

LA INFLUENCIA DEL FENÓMENO ENSO SOBRE LA FENOLOGÍA PRIMAVERAL EN LOS BOSQUES BOREALES DE SIBERIA CENTRAL

Sergio M. VICENTE-SERRANO****, Nicolas DELBART****, Thuy LE TOAN*** y
Manuela GRIPPA***

* Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Zaragoza. España

** Ecosystem Change Research Group, JAMSTEC Frontier Research Center for Global
Change. Yokohama. Japón

*** Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO). Toulouse. Francia

RESUMEN

Se analiza la influencia de El Niño-*Southern Oscillation* (ENSO) sobre la variabilidad interanual de las fechas de aparición de las hojas e inicio de la actividad vegetal primaveral en los bosques boreales del hemisferio norte entre 1982 y 2004. Los resultados muestran negativas y significativas correlaciones entre el fenómeno ENSO, cuantificado mediante el *Southern Oscillation Index* (SOI), y la fecha de aparición de las hojas en Siberia central, con un retraso en dicha influencia de hasta 9 meses. La correlación entre la fecha de aparición de las hojas y la temperatura de superficie oceánica a escala global muestran un patrón espacial que asemeja al fenómeno ENSO, con correlaciones positivas y significativas en el Este del Pacífico y negativas en el Oeste. Esta influencia se explica por el papel del fenómeno ENSO sobre la presión en superficie, el geopotencial a 500hPa, la dirección e intensidad de los flujos de viento y la temperatura de superficie durante los meses en los que aparecen las hojas (abril-mayo) en las zonas boreales de Siberia central.

Palabras clave: Fenología vegetal, ENSO, aparición de las hojas, teledetección, bosques boreales, Siberia central.

ABSTRACT

This paper analyses the role of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on the interannual variability of the leaf appearance dates of boreal forests in the Northern hemisphere (1982-2004). We find significant negative correlations between the ENSO, quantified by means of the Southern Oscillation Index (SOI), and the leaf appearance dates in central Siberia with up to 9 months lag. The correlations between leaf appearance dates and summer Sea Surface Temperatures (SST) show a pattern that resembles the ENSO phenomena with positive and significant correlations in the East pacific and negative in the West. These findings are explained by the role of SOI on Sea Level Pressures, 500 hPa Geopotential and the wind flow direction and intensity during the months of leaf appearance (April and May) and on average temperatures, which determine noticeably the date of leaf appearance.

Key words: Phenology, ENSO, leaf appearance, remote sensing, boreal forests, central Siberia.

1. INTRODUCCIÓN

La fenología vegetal es un importante elemento de múltiples procesos ambientales. El inicio de la actividad vegetal en primavera y la senescencia en otoño influyen en el intercambio de carbono entre la biosfera y la atmósfera. De hecho, la medida de flujos de CO₂ ha mostrado que las diferencias en la fenología vegetal pueden llegar a explicar hasta un 83% en la varianza de dichos flujos en regiones de bosques boreales (BALDOCCHI *et al.*, 2001). Cambios de un día en la fenología vegetal pueden llegar a modificar los intercambios anuales de CO₂ hasta 5.7 gm⁻² de promedio y la productividad de biomasa vegetal neta anual hasta un 1.6% (WHITE *et al.*, 1999).

Por ello, resulta muy importante analizar los factores que afectan la variabilidad interanual de los ciclos fenológicos, detectados en primavera con la aparición de las primeras hojas en los bosques. Diferentes estudios han mostrado el importante papel que ejerce la circulación atmosférica sobre la variabilidad interanual de la fenología vegetal en Europa (P.Ej., AASA *et al.*, 2004). Sin embargo, estos estudios no cubren amplias áreas y, además, la influencia de los principales patrones de circulación atmosférica a escalas continentales y globales tampoco ha sido analizada.

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) es una de las principales fuentes de variabilidad climática a escala global (TRENBERTH, 1997) que influye sobre el clima de amplias regiones (ROPELEWSKI y HALPERT, 1987). Además, también tiene un significativo efecto sobre los ecosistemas y la variabilidad interanual en la actividad vegetal. Diferentes estudios han ilustrado los efectos del fenómeno ENSO sobre los índices de vegetación (habitualmente mediante el Índice de Vegetación Normalizado, NDVI) obtenidos mediante teledetección (P.Ej., KOGAN, 2000; BUERMANN *et al.*, 2003).

No obstante, aunque la teledetección ha sido ampliamente utilizada en el análisis del impacto del fenómeno ENSO sobre la actividad vegetal, su papel sobre la fenología vegetal no ha sido considerado todavía. Por ello, en este trabajo se analiza su influencia sobre la fenología vegetal en las regiones de bosques boreales del hemisferio norte, que constituyen un elemento clave para comprender los procesos actuales de cambio global.

2. METODOLOGÍA

2.1. Estimación de la aparición de las hojas mediante imágenes de satélite

Las imágenes de satélite han sido muy utilizadas para determinar la fenología vegetal (P. Ej., ZHANG *et al.*, 2004) y su variabilidad interanual (MYNENI *et al.*, 1997). Sin embargo, se ha comprobado que diferentes métodos pueden dar lugar a distintos resultados (SCHWARTZ *et al.*, 2002) lo que hace difícil relacionar la información obtenida mediante imágenes de satélite con un estado fenológico particular. En las regiones boreales hay que sumar, además, un problema adicional relacionado con la presencia de nieve: el índice de vegetación normalizado (NDVI), que es comúnmente utilizado para estimar la fenología vegetal, está también afectado por la cubierta de nieve y su fusión, por lo que las variaciones en la actividad vegetal pueden estar parcialmente relacionadas con las variaciones en las fechas de fusión de la nieve (DYE y TUCKER, 2003).

DELBART *et al.* (2005) desarrollaron una metodología para solucionar este problema y obtener estimaciones precisas sobre el inicio de la actividad vegetal primaveral en las regiones

boreales. Entre los años 1998 y 2004 el cálculo se realiza mediante el *Normalised Difference Water Index* (NDWI) a partir de imágenes procedentes del sensor SPOT-VEGETATION (VGT). Este índice tiene la ventaja de separar la señal fenológica de la señal producida por la fusión nival. Un incremento de los valores de NDWI, que es construido mediante una combinación de información en las regiones espectrales del infrarrojo cercano y medio, puede ser atribuido, exclusivamente, a un aumento de la actividad fotosintética en la vegetación.

Esta metodología permite estimar la fenología vegetal antes de 1998 gracias a la coincidencia temporal de registros procedentes del sensor SPOT-VGT y de la base de datos Pathfinder (PAL) obtenida a partir del sensor AVHRR (JAMES y KALLURI, 1994) entre 1998 y 2001. Para cada píxel y año se calcula el valor de NDVI en la serie PAL que corresponde a la fecha de aparición de las hojas obtenida a partir de datos SPOT-VGT. Los valores de NDVI de estos años son promediados para obtener un umbral específico para cada píxel. A partir de estos umbrales se obtiene la fecha de aparición de las hojas para el periodo entre 1982 y 1997 (ver detalles en DELBART *et al.*, 2006). La resolución espacial final de la información fue de 0.5°.

2.2. Cuantificación de El Niño-Southern Oscillation

Los índices propuestos para cuantificar el fenómeno ENSO resultan muy variados (TRENBERTH y STEPANIAK, 2001). Uno de los más utilizados es el SOI (*Southern Oscillation Index*) (HANLEY *et al.*, 2003), que es una medida de la intensidad del sistema océano-atmósfera en el Pacífico Sur basado en el gradiente de presión a nivel del mar entre las áreas del Este y Oeste (RASMUSSEN y CARPENTER, 1983). El SOI se calcula a partir de la diferencia normalizada entre las anomalías mensuales de presión registradas en los observatorios de Tahití (Pacífico Este) y Darwin (Pacífico Oeste) (ROPELEWSKI y JONES, 1987). En este trabajo se han utilizado los valores mensuales de SOI calculados por la *Climate Research Unit* de la Universidad de *East Anglia* entre 2001 y 2004: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/soi.htm>. Se calcularon los promedios estacionales correspondientes al verano (Jun., Jul., Ago.), otoño (Sept., Oct., Nov.) e invierno (Dic., Ene., Feb.) para relacionarlos con la fecha de aparición de las hojas en los bosques boreales del hemisferio norte.

3. RESULTADOS

3.1. Relación entre el SOI y la fecha de aparición de las hojas

Para determinar la influencia del SOI sobre la fecha de aparición de las hojas se calculó la correlación existente entre las series temporales sobre las fechas de aparición de las hojas cada año y en cada píxel, y los promedios estacionales del SOI entre 1982 y 2004. La Figura 1 muestra la distribución espacial de las correlaciones correspondientes al SOI del verano (Figura 1.1), el otoño (Figura 1.2) y el invierno previos (Figura 1.3). En todos los casos se comprueba la existencia de correlaciones significativas en amplias áreas de Siberia Central. Los patrones espaciales resultan similares en las distintas estaciones del año como consecuencia de las escasas diferencias en el SOI entre meses consecutivos, ya que las fases positivas y negativas del fenómeno ENSO tienden a mantenerse durante varios meses. El fenómeno ENSO suele cambiar de fase entre primavera y verano (TRENBERTH, 1997). Por esta razón, los análisis posteriores se han realizado mediante los valores del SOI estival, ya que resultan más útiles para la predicción temprana.

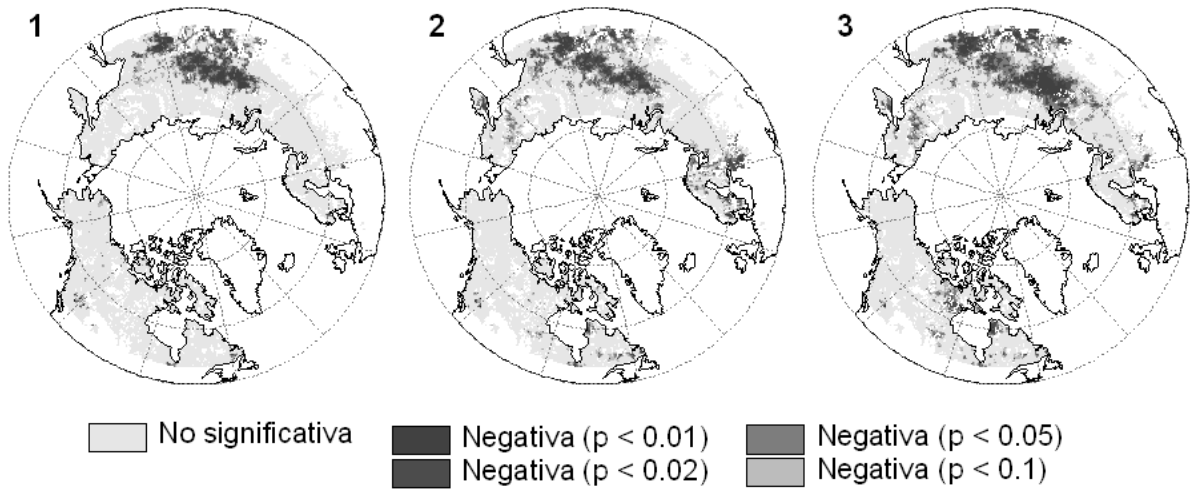


Fig. 1: Distribución espacial de las correlaciones entre las fechas de aparición de las hojas y el SOI del verano previo (1), otoño (2) e invierno (3).

La figura 2 muestra la evolución del SOI estival y el promedio en la fecha de aparición de las hojas en las áreas en las que se han identificado las negativas y significativas correlaciones ($p < 0.05$) indicadas en la Figura 1.1. Se muestra una contraria evolución en ambas series ($R = -0.67$, $p < 0.01$). Ello indica que altos valores del SOI durante el verano previo están relacionados con una más temprana aparición de las hojas en amplias áreas de Siberia central.

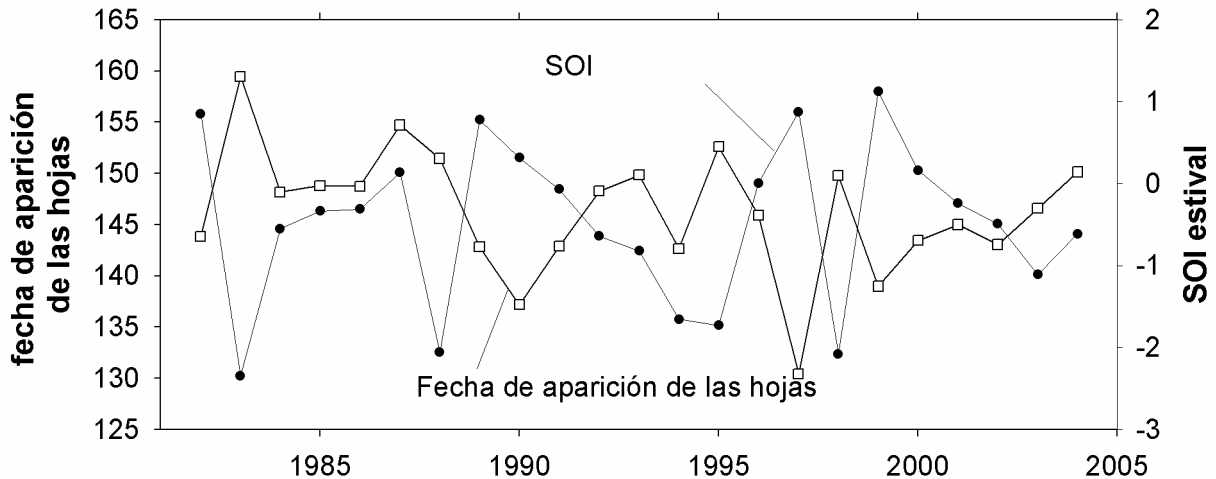


Fig. 2: Evolución de la fecha de aparición de las hojas en las zonas de bosques boreales de Siberia central (área con correlaciones significativas en la Figura 1.1) y el SOI del verano anterior

Para ilustrar en detalle la influencia del fenómeno ENSO sobre la fenología primaveral en los bosques boreales de Siberia central, se calculó la correlación existente entre el promedio en las fechas de aparición de las hojas correspondiente a las áreas con correlaciones significativas indicadas en la figura 1.1 y la temperatura de los océanos a escala global

durante el verano previo (Figura 3). Los registros de temperatura del mar fueron obtenidos de ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/sea_surface_temperature/reynolds/oisst/doc/oisst.html, basados en registros térmicos procedente del sensor NOAA-AVHRR (ver detalles en REYNOLDS y SMITH, 1995). Los patrones de correlación muestran importantes diferencias dentro del océano Pacífico, con una distribución espacial que se asemeja a la que presenta, en realidad, el fenómeno ENSO. De hecho, se han encontrado correlaciones positivas en el centro y Este del océano Pacífico y correlaciones negativas en el Oeste. Este hecho indica que las fases cálidas (El Niño), que dan lugar a bajos valores de SOI causan, de promedio, un retraso en la fecha de aparición de las hojas en Siberia central. Por el contrario, las fases frías (La Niña), se asocian a una aparición más temprana de las hojas en los bosques boreales.

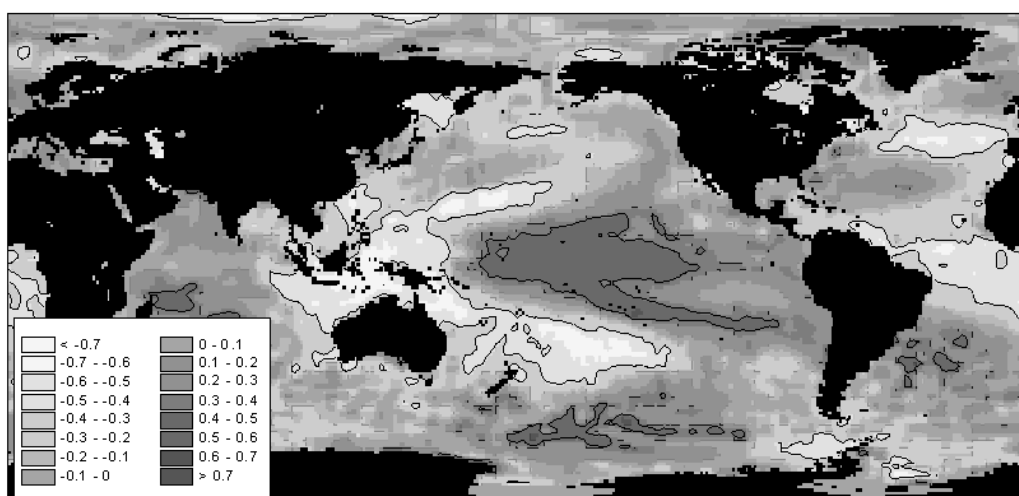


Fig. 3: Correlación entre la fecha de aparición de las hojas en los bosques boreales de Siberia central y la temperatura de superficie del verano previo a escala global (1982-2004). Las líneas negras aislan áreas con correlaciones significativas.

3.2. Conexiones climáticas que explican la influencia de ENSO sobre la fenología vegetal primaveral en Siberia central

La conexión entre el fenómeno ENSO y la existencia de anomalías atmosféricas en América del Norte y Europa ha sido indicada por numerosos autores (P.Ej., TRENBERTH y HURRELL, 1994). Así pues, para comprender los factores que conducen a una propagación del fenómeno ENSO sobre la fenología vegetal en Siberia central se analizó la influencia del SOI sobre los valores de presión en superficie, el geopotencial a 500 hPa y la dirección e intensidad de los flujos de viento a 500 hPa en el hemisferio norte durante los meses de abril y mayo, en los que, de forma general, comienza la actividad vegetal en los bosques boreales de Siberia central.

Para ello se utilizaron datos de presión atmosférica y geopotencial disponibles en la base de datos NCEP-NCAR (<http://dss.ucar.edu/datasets/>). La Figura 4 muestra la distribución espacial de las correlaciones entre los valores de presión atmosférica media durante abril y mayo y los valores del SOI durante el verano previo (4.1) y la fecha de aparición de las hojas en las áreas de Siberia central indicadas en la Figura 1.1 entre 1982 y 22004 (4.2). En la misma figura se muestran las correlaciones entre los valores de geopotencial a 500 hPa en abril-mayo y el SOI del verano anterior (4.4) así como con las fechas de aparición de las hojas

en la misma región (4.4). También se calculó la magnitud y dirección de los vectores correspondientes a los flujos de viento a 500 hPa. Estos registros se obtuvieron a partir de las correlaciones entre los valores medios (abril-mayo) de las componente u (horizontal) y v (vertical) del viento, el SOI estival y las fechas de aparición de las hojas en la región de Siberia central.

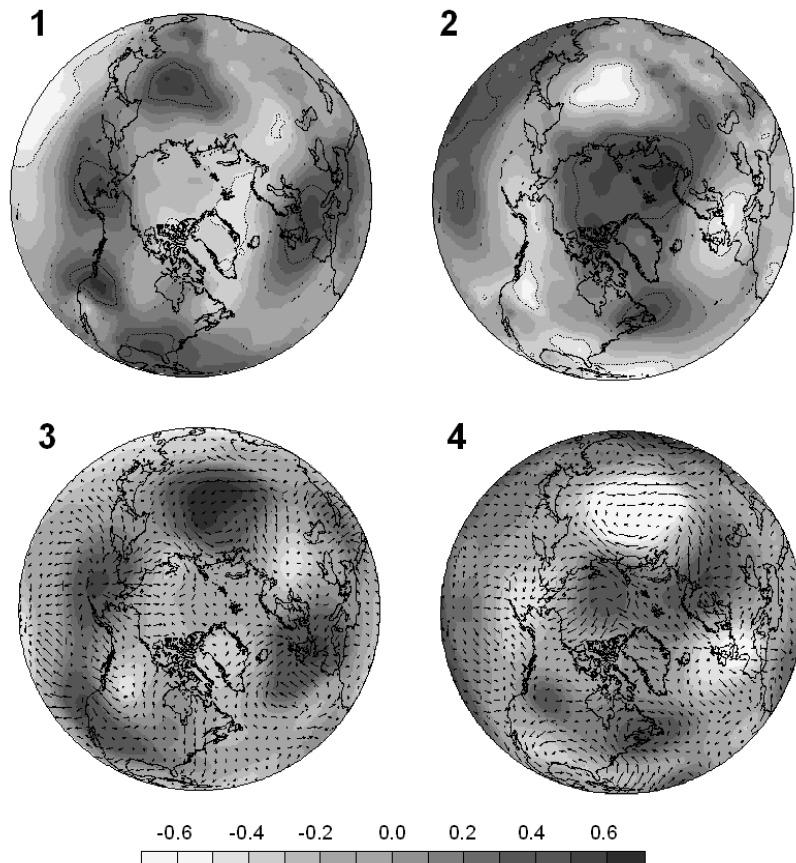


Fig. 4: Correlación (1982-2004) entre los valores de presión a nivel del mar promedio en abril-mayo y 1) los valores del SOI en el verano previo, 2) la fecha de aparición de las hojas en la región central de Siberia, y el promedio de Geopotencial a 500hPa en abril-mayo y 3) los valores del SOI en el verano previo, 4) la fecha de aparición de las hojas en la región central de Siberia. Las líneas punteadas indican áreas con correlaciones significativas. Las flechas muestran los vectores de dirección e intensidad del viento obtenidos a partir de las correlaciones entre los componentes u y v del viento y los valores de SOI del verano previo y la fecha de aparición de las hojas en la región central de Siberia para 3) y 4) respectivamente.

Los resultados muestran que existen positivas y significativas correlaciones entre el SOI estival y las presiones de superficie en Siberia central durante abril-mayo del año siguiente, y correlaciones negativas, también significativas, en el Océano Ártico y el oeste de Rusia. El patrón contrario (correlaciones negativas con los valores de presión de superficie en el centro-sur de Siberia y positivas en la zona ártica) se identificó considerando las correlaciones entre las fechas de aparición de las hojas en Siberia central y los valores de presión en superficie en el hemisferio norte en abril-mayo. Estos resultados indican que los principales gradientes en los valores de presión en superficie, con relación a la influencia del fenómeno ENSO, se

registran en Siberia central. El patrón es incluso más claro considerando los valores de geopotencial a 500 hPa pues los valores de correlación son superiores considerando los valores previos del SOI y las fechas de aparición de las hojas en Siberia central. La influencia del fenómeno ENSO sobre la fecha de aparición de las hojas es bien explicada considerando la dirección de los flujos de viento en Siberia central. Altos valores del SOI (característicos de las fases frías –La Niña-) causan altas presiones (en superficie y en la troposfera media) en la zona central de Siberia y bajas presiones sobre el océano Ártico. Esta configuración produce dominantes flujos del Suroeste que afectan la región central de Siberia. Por consiguiente, los flujos del oeste dan lugar a una más temprana aparición de las hojas en los bosques boreales de Siberia central. Por el contrario, valores negativos de presión en esta región y presiones positivas en el océano Ártico se asocian a flujos dominantes del noroeste que dan lugar a un retraso en el inicio de la actividad fenológica.

La influencia de ENSO sobre las fechas de aparición de las hojas mediante datos de presión en superficie, geopotencial a 500 hPa y flujos de viento puede interpretarse con relación a su influencia directa sobre las temperaturas de superficie. Por ello se analizó el papel del SOI estival sobre las temperaturas de abril-mayo en Siberia central. Para ello se utilizaron los valores de temperatura de superficie de la base CRU a una resolución de 0.5° (TS 2.0 dataset) (MITCHELL *et al.*, 2003). La base de datos finaliza en 2002 pero el descenso en los grados de libertad no afecta de forma sensible la robustez de los resultados.

El SOI se correlaciona positiva y significativamente con las temperaturas medias en Siberia central ($R = 0.56$, $p < 0.01$) (Figura 5). Así pues, los flujos del oeste, asociados a fases positivas del SOI, dan lugar a temperaturas más altas que los flujos dominantes del Este. Ello favorece una más temprana aparición de las hojas dada la negativa correlación existente entre las temperaturas de abril-mayo y la fecha de aparición de las hojas ($R = -0.84$, $p < 0.01$).

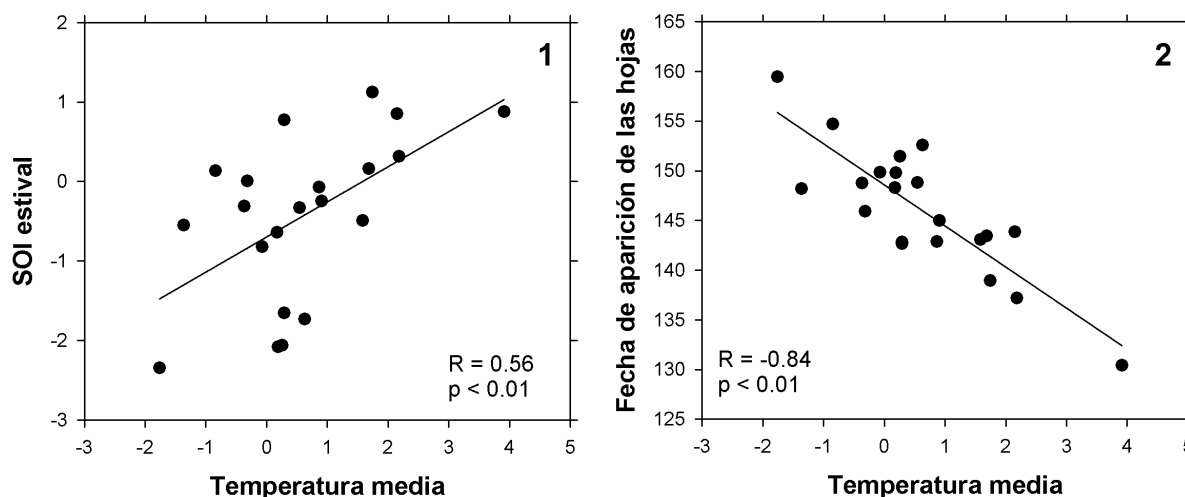


Fig. 5: Relación entre las temperaturas medias en abril-mayo, el SOI estival (1) y la fecha de aparición de las hojas en Siberia central (2).

La Figura 6 muestra la distribución espacial de las correlaciones entre el SOI estival y las temperaturas medias durante los meses de abril y mayo entre 1982 y 2002. Las correlaciones son positivas y significativas ($p < 0.01$) en amplias áreas de Siberia central, lo que implica que

las fases positivas (negativas) del SOI favorecen una más temprana (tardía) aparición de las hojas como consecuencia del control por parte del fenómeno ENSO de las temperaturas en esta región en primavera, siendo ello determinado por flujos dominantes del Oeste (Este).

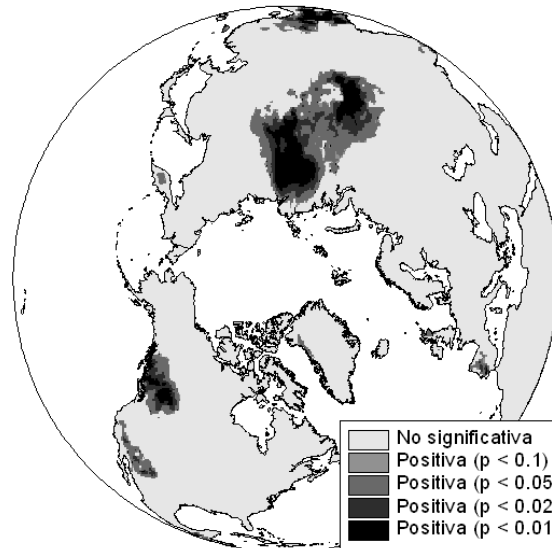


Fig. 6: Correlación entre el SOI del verano anterior y la temperatura media (Abril-Mayo) (1982-2002).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado como el fenómeno ENSO tiene una importante influencia sobre la variabilidad interanual en la fecha de aparición de las hojas en amplias áreas de bosques boreales de Siberia central. Fases cálidas en la temperatura oceánica en el Pacífico Este, características del fenómeno conocido como El Niño, se asocian con un retraso en la fecha de aparición de las hojas, mientras que el fenómeno contrario: La Niña (temperaturas frías en el Este del Pacífico) da lugar a una más temprana aparición de las hojas. Este comportamiento se explica por la influencia del fenómeno ENSO sobre los patrones de presión en superficie y los flujos que controlan la temperatura de superficie en Siberia central, pues la variabilidad de las temperaturas es el principal factor condicionante de la actividad vegetal en estas áreas (SUZUKI *et al.*, 2001).

Es importante indicar que la influencia del fenómeno ENSO sobre las fechas de aparición de las hojas en Siberia central ha sido identificada considerando los valores del SOI 8-9 meses antes de la aparición de las hojas, siendo ello muy importante con relación a la predicción de los intercambios de CO₂ entre la vegetación y la atmósfera.

Hay que señalar pues que futuros cambios en el fenómeno ENSO podrían dar lugar a importantes modificaciones en los ecosistemas boreales de Siberia. Este aspecto podría tener importantes consecuencias en los procesos de cambio global.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación del proyecto Siberia II (5º Programa Marco de la Comisión Europea).

6. REFERENCIAS

- AASA, A.; JAAGUS, R. y SEPP, M. (2004). "The influence of atmospheric circulation on plant phenological phases in central and eastern Europe". *International Journal of Climatology*, 24, pp. 1551-1564.
- BALDOCCHI, D. et al. (2002). "FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2415-2434.
- BUERMANN, W. et al. (2003). "Inter-annual covariability in Northern hemisphere air temperatures and greenness associated with El Niño-Southern Oscillation and the Arctic Oscillation". *Journal of Geophysical Research*, 108, 4396, doi : 10.1029/2002JD002630.
- DELBART, N.; KERGOAT, L.; LE TOAN, T.; L'HERMITTE, J. y PICARD, G. (2005). "Determination of phenological dates in boreal regions using Normalised Difference Water Index". *Remote Sensing of Environment*, 97, 26-38.
- DELBART, N.; LE TOAN, T.; KERGOAT, L. y FEDOTOVA, V. (2006). "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*.
- DYE, D.G., y TUCKER, C.G. (2003). "Seasonality and trends of snow-cover, vegetation index, and temperature in Northern Eurasia", *Geophysical Research Letters*, 30, pp. 1405-1408.
- HANLEY, D.E., et al., (2003). "A quantitative evaluation of ENSO indices". *Journal of Climate*, 16, pp. 1249-1258.
- JAMES, M.E. y KALLURI, S.N.V. (1994). "The Pathfinder AVHRR land dataset: an improved coarse resolution dataset for terrestrial monitoring", *International Journal of Remote Sensing*, 15, pp. 3347-3363.
- KOGAN, F.N. (2000). "Satellite-observed sensitivity of world land ecosystems to El Niño/La Niña". *Remote Sensing of Environment*, 74, pp. 445-462.
- MITCHELL, T.D., et al. (2003). *A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100)*. Working paper 55, Tyndall Centre for Climate Change Research.
- MYNENI, R.B., et al. (1997). "Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991". *Nature*, 386, pp. 698-702.
- REYNOLDS, R.W. y SMITH, T.M. (1995) "A high resolution global sea surface temperature climatology". *Journal of Climate*, 8, pp. 1571-1583.
- ROPELEWSKI, C.F. y HALPERT, M.S. (1987). "Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation". *Monthly Weather Review*, 115, pp. 1606-1626.
- ROPELEWSKI, C.F. y JONES, P.D. (1987). "An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review*". 115, pp. 2161-2165.
- SCHWARTZ, M.D.; REED, B.C. y WHITE, M.A. (2002). "Assessing satellite-derived start-of-season measures in the conterminous USA". *International Journal of Climatology*, 22, pp. 1793-1805.

- SUZUKI, R.; NOMAKI, T. y YASUNARI, T. (2001). "Spatial distribution and its seasonality of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate in Siberia". *International Journal of Climatology*, 21, pp. 1321-1335.
- TRENBERTH, K.E. (1997). "The definition of El Niño". *Bulletín of the American Meteorological Society*, 78, pp. 2771-2777.
- TRENBERTH, K.E. y HURRELL, J.W. (1994). "Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific". *Climate Dynamics*, 9, pp. 303-319.
- WHITE, M.A.; RUNNING, S.W. y THORNTON, P.E. (1999). "The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest". *International Journal of Biometeorology*, 42, pp. 139-145.
- ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B. y STRAHLER, A.H. (2004). "Climate controls on vegetation patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data". *Global Change Biology*, 10, pp. 1133-1145.