, Italy, 2000. p-15-22.

PROHASKA, F. J. El polo de calor de América del Sur. **INTA, IDIA**, v.141, p.27-30, 1959.

RAY, T. W. **Remote Monitoring of Land Degradation in Arid/Demi-arid Regions**. 1995. 415f. Thesis (Doctor of Philosophy) - California Institute of technology, Pasadena, California, 1995.

REED, B. C.; BROWN, J. F.; VANDERZEE, D.; LOVELAND, T. R.; MERCHANT, J. W.; OHLEN, D. O. Variability of land cover phenology in the United States. **Journal of Vegetation Science**, v. 5, p.703-714, 1994.

REED, B. C.; WHITE, M.; BROWN, J. F. Remote Sensing Phenology. En: SCHWARTZ M. D. (Ed.). **Phenology: An Integrative Environmental Science**. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 2003. p. 365-381.

RENOLFI, R. F. Los pastizales de la Región Chaqueña. En: EEASE y CIASE (Org.). **Jornadas de actualización técnica en producción bovina en áreas de secano de Santiago del Estero**. INTA EEA Santiago del Estero, Argentina, 1992. p.17-26.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, v.36, n.8, p.1627-1639, 1964.

SECRETARIA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA NACIÓN. Parque Chaqueño. En: **Atlas de los Bosques Nativos Argentinos, Proyecto Bosques Nativos y Áreas protegidas BIRF 4085-AR**. Argentina, 2004. 244 p.

SECRETARIA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA NACIÓN. **Informe Regional Parque Chaqueño**. En: **Primer inventario nacional de bosques nativos, Proyecto Bosques Nativos y Áreas protegidas BIRF 4085-AR**. Argentina, 2007. 114p.

TORRES BRUCHMANN, E. **Climatología General y Agrícola de la Provincia de Santiago del Estero**. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, 1981.199 p.

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

WANG, J.; RICH, P. M.; PRICE, K. P. 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.

WHITE, A. M.; THORNTON, E. P.; RUNNING, W. S. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. **Global Biogeochemical Cycles**, v.11, n.2, p.217-234, 1997.