

## **APLICACIÓN DE UNA SERIE TEMPORAL DE NDVI PARA EL ESTUDIO DE LOS ATRIBUTOS FENOLÓGICOS, EN EL PARTIDO DE AZUL<sup>1</sup>**

**Urrutia, Idoia<sup>1-2</sup> ; Gandini, Marcelo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigación y Servicios en Teledetección de Azul- Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Azul.

<sup>2</sup>Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), La Plata. E-mail: [idoia.urrutia@gmail.com](mailto:idoia.urrutia@gmail.com).

---

### Resumen:

Para el presente trabajo, se aplicó la técnica de series temporales de NDVI para estudiar la respuesta de los atributos fenológicos de los cultivos de soja, maíz, trigo, cebada/soja<sup>2</sup> y girasol, en presencia de tosca a distintas profundidades en sur del Partido de Azul. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales de NDVI provenientes de los sensores LANDSAT 8 OLI y TERRA MODIS (producto MOD13Q1). En el caso de las Landsat las imágenes fueron calibradas y rectificadas para el cálculo del índice de NDVI. En total se utilizaron 26 imágenes (18 de Landsat y 8 de MODIS) para representar un año agrícola (Abril 2014 – Abril 2015). El análisis de la serie temporal se realizó con el programa TIMESAT y la curva fenológica se ajustó con la función Savitsky-Golay. Los atributos fenológicos estudiados fueron cinco: comienzo de estación de crecimiento (CEC), fin de estación de crecimiento (FEC), duración de la estación (DEC), momento de máximo NDVI (t NDVI), valor máximo de NDVI (MAX) y la integral anual de NDVI (i NDVI). Los datos de tosca se midieron en campo con un barreno y se agruparon en cinco categorías: 1) 33,33-46 cm, 2) 46,26-59,16 cm, 3) 59,17-72,10 cm 4) 72,11-85 cm y 5) 85,01-97,92. Los resultados mostraron que el CEC, FEC y DEC en los distintos cultivos y lotes estuvo influenciado por el manejo agrícola (fecha de siembra). El análisis de profundidades, estuvo afectado por el número de píxeles contabilizados para cada rango de profundidad en todos los lotes, siendo muy marcado en el caso del maíz. En las parcelas con soja, trigo y girasol los atributos iNDVI y DEC mostraron valores significativamente mayores en los suelos más profundos. No se encontraron diferencias en los suelos sembrados con cebada/soja<sup>2</sup>.

Palabras clave: Landsat 8 OLI - Terra MODIS - Tosca – TIMESAT.

## **NDVI TIME SERIES APPLICATION TO STUDY PHONOLOGICAL ATTRIBUTES OF DIFFERENT CROPS, IN THE SOUTH OF DISTRICT OF AZUL**

### Abstract:

In this work, we applied the NDVI time series technique to analyses different phenological attributes of soybean, corn, wheat, barley/soybean 2 and sunflower in the South of district of Azul. For that, we built a NDVI time series fusing NDVI images from Landsat 8 OLI and NDVI -TERRA MODIS (product MOD13Q1). Prior to fusion, all Landsat images were calibrated and rectified. In total we used 26 NDVI images (18 Landsat and 8 MODIS) to represent a growing cycle (April 2014 - April 2015). The time series analysis was performed by TIMESAT program and the phenological curve was fitted according to the Savitsky-Golay function. Five phenological attributes were analyzed: start of growing season (BGS), end of growing season (EGS), season length (SL), time to maximum NDVI (t NDVI), maximum value of NDVI (MAX) and the annual integral of NDVI (iNDVI). The tuff layer was measured at field with a auger and then were classified in five group: 1) 33,33-46 cm, 2) 46,26-59,16 cm, 3) 59,17-72,10 cm 4) 72,11-85 cm y 5) 85,01-97,92. The results showed that CEC, FEC and DEC were influenced by agriculture management (sowing time) in all plots. On the other hand, we found that tuff depth analysis

---

<sup>1</sup> Recibido: febrero de 2016. Aceptado: septiembre de 2016

was affected by the number of pixels counted for each depth range, and it was important on the corn plot. In the field with soybean, wheat and sunflower the iNDVI and DEC attributes showed significantly higher values in the deeper zones. No differences were found in barley / soybean 2<sup>nd</sup> crops.

Key words: Landsat 8 OLI –Terra MODIS - Tuff – TIMESAT.

---

### *Introducción*

Las imágenes provenientes de sensores remotos tienen la capacidad de proporcionar información sobre importantes cambios que ocurren en la dinámica de la cubierta terrestre (Bocco, Sayago y Willington, 2014), por lo que supone una adecuada herramienta para la identificación de problemas dentro del territorio (Castro, Plant, Six y Peña, 2014). Sin bien, presentan una resolución espectral, espacial y temporal adecuadas, en ocasiones, el potencial de estas imágenes puede verse afectada por la presencia de nubosidad. Por ello, la fusión de imágenes provenientes de distintos sensores, como por ejemplo Terra-MODIS y Landsat OLI, resulta ser una adecuada solución para solventar dicha limitación, y la aplicación de esta técnica se extiende a diversos ámbitos como la estimación de GOO, las medidas de evapotranspiración, o para el estudio de los cambios fenológicos de la vegetación (Borini Alves, Montorio Llovería, Pérez-Cabello y Vlassova, 2015).

El Índice Verde de Vegetación (NDVI) mide el verdor de la vegetación y se relaciona con las propiedades estructurales de las plantas, como por ejemplo el índice de área foliar (Turner, Cohen, Kennedy, Fassnacht y Briggs, 1999). Las variables fenológicas estimadas a partir de series temporales de NDVI, pueden ser evaluadas en grandes áreas de forma rentable y eficiente mediante técnicas de teledetección (Castro et al., 2014), siendo una herramienta útil para detectar cambios y tendencias en los ecosistemas (Forkel, Carvalhais, Verbesselt, Mahecha, Neigh y Reichstein, 2013) a una escala local o regional. En agricultura estas variables también se utilizan para estimar las necesidades de riego de una parcela y el momento óptimo de aplicación. Sin embargo, debido a la complejidad de combinar información espectral y espacial en zonas agrícolas, la aplicación de esta herramienta ha sido escasa (Castro et al., 2014).

En el caso del Partido de Azul, existen evidencias de la aplicación de este método para el estudio del paisaje. En un trabajo realizado por Gandini y Entraigas (1995), el índice Verde (NDVI) fue utilizado como uno de los factores ambientales para diferenciar diferentes ecoregiones en el Partido de Azul. Vázquez, Zulaica y Requensens, (2012) estudiaron los cambios en el uso del suelo para la época 2002 – 2011 a través de imágenes satelitales Landsat 5 TM para el mismo partido. En otro trabajo realizado por Lara y Gandini (2014)

tuvieron como objeto de estudio analizar la fragmentación de pastizales en la Pampa Deprimida debido a la presión agrícola-ganadera a partir de series temporales.

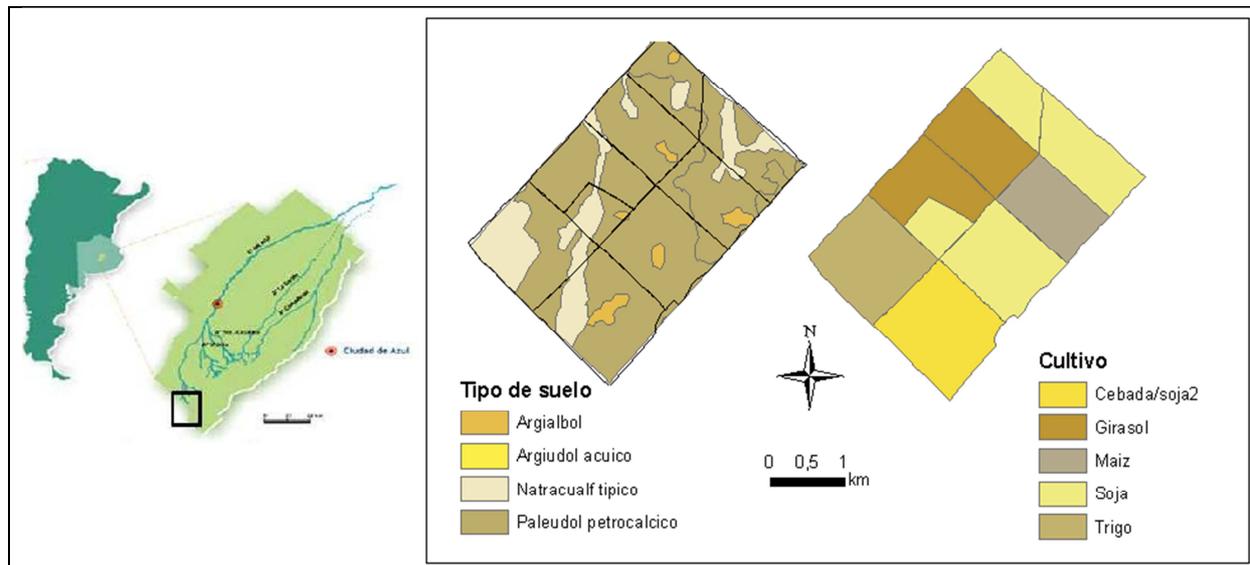
Sin embargo, pocas son las evidencias que muestran la relación entre los atributos fenológicos de los cultivos respecto a la presencia de tosca en el perfil del suelo, a través de series temporales de NDVI. En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue analizar la variación de las características fenológicas de distintos cultivos en un suelo con tosca a diferentes profundidades, en el sur del Partido de Azul. Mediante la combinación de imágenes de NDVI provenientes de los sensores Landsat8 OLI y TERRA-MODIS se construyó una serie temporal de NDVI con 26 imágenes para el año 2014/2015. Se analizó la variación de la respuesta fenológica de los cultivos soja, maíz, trigo, cebada/soja<sup>2º</sup> y girasol en relación a cinco profundidades de tosca presentes en el perfil del suelo, a través del programa TIMESAT. La profundidad de la tosca se determinó en campo con un barreno y se graficó empleando métodos geoestadísticos.

### *Materiales y métodos*

#### *Características de la zona de estudio*

El partido de Azul se localiza en el centro de la provincia de Buenos Aires, entre las latitudes 36° 8' y 32° 22' sur, y longitudes 58° 49' y 60° 10' oeste (Figura 1). El régimen de precipitación presenta un promedio anual de 900 mm, con máximas en la época primavera-verano. El relieve está constituido por una extensa planicie y zonas de pequeñas sierras en el límite sur, y surcado por diversos ríos que conforman la cuenca del río Salado. El uso agrícola predomina en la parte sur, siendo los principales cultivos el trigo, maíz, soja y los verdeos anuales. Al norte, la actividad predominante es la ganadería extensiva, excluyendo la actividad agrícola a pequeñas lomas tendidas. Los principales tipos de suelos (Clasificación según SoilTaxonomy, 1975) corresponden a suelos alcalinos y/o hidromórficos (Natracuoles y Natracualfes) y con presencia de tosca a poca profundidad en el norte del partido, y suelos con buen drenaje y tosca a distintas profundidades (Argiudoles) en la parte sur.

**Figura Nº1. Localización de las parcelas de estudio en el Partido de Azul**



Fuente: INTA, 1970-1989. Cartas de Suelos de la República Argentina. Instituto de Suelos, Buenos Aires. Digitalización propia a partir de los originales analógicos: datos de campo.

Izquierda: Mapa de tipo de suelos (Clasificación SoilTaxonomy, 1975) - Derecha: Mapa de cultivos

#### *Serie-temporal de NDVI para la determinación de atributos fenológicos*

La serie temporal de NDVI se construyó para la época marzo 2014 - abril 2015, abarcando una campaña agrícola, y en total se utilizaron 26 imágenes de NDVI (Tabla 1). Para este trabajo, por un lado, se utilizaron imágenes del sensor Landsat 8 OLI (resolución de pixel 30 metros) correspondientes a las escenas 225/85 y 225/86, las cuales fueron corregidas atmosféricamente para el posterior cálculo del NDVI. En total se utilizaron 18 imágenes de NDVI estructuradas por un intervalo de tiempo de 16 días. El índice de NDVI se calculó de la siguiente forma:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

(1)

Dónde:

NIR y RED son las bandas infrarroja y roja (banda 5 y banda 4 respectivamente) de Landsat 8 OLI.

Por otro lado, debido a que ocho imágenes de Landsat 8 OLI presentaron alta nubosidad, éstas fueron remplazadas por imágenes de NDVI del sensor Terra MODIS (Tabla Nº 1). Dado que los valores de NDVI calculados mediante un sensor y otro de las

distintas plataformas pudieron variar, se utilizó en el presente estudio como reemplazo, en las fechas en que no fue posible contar con imágenes Landsat 8 OLI, el producto MOD13Q1 de MODIS, que posee características de geometría solar y parámetros orbitales similares a Landsat (Yang, Hongbo, Yan, Y. y Jinyan, 2005). La compatibilidad de los datos puede asegurarse dado que durante el modelado de la serie de tiempo se usaron algoritmos que filtraron temporalmente el comportamiento de los píxeles individuales mediante el algoritmo de Savitzky-Golay que fue probado como el de mejor performance para la zona de estudio (Lara y Gandini, 2016). Este modelo se basa en las funciones polinómicas locales para suavizar los datos de la serie temporal y eliminar las perturbaciones, sustituyéndolas por una combinación lineal de valores vecinos dentro de una ventana definida por el usuario.

**Tabla N° 1. Lista de las imágenes satelitales empleadas para la construcción de la serie temporal de NDVI (con las fechas correspondientes)**

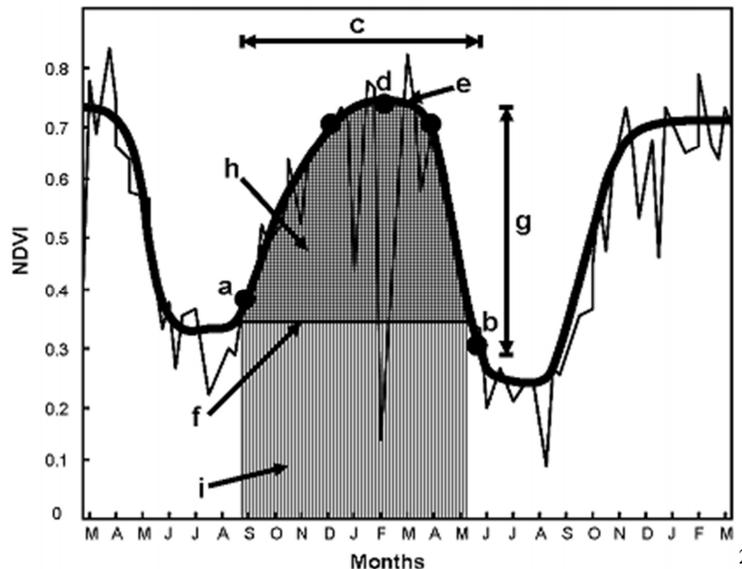
Nº imagen	Día juliano	Mes	Nº imagen	Día juliano	Mes
1	81	Marzo	14	289	Octubre
2*	97	Abril	15	305	Noviembre
3	113*	abril	16	321	Noviembre
4	129	Mayo	17	337	Diciembre
5	145	Mayo	18	353	Diciembre
6	161	Junio	19	4	Enero
7	177	Junio	20	20	Enero
8	193*	Julio	21	36	Febrero
9	209*	Julio	22	52	Febrero
10	225	Agosto	23	68*	Marzo
11	241	Agosto	24	84	Marzo
12	257*	Septiembre	25	100*	Abril
13	273*	Septiembre	26	116	Abril

\*Imágenes Landsat 8 OLI que fueron reemplazadas por imágenes de NDVI del producto MOD13Q1.

Fuente: Elaboración personal

El análisis de la serie temporal se realizó con el programa TIMESAT, desarrollado por Jönsson y Eklundh (2004). El programa TIMESAT está diseñado principalmente para el análisis de series de tiempo de datos satelitales y utiliza una adaptación del método de filtración de Savitsky-Golay y métodos basados en el ajuste ponderado a la porción superior a funciones Gaussianas asimétricas y dobles logísticas (Jönsson and Eklundh, 2002, 2004) para la determinación de la fenología de la vegetación (Figura N° 2).

**Figura Nº 2. Ejemplo de una curva de ajuste en el programa TIMESAT y los atributos fenológicos indicados con letras**



Fuente.: Jönsson and Eklundh, 2004.

Los atributos fenológicos derivados a partir de la curva fueron a) comienzo de estación de crecimiento (CEC), b) fin de estación de crecimiento (FEC), c) duración de la estación de crecimiento (DEC), d) momento de máximo valor de NDVI (tMAX), e) la integral anual de NDVI (i-NDVI) y f) valor máximo de NDVI ajustado por el modelo (MAX). Es considerado el inicio de estación de crecimiento cuando el NDVI logra un incremento sostenido de 20 % por encima del NDVI mínimo. El fin de estación de crecimiento es definido cuando el NDVI disminuye de manera sostenida y alcanza un valor superior al 20% respecto el NDVI mínimo.

#### *Obtención de datos de tosca de suelo y distribución de los cultivos*

Los datos de tosca fueron medidos en campo mediante barreno y localizados mediante un Sistema de Geo-posicionamiento Global (GPS). El área muestreado fue de aproximadamente 990 Ha y las parcelas se localizan en el sur de Partido de Azul, algunas de ellas pertenecientes al Partido de Benito Juárez. La figura Nº 3 muestra el diseño experimental del muestreo de la tosca en campo. La profundidad mínima obtenida fue de 33 cm y el máximo de 97 cm. La tabla Nº 2 muestra los rangos de profundidad que se

<sup>2</sup> Los puntos (a) y (b) marcan, respectivamente, el inicio y final de la temporada. Los puntos (c) y (d) dan el 80% del nivel superior. (e) muestra el punto con el valor más alto de NDVI. (f) muestra la amplitud de la temporada y (g) la duración de la temporada. Por último, (h) e (i) son las integrales que muestran el efecto acumulativo de la vegetación durante la temporada.

establecieron para el análisis.

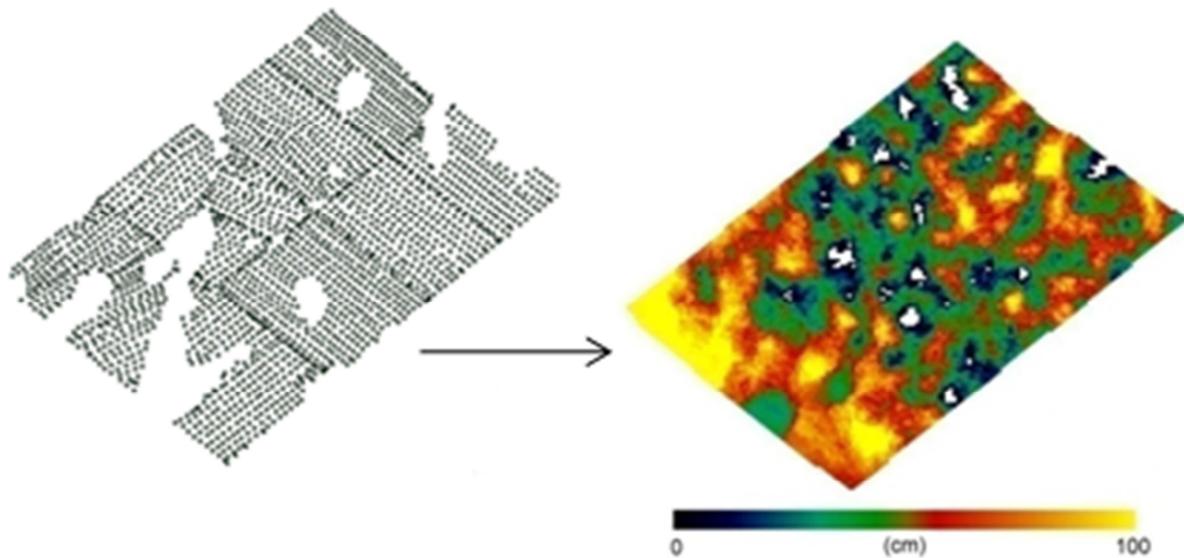
**Tabla N° 2. Intervalos de profundidad y sus correspondientes rangos**

<b>Profundidad (cm)</b>	<b>N° de rango</b>
33,33 – 46,25	1
46,26 – 59,16	2
59,17 – 72,10	3
72,11 – 85	4
85,01 – 97,92	5

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo.

A partir de los puntos muestreados se realizó un mapa de la distribución espacial de la tosca en la zona piloto (Figura N° 3). En este trabajo la semivarianza de la variable tosca fue estudiada a través del semivariograma experimental a partir del modelo esférico, el cual permitió identificar la estructura espacial de los datos. La validación del ajuste del semivariograma se realizó acorde a los siguientes indicadores: error medio (M, -0,025), error medio cuadrático (RMS, 23,64), error medio estandarizado (MS, -0,001), promedio del error estándar (ASE, 24,19) y error medio cuadrático estandarizado (RMSS, 0,97). Posteriormente, se procedió a realizar un kriging ordinario para la estimación de la tosca en los puntos no muestreados, considerando la estructura de correlación espacial del semivariograma experimental.

**Figura N° 3. Derecha: Diseño de los datos de tosca, cada punto corresponde a un punto de muestreo. Izquierda: Distribución espacial de la tosca (cm)**



Fuente: Elaboración propia.

La información de los cultivos de la zona de estudio fue proporcionada por el productor. Esta información fue digitalizada para construir un mapa de cultivos como se muestra en la figura N° 3 (mapa derecha).

#### *Análisis estadístico*

Se utilizó como base un análisis uni-direccional de varianza para probar la existencia de diferencias totales de las medias de los parámetros. El estudio de las diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) de los atributos fenológicos respecto a las categorías (profundidad) de tosca se realizó aplicando la función de Games-Howel (Xu, Zhang, Chen, Zhang, Inner, Wang, Yan, Zheng, Zhu, y Ranga, 2014). Esta prueba está diseñada para varianzas desiguales y tamaños de muestra desiguales, y se basa en la distribución estadística  $q$  (IBM). Las diferencias fueron evaluadas comparando cada profundidad (factor dependiente) respecto a las demás. Para este análisis se tuvieron en cuenta solo aquellas profundidades que mostraron una representatividad igual o mayor al 10% respecto al total de los píxeles.

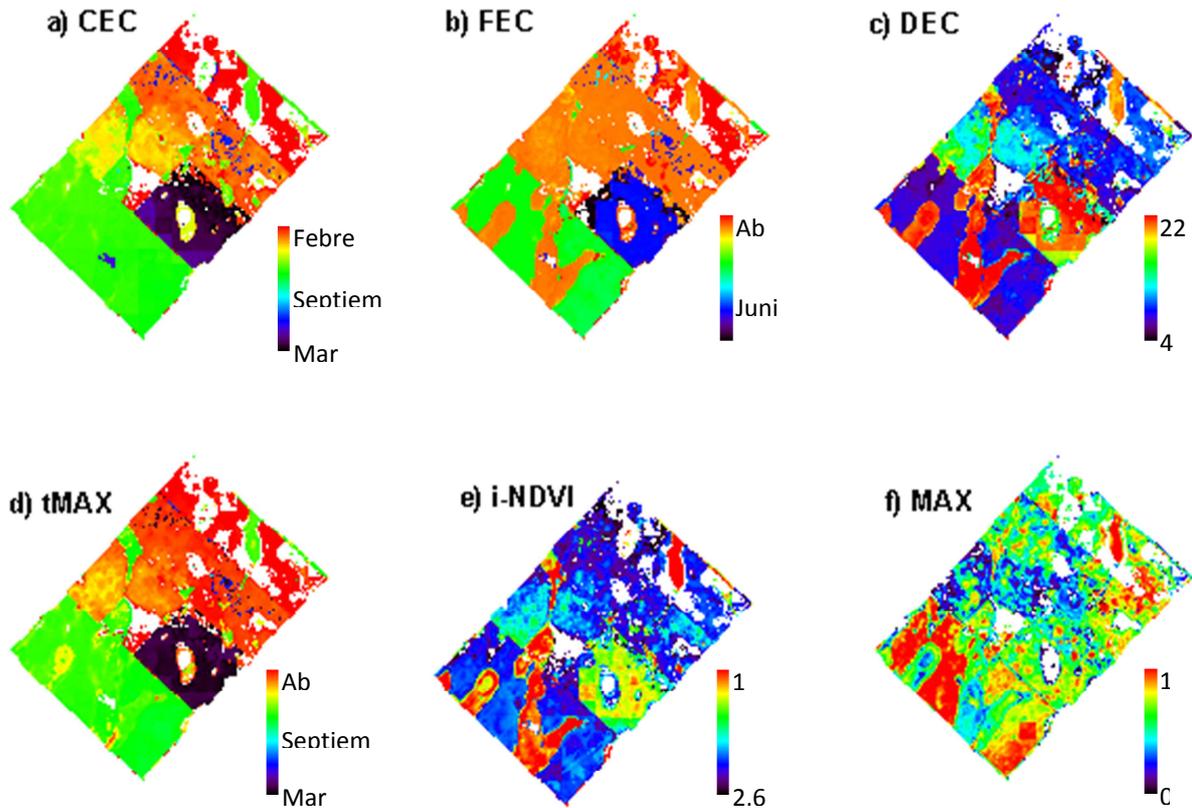
### *Resultados y discusión*

#### *Análisis espacial de los atributos fenológicos del cultivo de maíz, soja, trigo, cebada/soja<sup>2º</sup> y girasol.*

La figura N° 4 muestra los resultados correspondientes al análisis espacial de los atributos fenológicos en la zona de estudio. El comportamiento espacial estuvo relacionado con el tipo de cultivo presente en cada una de las parcelas, y en consecuencia del manejo agrícola. Los atributos relacionados con el calendario de cultivo como el CEC y FEC estuvieron influenciados por la fecha de siembra. El cultivo de trigo y cebada/soja<sup>2º</sup> fueron los primeros en sembrar (julio y agosto), por lo que mostraron un comienzo y fin de estación más temprana. Los cultivos de soja, maíz y girasol fueron sembrados en los meses de noviembre y diciembre. El FEC mostró un comportamiento acorde a las fechas de siembra.

En cuanto a la época de máximo valor de NDVI (tMAX), las parcelas con trigo y cebada/soja<sup>2º</sup> alcanzaron su máximo valor antes que los cultivos de soja, maíz y girasol. El girasol que fue sembrado un poco antes que la soja y el maíz mostró un tMAX más temprano. Los valores máximos de NDVI ajustados por el modelo Savitsky-Golay señalaron que las parcelas de trigo, cebada/soja<sup>2º</sup> y parte de una de las parcelas con soja alcanzaron mayores valores que en el resto de las parcelas (valores entre 0.65-0.9). Esto pudo deberse a la mayor profundidad de suelo alcanzado en estos lugares. Las zonas con menor profundidad tendieron a alcanzar valores de NDVI entre 0.5-0.6. El i-NDVI no mostró diferencias entre parcelas.

**Figura Nº 4. Distribución espacial de los atributos fenológicos para la zona de estudio**



CEC: comienzo de la estación de crecimiento. b) FEC: Fin de la estación de crecimiento. c) DEC: Duración de la estación de crecimiento (Expresado en días). d) t MAX: Momento de máximo valor de NDVI. e) i-NDVI: Integral anual de NDVI. f) MAX: Máximo valor de NDVI.

Fuente: Elaboración propia.

*Comportamiento fenológico del cultivo de maíz, soja, trigo, cebada/soja2º y girasol en relación a la profundidad de tosca*

La presencia de tosca en el perfil del suelo afecta en el volumen de suelo que puede ser explorado por las raíces de los cultivos, y además en muchas propiedades edáficas como la circulación y disponibilidad de agua, la aireación influyendo en la productividad de los cultivos (Bagnato, Álvarez, Scianca, Barraco, y Justo, 2011).

Los resultados estadísticos obtenidos mostraron que existe una alta variabilidad en el comportamiento de los atributos fenológicos de los cultivos según la profundidad de suelo disponible (Tabla Nº 3). En la parcela de maíz, el rango 4 mostró un comienzo y fin de crecimiento significativamente mayor que la profundidad 3 y 5, y mayor duración de

estación. El momento de máximo valor de NDVI, también fue estadísticamente mayor en la profundidad 4 que en la 3 y 5.

En el caso de la parcela con soja, si bien todos los rangos de profundidad de suelo tuvieron representación de píxeles, únicamente, las categorías 3, 4 y 5 fueron tomados en cuenta para el análisis estadístico. La categoría 3 mostró un CEC significativamente mayor que la categoría 4 y 5. Sin embargo, el FEC fue mayor en los suelos más profundos (categorías 4 y 5). La DEC fue estadísticamente mayor en la 5 que en la 4 (130 días y 122 días correlativamente). Los mayores valores de NDVI obtuvo el perfil de suelo más profundo (categoría 5, 0,82), al igual que la integral anual de NDVI (iNDVI). Bagnato et al. (2011) encontraron que los rendimientos de soja estuvieron influenciados por la presencia de la tosca y la napa, lo que afectó en la profundidad explorable para las raíces. Además, concluyeron que la variabilidad espacial de la tosca (tosca continua o tosca discontinua) afectó en los valores de rendimiento a nivel espacial.

En el caso del trigo, se encontraron diferencias significativas entre los rangos 4 y 5. La duración de la estación fue mayor en el suelo más profundo, al igual que la integral anual de NDVI. El cultivo de cebada/soja<sup>2º</sup> fue el que menos diferencias presentó. Aunque la CEC y FEC fueron mayores en los suelos más profundos, las diferencias no fueron significativas. Únicamente, el atributo MAX mostró una diferencia significativamente mayor en la profundidad 4 respecto a la profundidad 5. En general, presentó mucha homogeneidad. Finalmente, en el cultivo de girasol el CEC fue significativamente mayor en el rango 4 que en la 5 y un comportamiento similar se estudió para el FEC e iNDVI.

Los resultados obtenidos para este trabajo mostraron una relación entre la profundidad de suelo disponible y el comportamiento fenológico de los cultivos. En todo los cultivos excepto en el maíz, a mayor disponibilidad de suelo la duración de la estación fue mayor y la productividad primaria también mostró esta misma tendencia. Para el caso del maíz, Ross (2012) identificó que la variabilidad espacial del rendimiento del maíz respecto a la profundidad del horizonte calcáreo, fue mayor que el del trigo, relacionado por la mayor sensibilidad a cualquier estrés.

La correlación entre la profundidad a la que se encuentra la tosca y los valores de NDVI, podrían permitir identificar la ubicación de esta capa calcárea en el suelo de forma espacial, y con ello ayudaría en la selección de las parcelas para la producción de los cultivos. La presencia de diferencias significativas entre las profundidades de suelo más profundas podría significar que pequeñas variaciones en la localización de la tosca en el



perfil del suelo, pueden afectar en el desarrollo del cultivo. Esto se debe a que la tosca reduce la capacidad de almacenar agua en el suelo durante el ciclo del cultivo disminuyendo el rendimiento de los cultivos (Ross, 2012; Calviño y Sadras, 1999), así como la disponibilidad de algunos elementos (Brown y Albrecht, 1947). Además, la tosca no siempre aparece como una capa continua en el suelo. Ross (2012) encontró que en un mismo lote existían casos de tosca continua y tosca disgregada, mostrando que existen distintos micro-ambientes dentro de los lotes.

**Tabla Nº 3. Resultados estadísticos Games-Howel para los atributos fenológicos para el cultivo de maíz, soja, trigo, cebada/soja2º y girasol.**

<b>MAÍZ</b>													
Prof.	Nº	CEC		FEC		DEC.		MAX		tMAX		i-NDVI	
1													
2	2	17,95	±0,10	23,63	±0,00	90,8	±1,64	0,85	±0,00	20,38	±0,06	4,53	±0,23
3	165	17,37a	±0,20	23,23	±0,17	94,05	±1,53	0,80	±0,00	20,07a	±0,19	4,21	±0,05
4	791	16,66b	±0,12	22,79b	±0,11	97,71	±0,78	0,78	±0,00	19,28b	±0,13	4,49a	±0,02
5	107	17,56a	±0,27	23,4a	±0,17	93,56	±2,19	0,80	±0,00	20,28a	±0,23	4,25b	±0,06
<b>SOJA</b>													
Prof. cm	Nº	CEC		FEC		DEC.		MAX		tMAX		i-NDVI	
1	21	14,49	±0,47	23,37	±0,34	142	±6,49	0,82	±0,01	17,59	±0,81	6,77	±0,34
2	13	6,02	±2,15	14,55	±1,60	136	±11,0	0,81	±0,01	9,08	±1,94	5,61	±0,34
3	889	9,73c	±0,27	17,6c	±0,21	126	±1,31	0,78b	±0,00	13,07b	±0,28	5,17b	±0,04
4	1785	11,52b	±0,19	19,16b	±0,15	122b	±0,89	0,79b	±0,00	15,1a	±0,20	5,13b	±0,03
5	328	12,97a	±0,37	21,14a	±0,36	130a	±2,28	0,82a	±0,00	16,08a	±0,40	6,2a	±0,13
<b>TRIGO</b>													
Prof. cm	Nº	CEC		FEC		DEC.		MAX		tMAX		i-NDVI	
1	2	16,18	±2,60	22,61	±0,89	135,00	±27,4	0,68	±0,06	18,46	±2,83	5,70	±1,17
2													
3	157	13,31	±0,016	20,62	±0,17	139	±2,85	0,83	±0,005	16,36	±0,13	6,28	±0,11
4	756	13,48	±0,02	20,68b	±0,07	102b	±1,21	0,86a	±0,003	16,00	±0,04	4,85b	±0,04
5	725	13,36	±0,012	20,71a	±0,08	112a	±1,40	0,85b	±0,003	16,04	±0,02	5,22a	±0,05
<b>CEBADA-SOJA2º</b>													
Prof. cm	Nº	CEC		FEC		DEC		MAX		tMAX		i-NDVI	
1	5	12,48	±0,01	17,68	±0,02	108,52	±0,50	0,87	±0,01	14,53	±0,02	4,25	±0,05
2													
3	84	12,98	±0,01	20,3	±0,31	111,84	±4,60	0,8	±0,008	15,04	±0,12	5,31	±0,16
4	1222	12,71	±0,003	19,69	±0,08	112,66	±1,10	0,83a	±0,002	15,04	±0,05	5,20	±0,04
5	481	12,59	±0,005	19,57	±0,14	113,94	±1,70	0,8b	±0,003	15,04	±0,09	5,28	±0,06
<b>GIRASOL</b>													
Prof. cm	Nº	CEC		FEC		DEC		MAX		tMAX		i-NDVI	
1	1												
2	4	17,56	±0,40	23,57	±0,01	96	±6,65	0,74	±0,03	20,08	±0,22	4,17	±0,2
3	784	16,59a	±0,08	23,15	±0,07	104b	±0,77	0,73	±0,002	19,36	±0,09	4,48b	±0,03
4	1303	16,49b	±0,05	23,29	±0,03	108a	±0,61	0,72	±0,002	19,4	±0,06	4,60a	±0,02
5	154	16,02	±0,13	23,34	±0,08	117	±2,04	0,71	±0,008	19,22	±0,16	4,93	±0,08

Fuente: Elaboración propia.

Las letras indican diferencias significativas entre las categorías de profundidad ( $P < 0,05$ ). Siendo a mayor significancia que b y c.

Rangos de profundidad: 33,33 – 46,25 cm (1), 46,26 – 59,16 cm (2), 59,17 – 72,10 cm (3), 72,11 – 85 cm (4) y 85,01 – 97,92 cm (5). CEC: Comienzo de estación de crecimiento. FEC: Fin de estación de crecimiento. DEC: Duración de estación de crecimiento (días). MAX: Máximo valor de NDVI. t NDVI: momento de máximo NDVI. iNDVI: Integral anual de NDVI. Se tuvieron en cuenta los rangos de profundidad con representación mínima del 10 %.

### *Conclusiones*

A partir de una serie temporal de NDVI compuesta por imágenes de Landsat 8 OLI y Terra MODIS, fue posible elaborar una curva estacional de NDVI para describir el comportamiento fenológico de los cultivos de soja, maíz, trigo, cebada/soj<sup>2</sup> y girasol. Los resultados obtenidos para este trabajo mostraron que la aplicación de series temporales de NDVI, y la combinación de imágenes de distintos sensores, puede ser una herramienta adecuada para estudiar la relación entre las características de los suelos y el crecimiento de los cultivos. Si bien, se encontraron problemas de representación (número de píxeles) en algunas profundidades, las más representativas (rangos 4 y 5) mostraron diferencias significativas en cuanto a la respuesta fenológica de los cultivos.

Para el presente trabajo no se consideraron factores como por ejemplo prácticas agrícolas y propiedades edáficas, que podrían resultar de relevancia para mejorar los resultados en futuros estudios.

Si bien, el programa Timesat ha sido comúnmente utilizado para la determinación del calendario de cultivo en estudios agrícolas, el presente estudio demostró que este programa puede ser utilizado para otros fines distintos. El análisis del comportamiento de los atributos fenológicos podría ayudar de forma indirecta, en la localización de zonas que presentan limitaciones para el crecimiento de las plantas y aquellas zonas que son de mayor productividad, en lugares donde pueda existir algún limitante para el crecimiento de los cultivos. Este conocimiento podría ser de gran utilidad para los productores de cara al establecimiento y manejo de los cultivos en las parcelas, y para lograr una mejor utilización de los recursos.

### *Agradecimientos*

A la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICPBA) por la adjudicación de la beca de estudios que hizo posible el desarrollo de este proyecto.

*Referencias Bibliográficas*

- Bagnato, R., Álvarez, C., Scianca, C., Barraco, M. y Justo, C. (2011) Productividad de soja en suelos con presencia de capa freática y tosca en el Noreste de la Provincia de la Pampa. *Quinto Congreso de la Soja del Mercosur*, Rosario.
- Bocco, M., Sayago, S. y Willington, E. (2014) Cobertura de suelo por residuos de cultivos: modelos para su estimación a partir de imágenes satelitales. *6º Congreso Argentino de Agroinformática*, CAI.
- Borini Alves, D., Montorio Llovería, R., Pérez-Cabello, F. y Vlassova, L. (2015) Fusión de imágenes Terra-MODIS y Landsat-TM/OLI en el contexto del análisis del incendio forestal de Las Hurdes (Cáceres). *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, 521-530.
- Brown, D.A. y Albrecht, W.A. (1947) Plant nutrition and hydrogen ion: VI Calcium carbonate, a disturbing fertility factor in soils. *Soil Science Society Proceedings*, 12: 342-347.
- Calviño, P.A. y Sadras, V.O. (1999). Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Research*, 63 237-246.
- Castro, A.I., Plant, R.E., Six, J. y Peña, J.M. (2014) Mapas de calendario de cultivo y variables fenológicas mediante el análisis de imágenes MODIS y ASTER basado en objetos. *Revista de Teledetección*. Asociación Española de Teledetección, 41 29-35.
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M.D., Neigh, C.S.R. y Reichstein, M. (2013) Trend change detection in NDVI time series: effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*, 5 2113-2144.
- Gandini, M. y Entraigas, I. (1995) Ecorregiones del Partido de Azul. Facultad de Agronomía (UNC)-Programa Institucional de Investigación y Transferencia Tecnológica, *Publicaciones No 2*, 16 pp.
- Jönsson, P. y Eklundh, L. (2002) Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 4 1824-1832.
- Jönsson, P. y Eklundh, L. (2004) TIMESAT-a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*. 30 833-845.
- Lara, B. y Gandini, M. (2014) Quantifying the land cover changes and fragmentation patterns in the Argentina Pampas, in the last 37 years (1974 – 2011). *Geofocus*, 14 163-180 .
- Lara, B. y Gandini M. (2016) Assessing the performance of smoothing functions to estimate land surface phenology on temperate grassland, *International Journal of Remote Sensing*, 37 8 1801-1813.
- Ross, F. (2012) Densidad de plantas en maíz: Ajuste por ambiente. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* (NorthernLatinAmerica, Mexico and Central America). Vol 8:11-14.
- Turner, D.P., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Fassnacht, K.S. y Briggs, J.M. (1999) Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sens. Environ*, 70 52–68.
- Vázquez, P., Zulaica, L. y Requensens, E. (2012) Cambios en el uso del suelo rural del partido de Azul (Provincia de Buenos Aires, Argentina), durante el periodo 2002 – 2011. *IX Jornadas Nacionales de Geografía Física Bahía Blanca*. 23-33 pp.



- Xu, G., Zhang, H., Chen, B., Zhang, H., Inner, J., Wang, G., Yan, J., Zheng, Y., Zhu, Z. y Ranga, B.M. (2014). Changes in vegetation growth dynamics and relations with climate over China's landmass from 1982 to 2011. *Remote Sensing*, 6 3263-3283.
- Yang D., Hongbo S, Yan Y, Jinyan Z. (2015) MODIS-Landsat Data Fusion for Estimating Vegetation Dynamics – A Case Study for Two Ranches in Southwestern Texas. *Proceeding of 1st International Electronic Conference on Remote Sensing*, 22 June - 5 July 2015.