

FENOLOGÍA FOLIAR REGIONAL A LO LARGO DE UN GRADIENTE CLIMÁTICO SW-NE EN LA ARGENTINA

GONZÁLEZ LOYARTE María Margarita¹; MENENTI Massimo²

¹ Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA/CONICET CCT Mendoza), gloyarte@lab.cricyt.edu.ar

² Delft Institute for Earth Observation Systems DEOS, Delft University of Technology, Delft The Netherlands

RESUMEN

Se caracteriza la fenología foliar regional de Argentina mediante parámetros dinámicos que describen una serie temporal de nueve años de imágenes mensuales de índice de vegetación NDVI. Se aplica la Transformada Rápida de Fourier. Se analizan las variaciones de los parámetros obtenidos a lo largo del gradiente climático en una transecta SW-NE. Las variaciones del NDVI medio responden a la disponibilidad hídrica. La amplitud a un año refleja la variación intraanual del NDVI: muy baja en condiciones de alta (clima subtropical muy húmedo) y baja (diagonal árida) disponibilidad hídrica, máxima en los bosques andino-patagónicos caducifolios e intermedia en oasis bajo riego y región semiárida. La amplitud a 0,5 año (variabilidad intraanual) caracteriza regiones agrícolas intensivas en secano (dos cosechas anuales). La fase es más corta en regiones húmedas y más largas en regiones áridas. La amplitud a nueve años caracteriza la variabilidad climática interanual de las zonas áridas.

Palabras clave: fenología foliar - imágenes NOAA-AVHRR NDVI GAC - Transformada de Fourier - vegetación - Argentina

REGIONAL FOLIAR PHENOLOGY ALONG A SW-NE CLIMATIC GRADIENT IN ARGENTINA

ABSTRACT

Argentina's regional foliar phenology is characterized through parameters that describe a nine-year time series of monthly NDVI images. Fast Fourier Transform is applied. Variations in the obtained parameters are analyzed across the climatic gradient of a SW-NE transect. Variations in mean NDVI respond to water availability. Amplitude at one year reflects the intra-annual NDVI variation: the lowest amplitudes occur in conditions of high (very wet sub-humid climate) and low (arid diagonal) water availability, the highest amplitudes occur in deciduous Andean-Patagonian forests, and intermediate values in irrigated oasis and semiarid region. Amplitude at 0.5 years (intra-annual variability) characterizes rainfed areas under intensive agriculture. Phase is shorter in wet regions and longer in arid regions. Amplitude at nine years characterizes the inter-annual climate variability in arid zones.

Keywords: foliar phenology - NOAA-AVHRR NDVI GAC imagery - Fourier Transform - Vegetation, Argentina

Introducción

La fenología analiza la respuesta de la vegetación a las condiciones meteorológicas. Los cambios producidos en el follaje a lo largo del ciclo vegetativo (fenología foliar) analizados en un conjunto de plantas constituyen el atributo más sensible de detectar a nivel de áreas extensas, es decir, en estudios a escala regional (Fuller y Prince, 1996). Las imágenes satelitarias (NOAA-AVHRR) han demostrado su utilidad en el análisis regional de la vegetación particularmente las imágenes de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) calculadas con imágenes del rojo visible (RV) y del infrarrojo cercano (IRC) ($NDVI = (IRC - RV) / (IRC + RV)$) (Justice *et al.*, 1986). Las imágenes del índice de vegetación NDVI están asociadas a la actividad fotosintética y a la producción de biomasa (Choudhury, 1987), esto es, reflejan la actividad de la cubierta vegetal (fenología foliar) (Tucker y Sellers, 1986). Una serie temporal de imágenes NDVI permite en consecuencia registrar los cambios fenológicos del follaje a lo largo de diversos ciclos vegetativos (Anyamba y Tucker, 2005).

Para caracterizar y comparar la fenología foliar como respuesta a diferentes climas es necesario simplificar la serie temporal de NDVI y extraer la información fundamental. Esta síntesis de la serie temporal permite obtener una descripción del comportamiento fenológico foliar medio (que incorpore la variabilidad interanual más importante y la variabilidad intraanual); para ello es necesario descomponer la serie temporal en parámetros que la describan con sentido dinámico. Menenti *et al.* (1991; 1993) y Verhoef (1996), simplifican la información de la serie temporal mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (TRF). La TRF es un algoritmo que descompone, para cada pixel, la serie temporal en varias componentes periódicas sencillas y comprensibles (parámetros de Fourier): un índice de vegetación medio para toda la serie y varias amplitudes y fases (Menenti *et al.*, 1993). La amplitud representa la medida de la máxima variabilidad del NDVI, o sea el contraste entre la vegetación en reposo y la máxima actividad vegetativa y la fase es el tiempo transcurrido entre el inicio de la serie y el momento en que se produce la máxima variabilidad. Los cambios de la vegetación detectados por los parámetros de Fourier son a nivel de duración e intensidad del follaje a lo largo de los ciclos vegetativos que abarca la serie temporal, es decir que estos parámetros dinámicos describen y explican la fenología foliar (Fuller y Prince, 1996). Estos parámetros tienen aplicación en estudios climáticos, así, para Brasil la fase resultó útil para cartografiar las variaciones estacionales de las lluvias (Negrón Juárez y Liu, 2001) y el NDVI medio sirvió para validar los regímenes de lluvias y tipos de clima (Liu y Negrón Juárez, 2001). En un estudio realizado sobre Europa (Roerink *et al.*, 2003) se concluyó que el NDVI medio y la amplitud a 1 año son indicadores sensibles de la variabilidad climática. Los parámetros de Fourier han sido aplicados también para explicar cuantitativamente las diferencias fenológicas debido a sequías y exceso de lluvias en la zona semiárida en Argentina (González Loyarte y Menenti, 2008) y la aridez a nivel de la Provincia de Mendoza (González Loyarte *et al.*, 2008).

Objetivo

El objetivo del trabajo es analizar mediante la Transformada de Fourier una serie temporal de imágenes satelitarias (NOAA-AVHRR NDVI GAC) y aplicar los parámetros de Fourier obtenidos para estudiar los cambios en la fenología foliar regional a través de un gradiente climático en la República Argentina. Para ello se plantea una transecta que recorra el país desde los bosques andino-patagónicos (SW) con precipitaciones otoño-invernales atravesando la diagonal árida, la región semiárida y húmeda con precipitaciones primavero-estivales hasta la selva misionera (NE) con precipitaciones durante todo el año. La transecta seleccionada abarcó la mayor diversidad climática con el fin de comprender el valor dinámico-descriptivo de cada parámetro de Fourier en la caracterización de la fenología foliar a nivel regional.

Materiales y métodos

Se trabajó con una serie temporal de imágenes mensuales de índice de vegetación NOAA-AVHRR-NDVI GAC (108 imágenes). La serie se inicia en julio de 1982 y culmina en junio de 1991 abarcando nueve ciclos vegetativos. Las imágenes poseen una resolución espacial de 7,6 x 7,6 km (tamaño del pixel) y cubren toda la República Argentina. Se aplicó el método HANTS (Verhoef, 1996) que, en una primera etapa, corrige las imágenes con píxeles de valores muy bajos debido a la presencia de nubes y cubierta de nieve y luego aplica el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (TRF) para descomponer la serie en parámetros sencillos. Se obtuvieron así 108 imágenes nuevas (parámetros de Fourier): NDVI medio e imágenes de amplitud (54) y de fase (53) para diferentes períodos. Cada amplitud y fase están asociadas a un determinado período desde nueve años a dos meses. El software de la TRF utilizado ha sido desarrollado por Verhoef (1996).

Para analizar las variaciones en la fenología foliar a través de los parámetros de Fourier se ha seleccionado una transecta SW-NE (desde 40,29° S, 71,74° O hasta 25,64° S, 53,89° O) abarcando los dos sistemas climáticos (influencia del Anticiclón del Pacífico y del Atlántico) y diversas regiones desde los bosques andino-patagónicos hasta la selva misionera (Figura 1). De este modo la transecta grafica las variaciones espaciales de los parámetros de Fourier seleccionados (NDVI medio, amplitud a 9, 1 y 0,5 años y la fase a un año) que caracterizan los cambios en la fenología foliar según las condiciones climáticas y el uso del suelo. Los parámetros fueron seleccionados por su amplitud; mayor amplitud contribuye más a explicar la variabilidad de la amplitud total. La amplitud a nueve años registra la variabilidad interanual del NDVI y las amplitudes a un y 0,5 años explican la variabilidad intraanual.

La zonificación de la transecta se basa en el mapa de unidades fitogeográficas de la República Argentina consultado en Pereyra (2003). Las variaciones de los paráme-

tros a lo largo de la transecta son explicados por las características geográficas (ríos, mesetas, etc.) y el uso del suelo (tipo de vegetación natural, oasis bajo riego, zona de doble cosecha en secano, etc.) consultadas en diferentes mapas por su localización geográfica a través de las coordenadas en latitud y longitud.

Para comprender el sentido de los parámetros de Fourier en la descripción fenológica se han seleccionado seis sitios de la transecta para los que se grafica la serie de datos mensuales de NDVI. Cada sitio ha sido asociado a una estación meteorológica próxima con registros de 40-50 años. La caracterización climática se ha realizado mediante el diagrama climático (Walter, 1961) que pone en evidencia los periodos secos, húmedos y per húmedos. Las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional seleccionadas son: S. C. de Bariloche (41,15°S, 71,17°O), Neuquén (38,95° S, 68,13° O), Victorica (36,22° S, 65,43° O), Pergamino (33,93° S, 60,55° O), Paso de los Libres (29,68° S, 57,15° O) e Iguazú (25,73° S, 54,47° O).

Resultados y discusión

La localización de la transecta SW-NE se presenta sobre la imagen obtenida de NDVI medio (Figura 1). Los parámetros (imágenes) de Fourier seleccionados para ser graficados a lo largo de la transecta son: NDVI medio, amplitud a 9, 1 y 0,5 años y fase a un año porque son los que explican las variaciones fenológicas a lo largo del gradiente climático (Figura 2). Los valores graficados fueron extraídos pixel a pixel de las correspondientes imágenes, a lo largo de la transecta, con sus localización en latitud y longitud. Se describe como varía cada parámetro a lo largo de la transecta considerando las unidades fitogeográficas: bosques andino-patagónicos, Estepa arbustiva Patagonia-monte, sabanas pampeanas (caldenal), pastizales pampeanos (en región de agricultura intensiva), sabanas mesopotámicas y selva misionera.

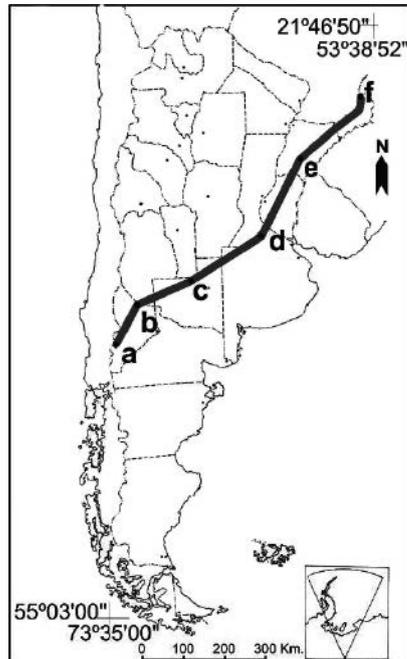


Fig. 1. Localización de los sitios de análisis (a-f) a lo largo de la transecta SW-NE.

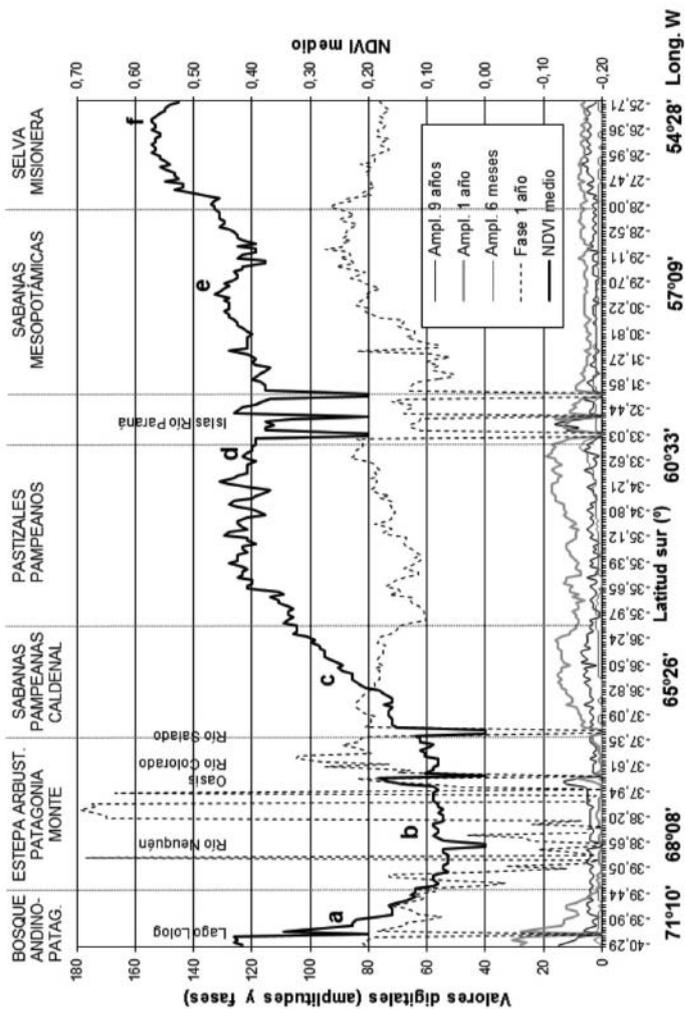


Fig. 2. Variaciones de los parámetros de Fourier NDVI medio, amplitud a 9, 1 y 0,5 años y fase a un año a lo largo de la transecta SO-NE. Se indican con letra las estaciones meteorológicas que representan a las unidades fitogeográficas a: Bosque andino-patagónico, b: Estepa arbustiva patagonia-monte, c: Sabanas pampeanas (caldenal), d: Pastizales pampeanos, en región de agricultura intensiva; e: Sabanas mesopotámicas y f: Selva misionera.

NDVI medio

Las variaciones en el índice de vegetación medio muestran valores altos al inicio de la transecta (bosques andino-patagónicos) que disminuyen alcanzando los valores más bajos en correspondencia con la diagonal árida (constituida en esta latitud por la estepa arbustiva patagónica al oeste del río Neuquén y la del monte al este). El NDVI medio baja bruscamente por la presencia de agua (lagos, ríos).

A partir del río Salado se produce un incremento progresivo en el índice de vegetación en correspondencia con el clima templado semiárido de las sabanas pampeanas y más al norte con el clima templado húmedo de los pastizales pampeanos. Luego de caracterizar las islas del río Paraná, el NDVI medio alcanza valores más elevados bajo el clima subtropical húmedo de las sabanas mesopotámicas, con los valores máximos de la transecta bajo clima subtropical muy húmedo en la selva misionera.

En los bosques andino-patagónicos el NDVI medio marca un contraste al oeste del lago Lolog con una biomasa muy importante en correspondencia con el bosque higrófilo valdiviano (1800 mm de lluvia anual) que presenta tres estratos arbóreos con numerosas lianas; el estrato superior está dominado por *Nothofagus dombeyi* (coihue), especie de follaje persistente (Roig, 1998).

Este bosque se combina con los bosques mesófilos (1000 mm anuales) donde el coihue convive con especies de *Nothofagus* de hoja caduca. Al este del lago Lolog predomina el bosque xerófilo (<1000 mm anuales), de menor biomasa y menor NDVI medio, donde dominan especies caducifolias de *Nothofagus* combinados localmente con árboles perennifolios (*Araucaria araucana*, *Austrocedrus chilensis*) y bajo condiciones climáticas que muestran en verano un periodo seco (Estación de S.C. de Bariloche) (Figura 3).

En estos bosques parte de la precipitación cae como nieve. La disminución O-E del NDVI medio en los bosques andino-patagónicos responde a la disminución de las lluvias.

La vegetación arbustiva patagonia-monte es de baja cobertura y con predominio de arbustos perennifolios de hojas pequeñas y coriáceas adaptadas a la aridez registrada durante todo el año (*Larrea* spp., *Chusqueira* spp., etc.) (Roig, 1998). Las escasas precipitaciones (200 mm anuales) muestran una distribución con leve incremento en primavera y en otoño (Figura 3, II b). El notable incremento de NDVI en la proximidad del río Colorado se debe al oasis bajo riego que aumenta la biomasa producida.

Las sabanas pampeanas (caldenal) graficadas están constituidas por bosques xerófilos caducifolios con un estrato arbustivo pobre y un estrato herbáceo rico en gra-

míneas (Cabrera, 1976). Este último es muy dependiente de las lluvias concentradas en primavera-verano (Estación Victorica, Figura 3, II c), de modo que, a medida que las precipitaciones se incrementan hacia el este, también se incrementa la biomasa y el NDVI medio.

La unidad de pastizales pampeanos responde al clima templado húmedo sin periodo seco donde la alta productividad primaria refleja las precipitaciones bien distribuidas con lluvias superiores a 100 mm en algunos meses de primavera-verano (Estación Pergamino, Figura 3, II d).

Las sabanas mesopotámicas, bajo clima subtropical húmedo (Estación Paso de los Libres, Figura 3, II e), presentan un estrato herbáceo de alta cobertura y con alta diversidad de especies; los estratos arbóreos y arbustivo están constituidos por especies de follaje caduco y perennifolio (Cabrera, 1976) que aseguran la cobertura vegetal a lo largo del ciclo vegetativo como respuesta a la alta disponibilidad de lluvias durante todo el año, lo cual se refleja en el alto NDVI medio.

La selva misionera crece bajo condiciones de mayor temperatura y humedad (Estación Iguazú, Figura 3, II f) donde predominan los megafanerófitos (árboles de 20-30 m) de hoja perenne que determinan el mayor NDVI de la transecta. La abundante y permanente biomasa responde a la multiplicidad de estratos: tres estratos arbóreos, un estrato de bambúseas y arbustos, un estrato herbáceo, un estrato muscinal, un estrato de epifitas (helechos, orquídeas, bromeliáceas, etc.) y uno de lianas; la riqueza florística es muy elevada (Cabrera, 1976).

Amplitud a un año

La amplitud a un año muestra la variabilidad intraanual de la cubierta vegetal (fenología foliar); la estacionalidad del follaje se observa en detalle a través de la evolución mensual del NDVI (Figura 3, I). La máxima amplitud de la transecta corresponde a los bosques andino-patagónicos (Figura 2a) donde el follaje caducifolio dominante muestra un marcado contraste entre la cobertura invernal y estival (Figura 3, I a); la mínima amplitud corresponde a la zona árida donde la vegetación arbustiva patagonia-monte (Figura 2b), de baja cobertura y con muchas especies con follaje perenne y xerófilo, muestra escaso contraste a nivel regional (pixel 7,6 km) entre el índice de vegetación de invierno y el de verano (Figura 3, I b). Valores intermedios en la amplitud a un año corresponden a la sabana pampeana (Figura 3c) bajo clima templado semiárido cuya vegetación responde a las lluvias primavera-estivales en contraste con el invierno relativamente seco (Figura 3, I y IIc) y a la unidad de los pastizales pampeanos (Figura 3d) bajo clima templado húmedo con concentración de precipitaciones primavera-estivales pero sin estación seca en invierno lo que posibilita dos cosechas por año (Figura 3, I y II d).

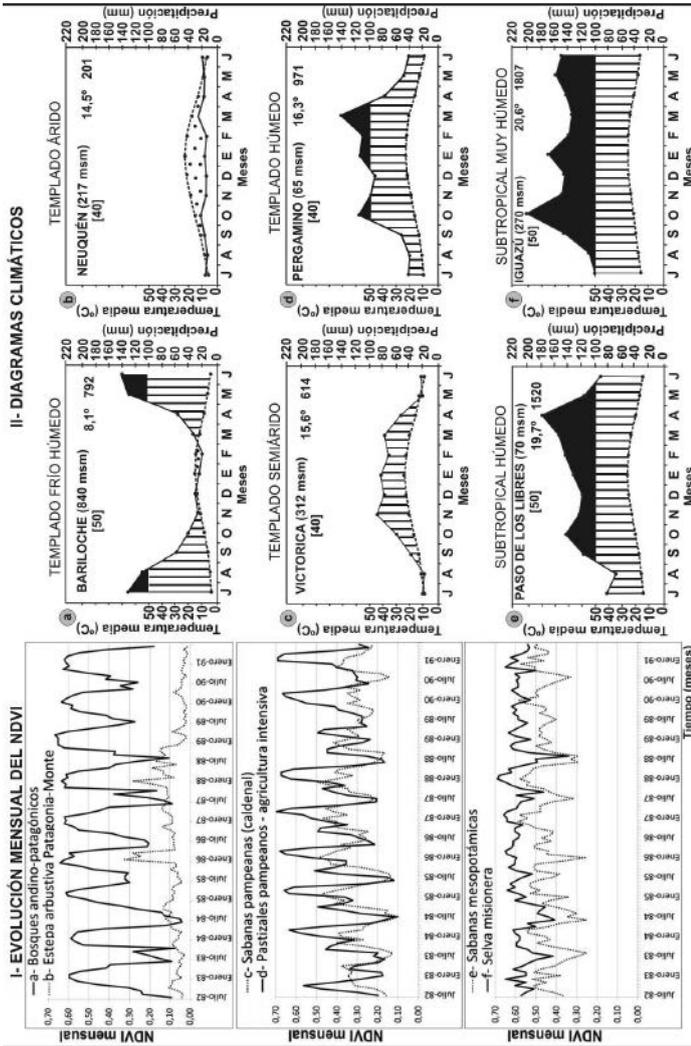


Fig. 3. Caracterización de las regiones recorridas en la transecta SW-NE: I- Serie temporal del NDVI mensual. II- Diagramas climáticos. Las variaciones en el NDVI medio reflejan la biomasa de cada región donde se destaca la menor biomasa bajo clima árido con periodo seco (NDVI medio < 0,10) y la mayor bajo clima subtropical húmedo con periodos perhúmedos (NDVI medio > 0,50).

Las regiones más húmedas de la transecta (sabana mesopotámica y selva misionera) presentan poco contraste entre el NDVI de verano e invierno reflejado en los bajos valores de amplitud a un año (Figura 2e y f). Estos valores evidencian la alta cobertura de especies de follaje persistente, en respuesta a las abundantes y bien distribuidas precipitaciones (Figura 3, I y IIe,f). A la latitud de 37,68° S (Figura 2) el aumento en la amplitud a un año y del NDVI en la zona árida, a orillas del río Colorado, corresponde al oasis irrigado de la Villa 25 de Mayo, cuyos cultivos frutihortícolas y forestales explican el contraste entre la biomasa verde en invierno y verano, y el correspondiente incremento de la amplitud y del NDVI medio.

Amplitud a 0,5 año

La amplitud a 0,5 año (seis meses) presenta valores muy bajos a lo largo de toda la transecta con excepción del incremento a 33,28° S (Figura 2d) en correspondencia con la zona de agricultura intensiva en secano. Aquí, la doble cosecha (trigo de invierno y soja o girasol en verano) produce dos máximos correspondientes a la máxima producción de biomasa de cada cultivo, y luego su rápida disminución debido a las respectivas cosechas. Estos dos máximos en un mismo ciclo vegetativo explican la mayor variabilidad intraanual del índice de vegetación; o sea se produce con una frecuencia de dos veces por año. Esto ocurre en correspondencia con los máximos de precipitación (> 100 mm/mes) en primavera y verano de la Estación de Pergamino (Figura 3, I y II d). La reducción en el NDVI mensual muestra la influencia de la cubierta del suelo debido a las labranzas (barbecho o suelo desnudo, siembra, máxima cobertura y cosecha para dos cultivos por año).

Amplitud a nueve años

La amplitud a nueve años indica eventos que ocurren una vez en nueve años y los valores más altos se dan en el bosque andino-patagónico, en el oasis de 25 de Mayo y en las islas del río Paraná (32,84° S) donde refleja eventos extremos con baja frecuencia (sequía, inundación, nevadas importantes o escasas, etc.) (Figura 2). Sólo en la estepa arbustiva xerófila la amplitud a nueve años supera la amplitud a 1 año reflejando la variabilidad de las escasas precipitaciones.

Fase a un año

La fase a un año indica el momento en que se produce la máxima expresión vegetativa a partir del inicio del ciclo que es julio y alcanza los valores más altos (fases largas, mayor tiempo transcurrido desde julio) en la zona árida, donde el máximo NDVI se produce a fines de verano (marzo-abril) (González Loyarte *et al.*, 2009). Los valores más bajos (fases cortas:) se observan en la estepa patagónica (al oeste del río Neuquén) donde la vegetación en la primavera-inicio-verano alcanza la mayor cober-

tura (Campanella y Bertiller, 2008) como respuesta a la reserva hídrica de los suelos (nieve y lluvias invernales, Estación S.C. de Bariloche), es decir, es más corto el tiempo transcurrido desde el inicio del ciclo. Los bosques andino-patagónicos tienen una fase relativamente corta, que responde también a las precipitaciones otoño-invernales. En el resto de la transecta la fase a un año presenta valores entre 60 y 90 que reflejan la máxima cobertura vegetal en los meses de verano, como lo muestra la evolución mensual del NDVI (Figura 3, a, c-f).

Conclusiones

El grado de cobertura vegetal, las características de persistencia o caducidad del follaje dominante y los cambios en la vegetación a lo largo del ciclo vegetativo fueron explicados por las características climáticas. Estas variaciones fenológicas se vieron reflejadas en los parámetros de Fourier; esto permitirá cartografiar en una segunda etapa los cambios en la fenología regional en toda la extensión continental de la Argentina como consecuencia de la continuidad espacial de los parámetros de Fourier derivados de las imágenes satelitarias de índice de vegetación.

Las variaciones en el NDVI medio responden a la disponibilidad hídrica incrementándose este parámetro como consecuencia de la mayor biomasa a medida que las lluvias aumentan. La amplitud a un año refleja la variación intraanual del NDVI correspondiente al contraste máximo invierno-verano. Las menores amplitudes a 1 año se dan en condiciones de alta y baja disponibilidad hídrica presentando un alto y bajo NDVI medio respectivamente. En la diagonal árida, donde el follaje muestra escasos cambios a lo largo del ciclo vegetativo, la amplitud a un año y el NDVI medio son los más bajos de la transecta. Bajo clima subtropical muy húmedo, en cambio, el follaje dominante persistente es reflejado por la baja amplitud a un año y la abundante biomasa se expresa con el máximo NDVI de la transecta.

La máxima amplitud a un año se da en los bosques andino-patagónicos caducifolios; valores intermedios corresponden al oasis bajo riego y región semiárida. La amplitud a 0,5 año, también reflejo de la variabilidad intraanual, caracteriza a regiones agrícolas intensivas en secano. La fase es más corta en regiones húmedas y más largas en regiones áridas. La amplitud a nueve años caracteriza mayormente la variabilidad interanual del NDVI en las zonas áridas consecuencia de la variabilidad climática.

Las diferencias entre los sistemas climáticos del océano Pacífico y del Atlántico a lo largo de la transecta se manifestaron en la elevada amplitud a un año de los bosques andino-patagónicos y en las fases a un año más cortas como consecuencia de las precipitaciones otoño-invernales.

Agradecimientos

A la memoria de la Lic. en Geografía Vivi Lotfi Winzentsen, gran amiga y colega. A M.I. Rosi por la lectura crítica del texto; a G. Varoli Piazza por sus valiosas sugerencias; a M.C. Scoones por el diseño de los diagramas climáticos y a N. Horak por la traducción al inglés.

Referencias

- Anyamba, A.; Tucker, C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environment* 63, no. 3, 596-614.
- Cabrera, A. L. (1976). Regiones Fitogeográficas Argentinas. En: Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, Tomo II, Fascículo 1, 2da. Edición. Ed. ACME S.A.C.I., Buenos Aires.
- Campanella, M. V.; Bertiller, M. B. (2008). Plant phenology, leaf traits, and leaf litter-fall of contrasting life forms in the arid Patagonian Monte, Argentina. *Journal of Vegetation Science* 19, 75-85.
- Choudhury, B. J. (1987). Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitive analysis. *Remote Sensing of Environment* 22, no.2, 209-233.
- Fuller, D. O., Prince, S. D. (1996). Regional-scale foliar phenology in tropical Southern Africa: An application of the Fast Fourier Transform to time series of satellite imagery. In: S. Azzali & M. Menenti (eds.). *Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents*. Report 108, 113-132. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands.
- González Loyarte, M. M.; Diblasi, A. M.; Menenti, M. (2008). Modelo probabilístico de la aridez en la Provincia de Mendoza a partir de la fenología foliar a escala regional. *Contribuciones Científicas GAEA* 20, 155-163.
- González Loyarte, M. M.; Menenti, M. (2008). Impact of rainfall anomalies on Fourier parameters of NDVI time series of northwestern Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 29, no.4, 1125 – 1152.
- González Loyarte, M. M.; Menenti, M.; Diblasi, A. M. (2009). Mapa bioclimático para las Travesías de Mendoza (Argentina) basado en la fenología foliar. *Revista Facultad de Ciencias Agrarias*, UNCuyo. Tomo XLI, no.1, 105-122.
- Justice, C. O.; Holben, B. N.; Gwynne, M. D. (1986). Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 7, no.11, 1453-1474.
- Liu, W. T.; Negrón Juárez, R. I. (2001). ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 22, no.17, 3483-3501.

- Menenti, M.; Azzali, S.; Verhoef, W.; Van Swol, R. (1991). Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Monitoring Agroecological Resources with Remote Sensing and Simulation (MARS)*. Report 32, 1-46. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands.
- Menenti, M.; Azzali, S.; Verhoef, W.; Van Swol, R. (1993). Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Advances in Space Research* 13, no. 5, 233-237.
- Negrón Juárez, R. I.; Liu, W. T. (2001). FFT analysis on NDVI annual cycle and climatic regionality in Northeast Brazil. *International Journal of Climatology* 21, no.14, 1803-1820.
- Pereyra, F. (2003). Ecoregiones de la Argentina. SEGEMAR, *Anales* 37, 1-198. Buenos Aires.
- Roerink, G. J.; Menenti, M.; Soepboer, W.; Su, Z. W. (2003). Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 28, 103-109.
- Roig, F. A. (1998). La vegetación de la Patagonia. En: M.N. Correa, Flora Patagónica, INTA Colección Científica Tomo VIII, vol. I, 47-174.
- Tucker, C. J., Sellers; P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* 7, no.11, 1395-1416.
- Verhoef, W. (1996). Application of Harmonic Analysis of NDVI Time Series (HANTS). In Azzali, S., Menenti, M. (eds.). *Fourier Analysis of Temporal NDVI in the Southern African and American Continents*, 19-24. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands.
- Walter, H. (1961). Climatic diagrams as means to comprehend the various climatic types for ecological and agricultural purposes. In: Rutter, A. J., Whitehead, F. M. (eds). *The water relations of plants*, 3-9. A Symposium of the British Ecological Society, London, 5-8 April 1961.