

ZONIFICACIÓN DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, BASADA EN LA RESPUESTA DE ECOSISTEMAS A OSCILACIONES CLIMÁTICAS

*Gandini Marcelo Luciano*¹

Lara Bruno Daniel^{1,2}

*Scaramuzzino Rosa*¹

*Castellar Celina*¹

¹ Facultad de Agronomía de Azul, UNICEN. ² CIC Provincia de Buenos Aires

mgandini@faa.unicen.edu.ar

Palabras clave: *MODIS, VEGETATION, Multivariado, ENSO*

Resumen

Los mapas ecológicamente definidos representan hipótesis acerca de los factores que controlan la estructura y el funcionamiento del ecosistema. Al establecerse en consecuencia una jerarquía de variables, es posible plantear hipótesis de manejo y predecir los resultados mediante modelos analíticos.

El objetivo del presente trabajo fue realizar una zonificación de la provincia de Buenos Aires, Argentina, utilizando cambios en la dinámica de su cobertura vegetal provocados por oscilaciones climáticas. Se trabajó con la información almacenada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) en forma de capas raster.

Las capas consistieron (luego de una evaluación de disponibilidades) en 19 variables bioclimáticas actuales (décadas 1950 a 2000) variables bioclimáticas de predicción de cambio climático según el modelo ccm3 (cambio global CO₂x2), e imágenes satelitales Terra MODIS (Serie temporal 2000-2010; 23 imágenes por año) y SPOT Vegetation (Serie temporal 2008-2010; 12 imágenes por año) con el índice de verdor (NDVI), calculado por las respectivas agencias espaciales. Las imágenes Vegetation se clasificaron en aquellas provenientes de años "El Niño", Neutros o "La Niña", y se co-registraron con las capas raster de variables bioclimáticas.

Los datos fueron exportados a un programa estadístico y se analizaron mediante Correlaciones Canónicas, definiendo como una de las matrices, a la diferencia entre los parámetros bioclimáticos actuales y los predichos por el modelo CCM3, y otra de las matrices, con los valores de NDVI de tres series de datos, correspondientes a los tres estados climáticos mencionados. De esta manera, se evaluó si existió correlación multivariada, entre los cambios climáticos predichos por los modelos globales (CCM3) y los cambios climáticos observados por efecto del ENOS (El Niño Oscilación Sur). La coherencia geográfica de estas correlaciones se analizó visualmente exportando los "scores factoriales" producto del análisis, y luego trazando los límites de zonas en la pantalla del ordenador. Seguidamente, utilizando una fuente de datos independiente como las imágenes MODIS se realizaron ajustes de los datos de NDVI a las regiones delimitadas, mediante el modelo TIMESAT y se analizaron 7 u 8 meses según el caso en los años de mayores contrastes ambientales, como eventos "El Niño" (Jun2002-Mar2003) Neutros (Jul2005-Feb2006) y "La Niña" (Ago2008-Feb2009). Posteriormente se realizó la delimitación de zonas ecológicamente homogéneas.

Sobre la base de los resultados de los análisis multivariados se delinearón zonas de comportamiento homogéneo en las tres variables canónicas (92% de correlación explicada). El análisis canónico arrojó un R de 0,92440 [$\text{Chi}^2(450)=1334E2$ $p<0,0001$] con Autovalores 0.85 ; 0.80; y 0,64 para los tres primeros ejes canónicos. Las variables que obtuvieron mayor carga sobre los ejes de correlación fueron: máxima Temperatura del mes más cálido, mínima del mes más frío y el rango anual de temperaturas. En el caso de los valores de NDVI, los meses Niño aportaron mayor correlación. Los resultados obtenidos con TIMESAT, indican que las distintas zonas se comportan de manera diferencial, apoyando la subdivisión realizada.

Introducción

La comprensión completa de la estructura y función del ambiente es particularmente dependiente de la disponibilidad de información confiable que permita a los responsables de la toma de decisiones usar un criterio científico más que intuitivo, como ocurre a menudo. Esto último ocasiona que muchas decisiones locales y proyectos de gran envergadura sean realmente experimentos que se llevan a cabo directamente sobre el ambiente, y no pasen por una etapa de evaluación que permita la toma de decisiones racionales. Esta información no consiste en vastas colecciones de datos, ni aún en su almacenaje y disposición en computadoras. Las raíces de estos desajustes ambientales no son el resultado de la falta de datos sino más bien de la carencia de interpretación y elaboración científica, y un flujo de información entre los diferentes componentes de un sistema complejo, como lo es el ambiente, donde la producción agropecuaria está inserta.

Gallopín (1982) analiza las posibilidades de dividir el espacio en regiones mediante métodos multivariados. Según este autor, una metodología objetiva para la regionalización es la subdivisión del área de estudio en Elementos Ambientales Unitarios (EAU) y un posterior agrupamiento o clasificación de los mismos mediante técnicas de análisis multivariado. Para el análisis de los datos existen varias técnicas multivariadas aplicables a la regionalización como Análisis de Componentes Principales, Análisis de Factores, Análisis de Agrupamiento (Cluster) y otros. A partir de cada una de éstas se obtienen distintos resultados (Nathan & McMahon, 1990), por lo que la elección de la técnica apropiada es de gran importancia para obtener resultados coherentes a los objetivos planteados.

Host et al. (1996) realizan una primera aproximación al desarrollo de clasificaciones de ecosistemas usando análisis de componentes principales, pero definen los límites de clasificación de una forma arbitraria (usando los límites de mapas escala 1:250000). Esta decisión puede llevar a que se subestime o sobrestime la varianza de variables que luego son usadas para definir los límites dentro de ecosistemas regionales.

Los mapas ecológicamente definidos representan hipótesis acerca de los factores que controlan la estructura y el funcionamiento del ecosistema; por otro lado, al establecerse una jerarquía de variables, es posible plantear hipótesis de manejo y predecir los resultados mediante modelos analíticos (ver: Hughes & Larsen, 1988, Nathan y Mc. Mahon, 1990, Beran et al. 1990).

Cada paisaje incluye un mosaico de factores que determinan la distribución espacial de la respuesta dinámica de los Agroecosistemas (Andersson y Sivertun 1991). Por otra parte, el hombre influye sobre ésta, modificando la cobertura vegetal y la infiltración de los suelos con sus prácticas agrícolas.

Esta investigación se centró, además de dividir el espacio de la provincia de Buenos Aires en unidades ecológicamente homogéneas y describir su comportamiento, proveer de herramientas que sean útiles a los tomadores de decisiones al momento en

que tengan que proponer alternativas de gestión y administración de los recursos naturales de la zona en cuestión. Pero, precisamente, que esas decisiones se hagan sobre un fehaciente e integral conocimiento del ambiente.

Materiales y Métodos

- Adquisición de datos. En este paso se adquirieron todas las capas de información necesarias para la regionalización, las que consistieron (luego de una evaluación de disponibilidades) en mapas de 19 variables bioclimáticas actuales (décadas 1950 a 2000; Hijmans et al. 2005) imágenes bioclimáticas de predicción de cambio climático según el modelo ccm3 (cambio global CO₂x2; Govindasamy 2003), imágenes satelitales históricas y actuales de distintas fuentes.
- Ingreso de los datos a un Sistema de Información Geográfica. En esta etapa se ingresaron los datos, ajustando y corrigiendo sistemas de coordenadas y proyecciones de las distintas fuentes.

Tratamiento de los datos mediante análisis multivariado

Se decidió luego de la prueba de diferentes análisis multivariados, utilizar un análisis de correlaciones Canónicas en base a resultados obtenidos con parte de la provincia (Gandini & Castellar 2011) usando como variables abióticas la diferencia entre los valores predichos por el modelo WCCM3 y los actuales, de 19 variables bioclimáticas, provenientes de las bases de datos mundiales de Hijmans et al (2005). De esta manera se intenta una zonificación en base a las correlaciones de la dinámica de la cobertura vegetal, con cambios ambientales.

Los valores de las variables “actuales” fueron comparadas con los datos simulados por Govindasamy (2003) para el cambio climático al año 2030, utilizándose la diferencia de las mismas para realizar la zonificación.

Por otro lado se obtuvieron imágenes Terra MODIS (Serie temporal 2000-2010; 23 imágenes por año) y SPOT Vegetation (Serie temporal 1998-2010; 12 imágenes por año). Con las segundas se analizó el efecto de las variaciones climáticas por efecto del fenómeno “El Niño”, y se decidió utilizar los años 2002-2003, 2005-2006, y 2008-2009 como representativas de los estados más relevantes de la docena de años considerada.

Validación de zonas ecológicamente homogéneas por variación del NDVI durante la última década

Utilizando una fuente de datos independiente como las imágenes MODIS se realizaron ajustes de los datos de NDVI a las regiones delimitadas, mediante el modelo TIMESAT (Elklundh y Jönsson 2009; Jönsson y Elklundh 2002, 2004) y se analizaron los años de mayores contrastes ambientales, como eventos “El Niño” (2002-2003) Neutros (2005-2006) y “La Niña” (2008-2009), encontrándose grandes diferencias en el comportamiento entre zonas.

Resultados y Conclusiones

Aspectos Metodológicos: El resultado del análisis de Correlaciones canónicas, se puede observar espacialmente, en sus primeras tres variables (dependientes e independientes) en la figura 1

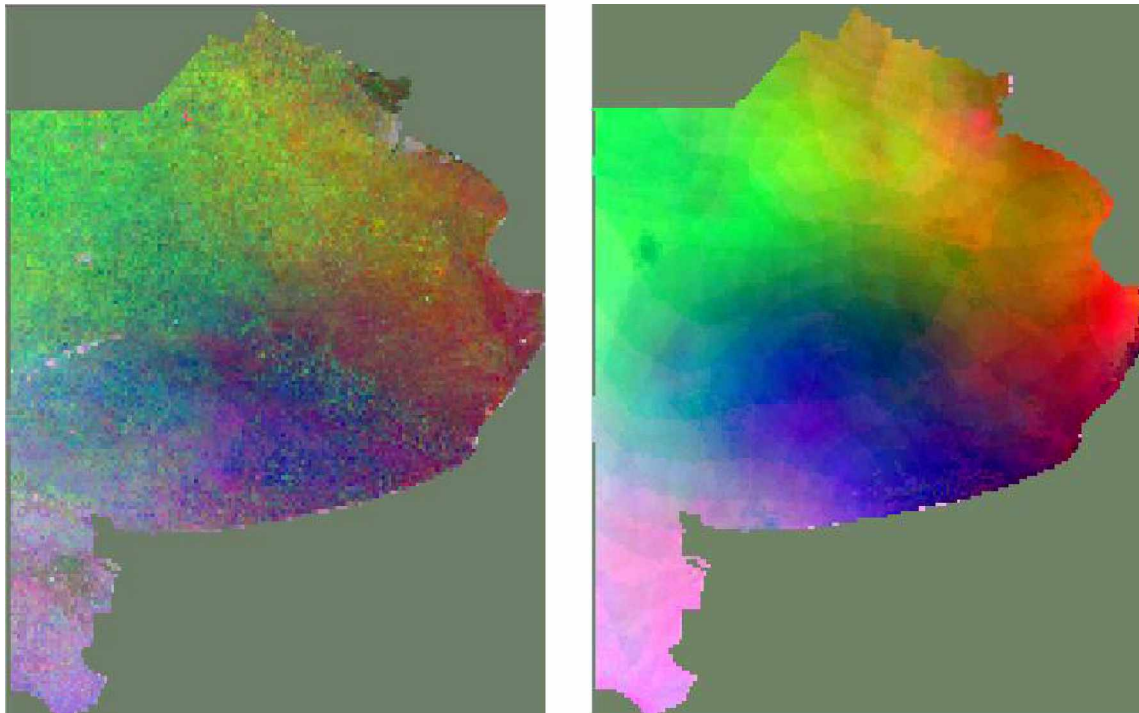


Figura 1: Imagen compuesta de los tres primeros ejes canónicos de variables Izquierdo: índice verde (variables dependientes) y derecho: variables bioclimáticas (independientes)

Posteriormente se realizó la delimitación de zonas ecológicamente homogéneas. Sobre la base de los resultados de los análisis multivariados se delinearon zonas de comportamiento homogéneo en las tres variables canónicas (92% de correlación explicada) (tabla 1 y figura 2). El análisis canónico arrojó un R de 0,92440 [$\chi^2(450)=1334E2$ $p=0,0000$] con Autovalores 0.85 ; 0.80; y 0,64 para los tres primeros ejes canónicos.

	NDVI	Bioclim
Nº variables	25	18
Varianza extraída	90,4013%	100,000%
Redundancia total	55,4731%	53,6415%

Tabla1: Resumen de análisis canónico. NDVI: eje de variables provenientes de valores de índice verde, Bioclim: eje de variables bioclimáticas.

Zonas agroproductivas de la Provincia de Buenos Aires

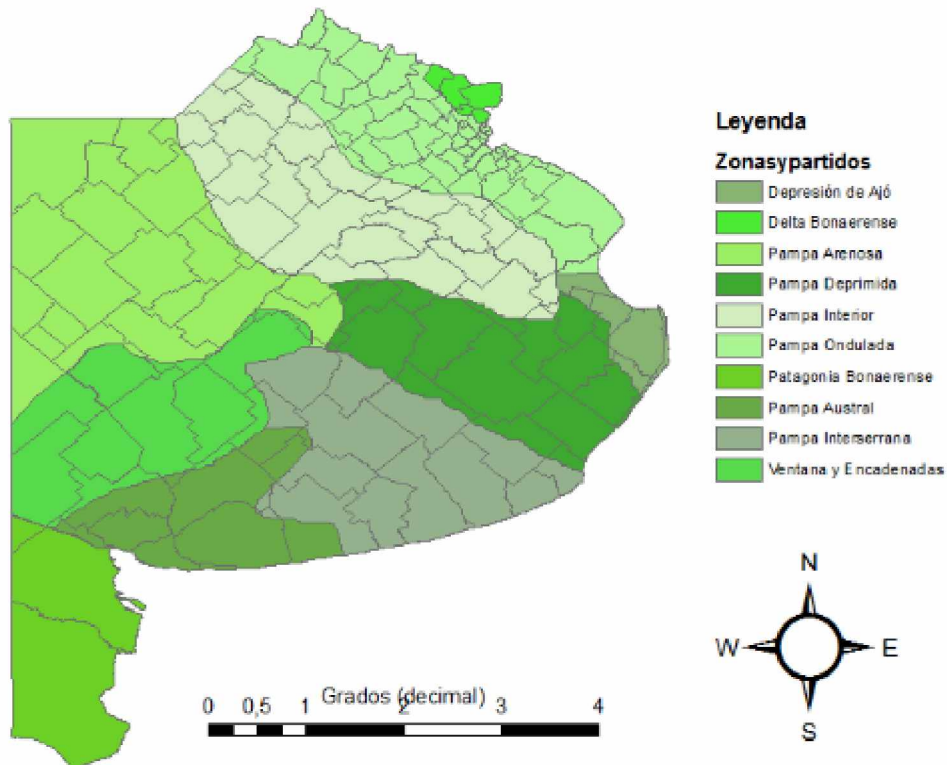


Figura 2: Zonas delimitadas (ver texto)

La comparación con resultados de regionalizaciones anteriores, indica una similitud importante entre aquellas realizadas por los fitogeógrafos y algunos de los límites encontrados. Frenguelli (1941), Parodi (1964), Cabrera (1968), Soriano y otros (1991); principalmente utilizan además de las comunidades vegetales los datos macroclimáticos como temperaturas medias anuales y/o precipitaciones para explicar las diferencias entre regiones. Una evaluación aparte es necesaria en la comparación con las regionalizaciones de Cabrera (1968) aunque la de mayor detalle para la provincia se presenta en la figura 3.

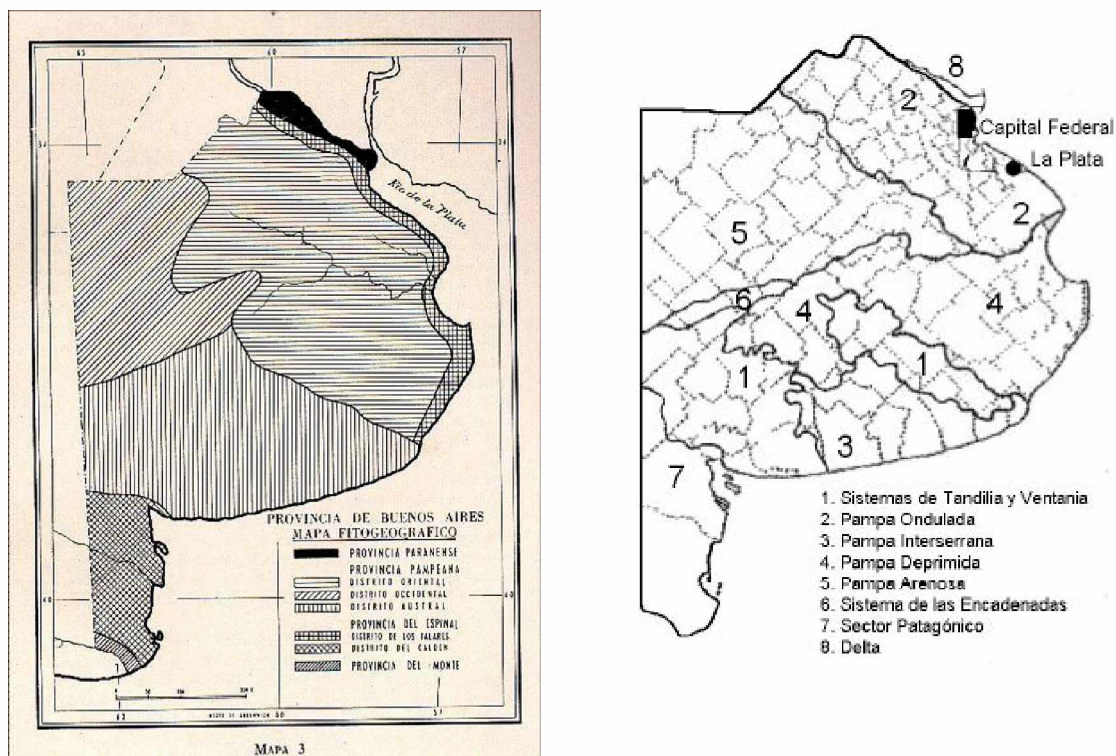


Figura 3: Izquierda: Regiones fitogeográficas de Cabrera (1968) y derecha: Regiones de Solbrig y Morello (1997) donde se observan los cordones serranos. Tomadas de los originales

Moscatelli (1991) realiza una subdivisión similar a la efectuada por este proyecto, basándose en suelos y clima regional, pero con ausencias como la región del delta bonaerense, y dando mayor peso a las zonas serranas y deprimidas lacunares.

Por otro lado, una zonificación en base a geomorfología y morfogénesis (Solbrig y Morello, 1997, figura 3) presenta la mayor similitud, pero con una gran diferencia: las zonas serranas de Ventania y Tandilia desaparecen en el mapa realizado en este proyecto. Esto puede ser explicado por el uso actual de la tierra de las zonas aledañas a las cadenas serranas. La explotación del suelo por distintos tipos de usos agrícolas llega a cubrir el pedemonte en su totalidad, dejando sin cobertura vegetal solamente los afloramientos rocosos.

Por último, Viglizzo y otros (2005) zonifican en base a los mismos parámetros que Parodi (1964) definiendo menor cantidad de zonas, y utilizando los partidos como elementos ambientales unitarios, consiguiendo un menor detalle que el autor citado. Este hecho lleva a desconocer el hecho de que existen partidos de la provincia con grandes diferencias ambientales como por ejemplo, los que contienen el piedemonte de las sierras de Tandilia como Olavarría, Azul, Tandil, y Balcarce principalmente.

Validación de la subdivisión regional:

Se analizaron para este objetivo diferentes parámetros de la curva de crecimiento anual de la curva de crecimiento de la vegetación: Inicio de la temporada de crecimiento, punto medio, duración y productividad, de cada pixel, usando datos del índice verde, de una serie temporal de imágenes MODIS 2000-2010.

Los resultados del ajuste de los modelos matemáticos indican un comportamiento diferencial de las distintas subregiones (figuras 4,5 y 6).

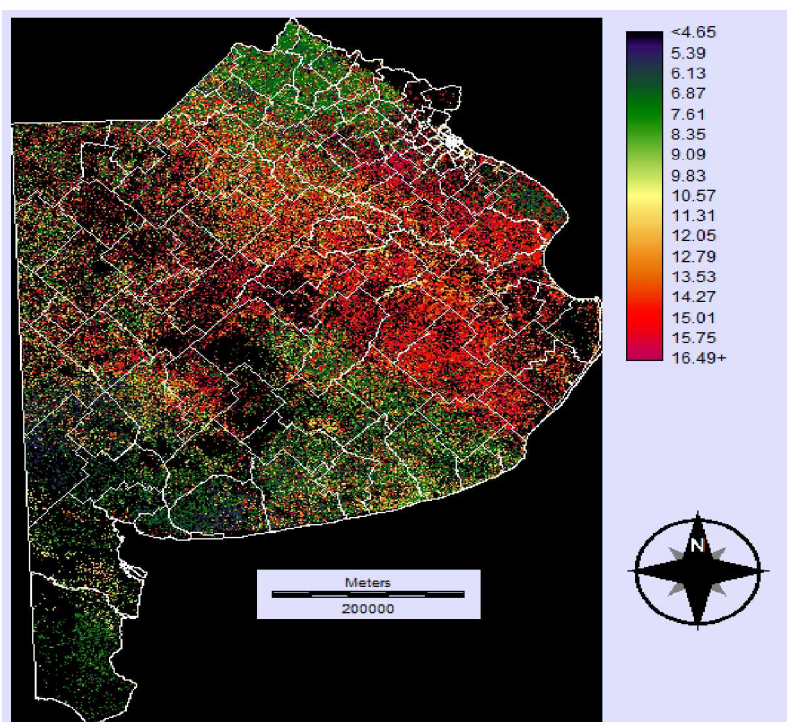


Figura 4a.: Duración de la temporada de crecimiento "El Niño" (2002-2003)

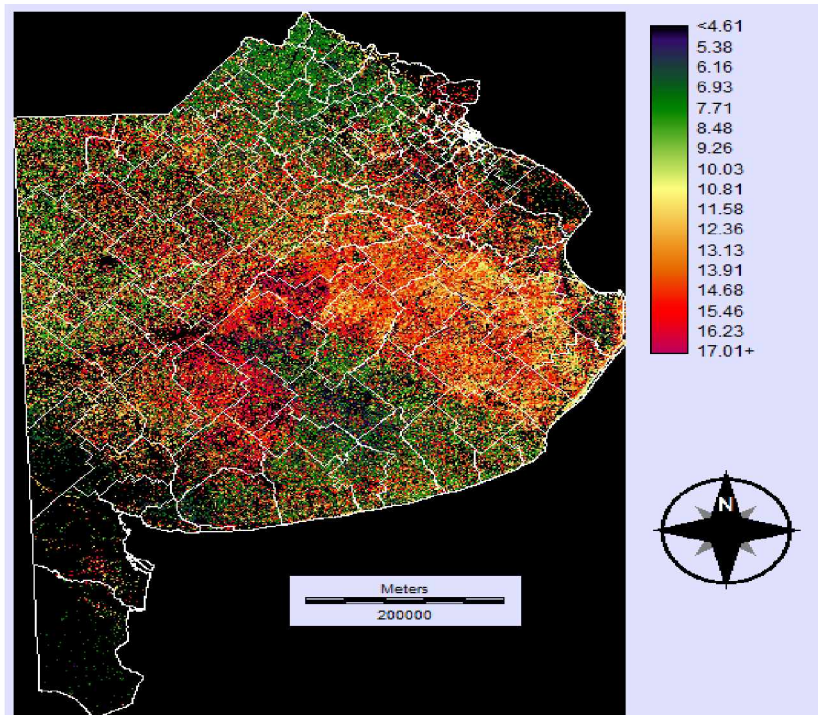


Figura 4b.: Duración de la temporada de crecimiento durante estado neutro (2004-2005)

Principalmente se observan variaciones muy marcadas en la respuesta de los ecosistemas en años de diferentes estados de la Oscilación Sur (ENSO) o sea años de Niño, Niña o Neutros.

En cuanto a la duración de la temporada de crecimiento (figuras 4 a, b, y c) se observa que abarca 16 imágenes (aproximadamente 256 días) existe un acortamiento significativo en el delta bonaerense en el año "El Niño" debido a la altura del río Paraná que afectaría la vegetación dejándola bajo agua, efecto que puede verse también en la depresión de Ajó. Es de notar también un efecto positivo del crecimiento vegetal principalmente en la zona patagónica y en la "Pampa Austral" comparado con otros estados climáticos (Neutro, Niña) por el corrimiento de las isoyetas (Viglizzo et al 2005).

En cuanto a la tendencia general de la duración de la temporada de crecimiento (Figura 4), se observa que en el año neutro, la duración de la temporada es mayor (280 días aproximadamente) en toda el área de estudio comparada con los eventos ENSO.

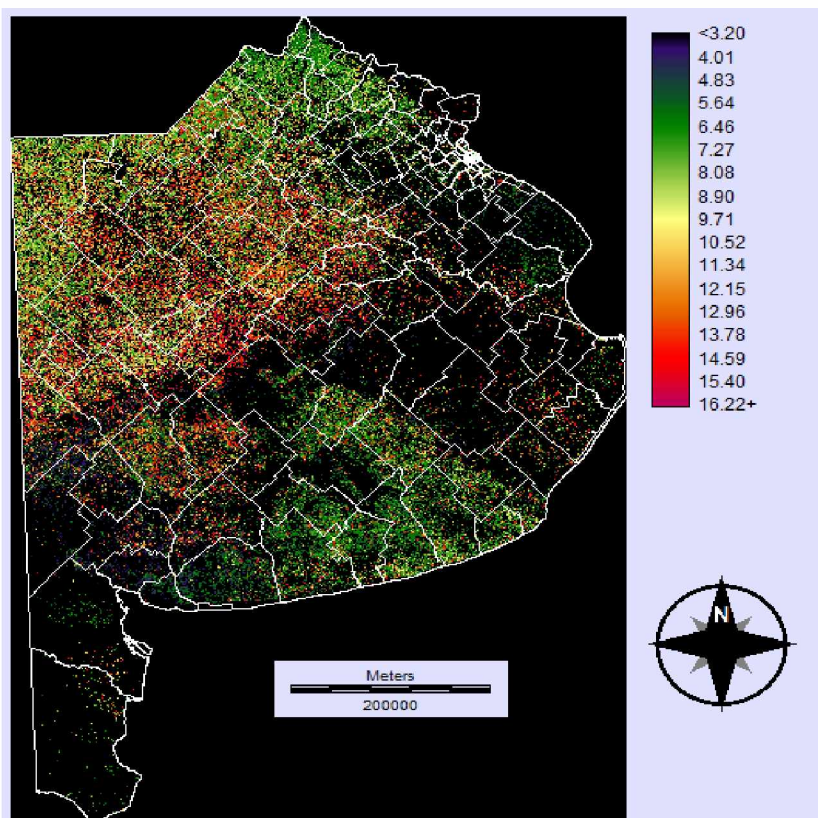


Figura 4c.: Duración de la temporada de crecimiento durante “La Niña” (2008-2009).

Cabe destacar el estado de reposo debido a la sequía, observado durante el año “Niña” en la “Pampa Deprimida” en el cual no se observa un crecimiento significativo de la vegetación a la escala de trabajo.

En cuanto al inicio de las temporadas de crecimiento (Figuras 5 a, b, y c), se observa claramente mayores valores al Norte de la provincia, principalmente relacionada con el comienzo de la temporada agrícola, aprovechando el período libre de heladas más prolongado. Por otro lado, durante el evento “Niño”, el crecimiento se retrasa en la “Pampa Arenosa” principalmente por las inundaciones ocurridas esos años. Durante “La Niña” La diferencia entre la zona Norte y la “pampa interserrana” es casi imperceptible, debido a la gran cantidad de heladas y la baja cantidad de agua en el perfil del suelo, que obligaron a retrasar la siembra de cereales.

En el caso de la productividad, las zonas que presentan mayores variaciones son las de “Patagonia” y la “Pampa deprimida”. Cabe aclarar en este punto que el cálculo de productividad se refiere a la integral del NDVI durante el año, por lo que en las zonas de uso ganadero, como las citadas, es evidente que existió productividad vegetal pero fue instantáneamente consumida por el ganado, produciéndose una alta presión sobre los pastizales. En el otro extremo, en el caso del período “Niño” La productividad primaria no pudo ser aprovechada por la producción ganadera, observándose una gran acumulación de biomasa.

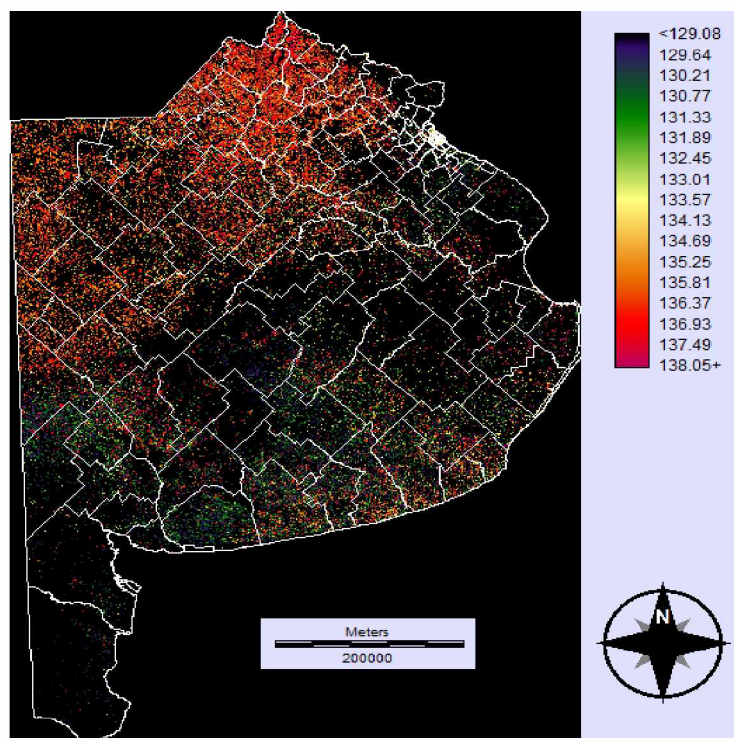


Figura 5a.: Inicio de la temporada de crecimiento en año “El Niño” (2002-2003).

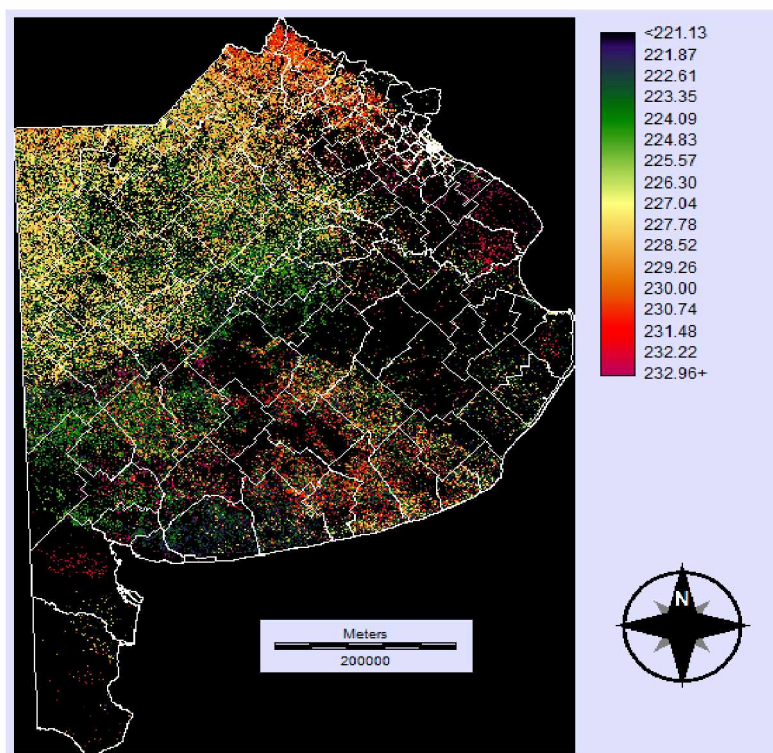


Figura 5b.: Inicio de la temporada de crecimiento durante estado neutro (2004-2005).

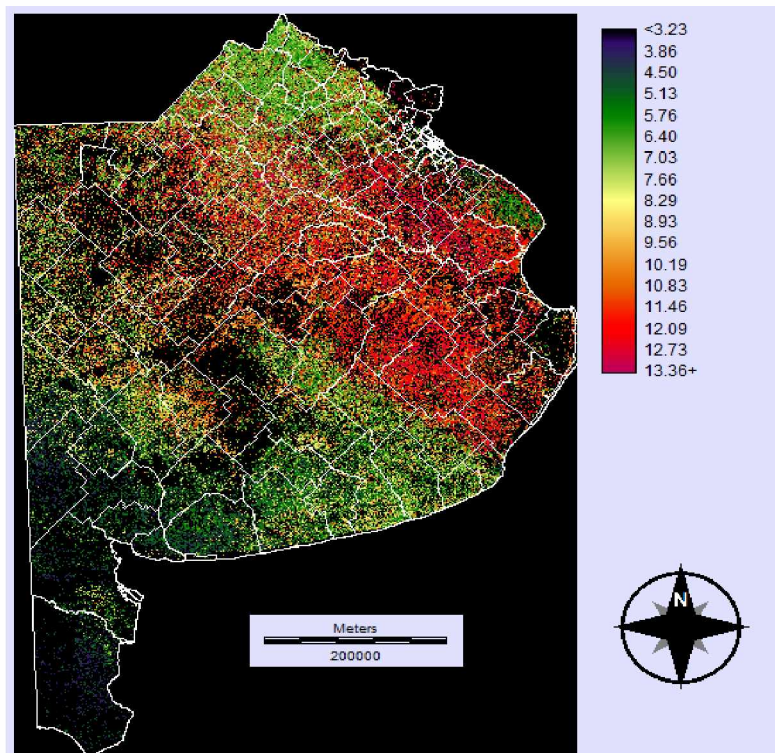


Figura 5c.: inicio de la temporada de crecimiento durante “La Niña” (2008-2009).

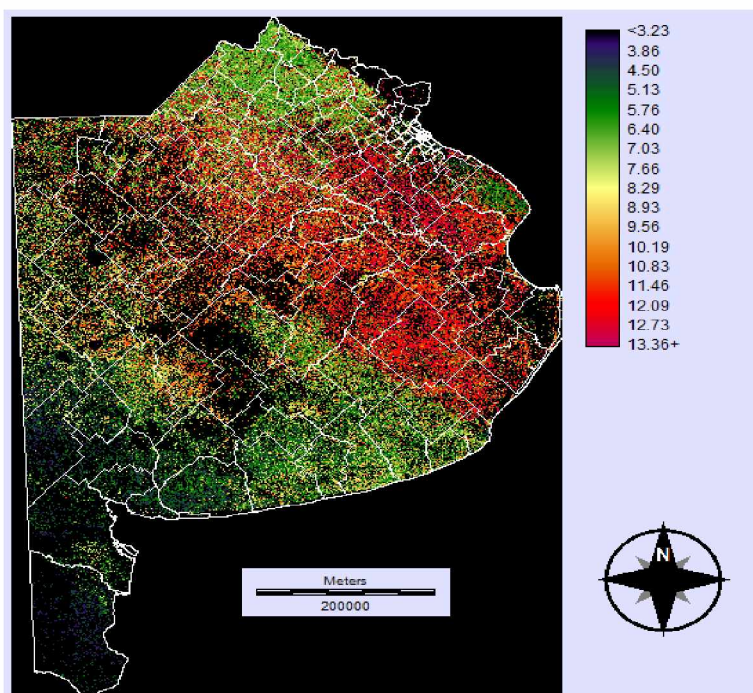


Figura 6a: Productividad de la vegetación en un año “El niño”(2002-2003)

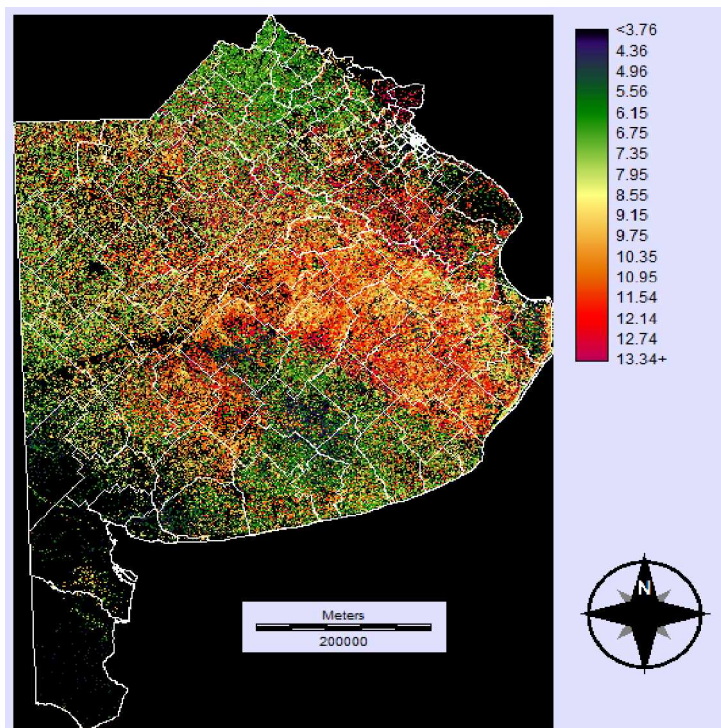


Figura 6b: Productividad de la vegetación en un año en estado neutro (2004-2005)

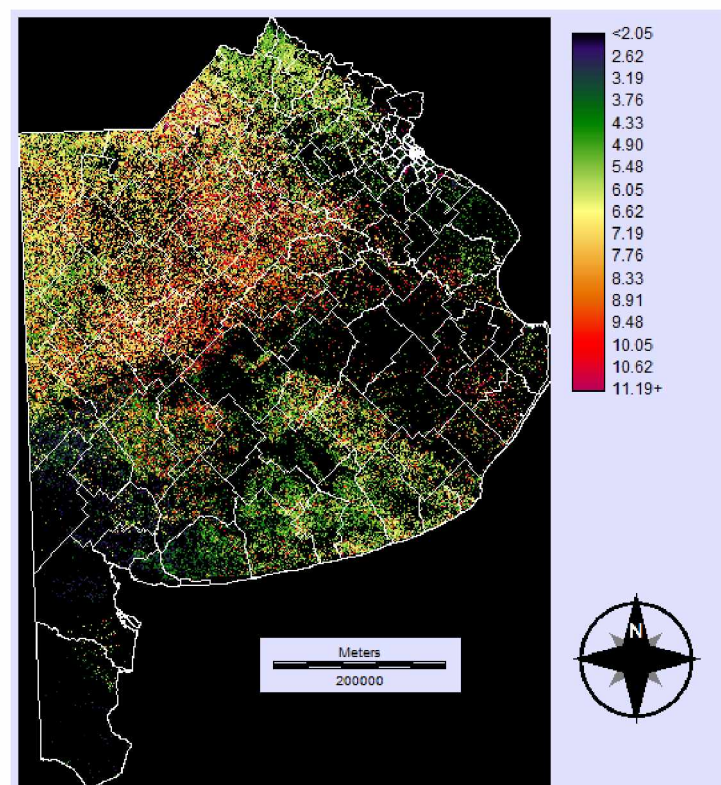


Figura 6c: Productividad de la vegetación en un año "La Niña" (2008-2009)

Discusión

En nuestro caso el uso de 19 variables bioclimáticas y sus diferencias temporales, favoreció la identificación de nuevas regiones, como la “Depresión de Ajo” y la “Pampa Austral”. En este sentido el trabajo realizado se considera superior a los disponibles hasta el momento principalmente por tres causas:

- ✓ La delimitación de un mayor número de regiones asegura una mayor homogeneidad al momento de la planificación agroproductiva provincial.
- ✓ La metodología utilizada, en base a la dinámica del índice verde, asegura un comportamiento similar en cuanto a productividad primaria de los agroecosistemas involucrados.
- ✓ El análisis de la dinámica tiene en cuenta factores como el uso actual de la tierra y la respuesta a los cambios climáticos (inundaciones y sequías) como los que afectaron a la provincia en épocas cercanas en el tiempo, provocados por el ENSO (El Niño South Oscillation).
- ✓ El uso de los valores de diferencia de los parámetros bioclimáticos asegura una delimitación de regiones que se comportarán homogéneamente frente a cambios climáticos, como las variaciones cíclicas (El Niño Oscilación Sur) como a tendencias (calentamiento global). De esta manera las políticas implementadas enfocarán hacia problemáticas similares.

Existe una similitud entre los límites de algunas zonas de este trabajo, y diferentes regionalizaciones delineadas durante el siglo pasado, aún siendo la presente realizada por una metodología totalmente independiente a las anteriores. Este hecho nos lleva a confirmar además los supuestos de trabajo planteados, como el hecho de que la cobertura vegetal, tanto natural como artificial (Cultivos) está respondiendo a nivel regional a forzantes principales como la Temperatura y las precipitaciones, en sus diferentes expresiones como parámetros bioclimáticos.

Con respecto a la validación de los resultados, queda pendiente un análisis más profundo, pero deja entreverse que las zonas delimitadas, tienen una respuesta diferencial a los factores bioclimáticos a lo largo de año, lo que afirma la hipótesis principal de trabajo.

En cuanto entonces, a la aplicabilidad de los resultados de validación, queda en evidencia que un análisis en base al funcionamiento, como el realizado, puede ser usado para predecir resultados de campañas Agrícolas, definir políticas de uso de la tierra, como regionalizar subsidios a distintos tipos de producciones, o simplemente realizar recomendaciones generales a nivel regional, basándose en predicciones del clima a corto plazo.

Agradecimientos

Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires: Aportó Hardware y software necesario para el procesamiento, e insumos varios por un subsidio especial del año 2010-2011.

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires: Logística, servicios y sueldos de los profesionales involucrados en el proyecto.

Por otra parte, se agradece a todos los equipos de trabajo que crean software de libre acceso (Ubuntu, Quantum GIS, Multispec, etc.), a la agencia espacial Europea por las imágenes Vegetation, principalmente a VITO (Bélgica) y al Servicio Geológico de los estados Unidos (USGS) por las imágenes MODIS.

Bibliografía

- ANDERSSON L. Y A. SIVERTUN. 1991. A GIS supported method for detecting the hydrological mosaic and the role of man as a hydrological factor. *Landscape Ecology* 5(2) 107-124.
- BERAN M.A., M. BRILLY, A. BECKERY Y O. BONACCI (ed.). 1990. Regionalization in Hydrology. IAHS, publicación N° 191. 260 págs.
- CABRERA, A. 1968. La vegetación de la Provincia de Buenos Aires. En: Flora de la Provincia de Buenos Aires. Colección Científica INTA 4(1): 101 - 134
- EKLUNDH, L. AND JÖNSSON, P., 2009, Timesat 3.0 Software Manual, Lund University, Sweden.
- FRENGUELLI, J. 1941. Rasgos principales de Fitogeografía Argentina. *Revista Museo La Plata. Nueva serie. Botánica* 3: 65 – 181
- GANDINI & CASTELLAR 2011. Last La Niña Affects Agroecological Systems of Argentine Pampas. 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring.
- GALLOPÍN G.C.. 1982. Una metodología multivariable para la regionalización ambiental-I. *Bases Metodológicas. Ecología Argentina* N° 7: 161-76.
- GOVINDASAMY, P. B. DUFFY, J. COQUARD, 2003. High-resolution simulations of global climate, part 2: effects of increased greenhouse cases. *Climate Dynamics* 21: 391–404.
- HIJMANS, R.J., S.E. CAMERON, J.L. PARRA, P.G. JONES AND A. JARVIS, 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- HOST G.E., P.L. POLZER, K.J. MLADENOFF, M.A. WHITE Y T.R. CROW. 1996. A quantitative approach to developing regional ecosystem classifications. *Ecological Applications* 6 (2): 608-618.
- HUGHES R.M. Y D.P. LARSEN. 1988. Ecoregions: an approach to surface water protection. *Journal Water Pollution Control Federation* 486-493.
- JONSSON, P. AND EKLUNDH, L., 2002, Seasonality extraction and noise removal by function fitting to time-series of satellite sensor data, *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 40, No 8, 1824 – 1832.
- JONSSON, P. AND EKLUNDH, L., 2004, Timesat - a program for analyzing time-series of satellite sensor data, *Computers and Geosciences*, 30, 833 – 845.
- MOSCATELLI, G. 1991. Los suelos de la Región pampeana 1-76 En: Barsky, O. El desarrollo agropecuario pampeano. INDEC- INTA – IICA. Grupo Editor Latinoamericano. 1 – 804
- NATHAN R.J. Y T.A. MCMAHON. 1990. Identification of Homogeneous Regions for the purposes of Regionalisation. *Journal of Hydrology*, N° 121: 217-238.
- PARODI, L. (1947). La estepa pampeana. En Hauman, L., Burkart, A., Parodi, L. Y A. Cabrera, A. La Vegetación de la Argentina. *Anales de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos* 8: 143–207
- SOLBRIG, O. Y J. MORELLO.(1997). Reflexiones generales sobre el deterioro de la capacidad productiva de la pampa Húmeda argentina. 1- 28. En: Morello, J. y Solbrig, O. Eds. *¿Argentina granero del mundo: hasta cuándo?* Orientación Gráfica Editora. 171- 183.

SORIANO, A, RJC LEÓN; OE SALA; RS LAVADO; VA DEREGBUS 1991. Rio de la Plata Grasslands. En: Copeland, RT (Ed.), *Ecosystems of the World. Natural Grasslands, Introduction and Western Hemisphere*. Elsevier, New York, pp. 367-407.

