

## ANALYSIS OF NDVI, SAVI AND MSAVI<sub>2</sub> INDICES IN FUNCTION WITH THE HEIGHT OF THE TERRAIN IN CRESPO, ENTRE RÍOS

## ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES NDVI, SAVI Y MSAVI<sub>2</sub> EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DEL TERRENO EN CRESPO, ENTRE RÍOS

Leandro Ezequiel Kinderknecht<sup>1</sup>, Armando Benito Brizuela<sup>1,2</sup>, César Augusto Aguirre<sup>1,2</sup> & Alejandra Cecilia Kemerer<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Cátedra de Climatología Agrícola-SIG. Facultad de Ciencias Agropecuarias. UNER. (3101) Oro Verde, Ruta 11, Km 10,5. Entre Ríos. Argentina

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción (CICYTTP – CONICET), Materi y España s/n – E3105BWA, Diamante, Entre Ríos, Argentina

<sup>3</sup> Estación Experimental Agropecuaria Paraná (EEA INTA), Ruta 11 Km 12,5, Oro Verde, Argentina  
kinder\_87@live.com.ar

**ABSTRACT.** The advances in geospatial technology, remote sensing, geographical information systems and GPS have made possible new and numerous analysis of digital elevation models (DEM) and the images obtained by remote sensing. The vegetation indices obtained from the images and the DEM products allow progress in the understanding of the interaction between these indices and the characteristics of the terrain. The objective of the present work is the verification of the behavior of the NDVI, SAVI and MSAVI<sub>2</sub> indices depending on the height of the ground in the area covered by the topographic map of the IGN (sheet number 3360-3-1; Scale: 1:50000), to the south of the Department of Paraná in the Province of Entre Ríos (Argentina). The digital elevation model was developed from the level curves of the digitised topographic Charter. The terrain was categorized as low, medium and high according to 3 class intervals close to 33% each. The vegetation indices were obtained from the Operational Land Imager (OLI) sensor of Landsat 8 for the 22nd of February 2016. For the analysis of the vegetation indices, in the different categories of height, 30 polygons of land were vectorised as training sites that - according to their photointerpretation - correspond to batches with crops. With these polygons data is extracted from the indices for statistical analysis. A test was conducted to check the differences in the averages of the samples in the 3 classes. The results indicate that there are significant differences ( $n = 30$ ,  $p < 0.05$ ) between the mean NDVI of different categories of DEM. On the other hand the SAVI and MSAVI<sub>2</sub> indices show no significant difference when the middle and upper categories are analyzed. It was found that the highest values of 3 indices correspond to higher height values related to DEM. In turn, the lowest rates were in areas of lower altitude. It is concluded that in the study area and for summer crops, NDVI, SAVI and MSAVI<sub>2</sub> indices could be affected by terrain height.

**KEY WORDS.** GIS. Crespo. DEM. Vegetation index.

**RESUMEN.** El avance de la tecnología geoespacial, Teledetección, Sistemas de Información Geográfico y GPS han hecho posible nuevos y numerosos análisis a partir de modelos digitales de elevación (MDE) y de imágenes obtenidas por sensores remotos. Los índices de vegetación derivados de las imágenes y los productos de los modelos digitales de elevación, permiten avanzar en la comprensión de la interacción entre estos índices y las características del terreno. El presente trabajo tiene como objetivo comprobar el comportamiento de los índices NDVI, SAVI y MSAVI<sub>2</sub> en función de la altura del terreno en la Localidad de Crespo, correspondiente con la carta topográfica del IGN (hoja número 3360-3-1; escala: 1:50000), al sur del Departamento Paraná en la Provincia de Entre Ríos (Argentina). Se elaboró un modelo digital de elevación a partir de las curvas de nivel digitalizadas de la carta topográfica. El MDE fue categorizado en bajo, medio y alto de acuerdo a 3 intervalos de clase del 33% -aproximadamente- cada uno. Los índices de vegetación, fueron obtenidos de imágenes provenientes del sensor Operational Land Imager (OLI) del Landsat 8 correspondientes al día 22 de febrero de

2016. Para el análisis de los índices de vegetación, en las distintas categorías de altura, se vectorizaron 30 polígonos de lotes como sitios de muestra que - según la fotointerpretación - corresponden a lotes con cultivos. Con estos polígonos se extrajeron los datos de los índices para el análisis estadístico. Se realizó un test de diferencia de medias de las muestras para las 3 clases. Los resultados indican que existen diferencias significativas ( $n=30$ ,  $p < 0.05$ ) entre las medias de NDVI de las distintas categorías del modelo digital de elevación. Por otro lado los índices SAVI y MSAVI<sub>2</sub> no muestran diferencias significativas cuando se analizan las categorías media y alta. Se encontró que los valores más elevados de los 3 índices corresponden a valores más altos de altura de acuerdo al MDE. A su vez los índices más bajos se presentaron en áreas de menor altura. Se concluye que en el área de estudio y para cultivos estivales, los índices NDVI, SAVI y MSAVI<sub>2</sub> podrían resultar afectados por la altura del terreno.

**PALABRAS CLAVES.** SIG. Crespo. MDE. Índices de vegetación.

Recibido: 25 de Julio de 2017

Aceptado: 7 de Noviembre de 2017

## INTRODUCCIÓN

Desde la puesta en órbita de los primeros sistemas de adquisición de datos multispectrales se han multiplicado y diversificado las investigaciones, desarrollos y aplicaciones que cubren un espectro disciplinar amplio y novedoso. En el campo de los recursos naturales renovables y en el de la producción agrícola, en particular, se observa un dinamismo notable que da lugar a resultados que alcanzan mayor exactitud porque utilizan mejor resolución espacial, temporal y espectral en los datos que obtienen.

La disponibilidad de datos específicos, o de herramientas para obtenerlos, facilita abordar cuestiones como la influencia de la topografía del terreno en la producción de cultivos, el rol de las variables ambientales en la interacción suelo-planta-atmósfera o en la respuesta de las plantas expresada en índices de vegetación.

La asociación entre atributos, primarios o secundarios, de la topografía con rendimientos de cultivos es motivo de análisis principalmente en agricultura de precisión. Kravchenko & Bullock (2000) analizaron relaciones entre rendimiento y topografía del suelo en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y soja (*Glycine max* L.) para tres campañas agrícolas. Sostienen que la topografía es uno de los principales factores que determina el rendimiento. Además, a escala de lote, puede definir la variabilidad de la humedad, la materia orgánica, nutrientes, composición textural, entre otras propiedades del suelo. Mostraron que la elevación tuvo la mayor asociación con el rendimiento, los mayores rendimientos se observaron en las áreas más bajas.

## INTRODUCTION

Since the orbiting of the first systems for the acquisition of multispectral data, research, development and applications that cover an ample and novel disciplinary spectre have multiplied and diversified. In the field of natural, renewable resources and of agricultural production in particular a noteworthy dynamism has led to results that achieve a greater exactitude because the data obtained is of a better spatial, temporal and spectral resolution.

The availability of specific data or of tools to obtain them facilitates the approach to questions such as the influence of the terrain's topography in crop production, the role of environmental variables in the interaction between ground-plant-environment or in the response of plants expressed in vegetation indices.

The association between primary and secondary attributes of the topography with the performance of crops is what motivates analysis principally in precision agriculture. Kravchenko & Bullock (2000) analysed relations between performance and ground topography in corn crops (*Zea mays* L.) and soy (*Glycine max* L.) for three agricultural campaigns. They sustain that the topography is one of the principal factors that determine performance. Moreover, at land parcel scale the variability of humidity, organic material, nutrients, and textural

Utilizando atributos de elevación, pendiente, orientación, curvatura y flujo acumulado para estudiar las relaciones entre el rendimiento y la topografía, Kaspar *et al.* (2003) mostraron que en dos años con precipitaciones superiores a la normal el rendimiento se correlacionó positivamente con la elevación relativa y con la pendiente. En otro caso, con cuatro años de sequía, obtuvieron un modelo de regresión lineal múltiple utilizando la elevación relativa, la pendiente y la curvatura que explica el 78% de la variabilidad espacial del rendimiento.

A su vez, Jiang & Thelen (2004), consideran que los modelos digitales de elevación (MDE) pueden ser utilizados para explicar la variabilidad del rendimiento de maíz. Encuentran que el efecto combinado de atributos del suelo y de la topografía, en el período 1996-2001, explican entre el 28 y el 85% de la variabilidad del rendimiento observado en cultivos de maíz y soja.

De acuerdo a la delimitación de tres zonas potenciales de rendimiento, Peralta *et al.* (2013) evaluaron la relación espacial entre las variables derivadas de los MDE con la profundidad del suelo y el rendimiento de los cultivos, en un lote de 47 ha. Hallaron que la elevación y la profundidad de suelo explicaron entre un 67 y 90% de la variación del rendimiento de los cultivos.

Por su parte, Franco *et al.* (2012), analizaron y cuantificaron las relaciones entre atributos primarios y secundarios de la topografía y el rendimiento. Encontraron que para un lote de soja, de la campaña 2006-2007, las zonas con mayor altura presentaron rendimientos medios más bajos, mientras que zonas con menor altura presentaron rendimientos medios más altos. Obtuvieron diferencias significativas en los rendimientos medios en tres zonas de altimetría.

Si bien los estudios anteriores presentan similitud en los resultados que indican una asociación negativa definida entre rendimiento y elevación, no siempre se verifica. Da Silva & Silva (2008) señalaron la existencia de correlaciones positivas entre la elevación y el rendimiento, observado en dos de los 7 lotes de maíz estudiados de tres campañas.

Asimismo los trabajos señalan que los atributos de la topografía explican parte de la variabilidad de los rendimientos pero que intervienen otras variables, de suelo o del ambiente, que también influyen (Jiang & Thelen, 2004). El avance de la tecnología geoespacial, la Teledetección, los Sistemas de Información Geográfica y los GPS han hecho posible nuevos y numerosos análisis a partir de modelos digitales de elevación (MDE) que pueden ser utilizados para explicar la variabilidad del rendimientos (Franco *et al.*, 2012).

Los rendimientos de los cultivos están relacionados, entre otras, con las condiciones de sanidad o vigor en un período de días antes-durante-después de floración, que pueden ser monitoreadas mediante sensores remotos para evaluar su comportamiento temporal y espacial.

composition among other soil properties can be defined. Their work showed that elevation had an important association with performance and the best performances are observed in the lower areas.

Using attributes such as elevation, slope of the land, orientation, curvature and accumulated flow to study the relations between performance and topography, Kaspar *et al.* (2003), showed that in two years, with rainfall that was higher than normal, performance was linked positively with the relative elevation and with the slope. In another case, with four years of aridity, a model for multiple lineal regression was obtained using relative elevation, the slope and the curve explains 78% of the spatial variability of performance.

Moreover, Jiang & Thelen (2004), considered that the models of digital elevation (DEM) can be used to explain the variability of the performance of corn. They found that the combined effect of soil and topography attributes in the period 1996-2001 explain between 28 and 85% of the variability of performance observed in corn and soy crops.

According to the delimitation of three potential zones of performance, Peralta *et al.* (2013) evaluated the spatial relation between variables derived from the DEM with the depth of the soil and the performance of crops in a land parcel of 47ha. They found that the elevation and the depth of the soil explained between 67 and 90% of the variation of the performance of the crops.

In addition, Franco *et al.* (2012), analysed and quantified the relations between the primary and secondary attributes of the topography and performance. They found that for a land parcel of soy, in the campaign 2006-2007, the higher zones presented a lower average performance while the lower zones presented a higher average performance. Significant differences in the average performances in the three zones of altimetry were obtained.

Even though previous studies show similarities in the results that indicate a negative association between performance and elevation, it is not always verified. Da Silva & Silva (2008) pointed out the existence of positive co-relations between elevation and performance, observed in two of the 7 lots of corn studied in three campaigns.

Furthermore studies point out that the topographical attributes explain part of the variability of performance but that other variables, such as soil and environment, also have an influence (Jiang & Thelen, 2004). The advance of geospatial

Los índices de vegetación (IV) surgieron en la teledetección al utilizar algunas bandas del espectro electromagnético, ya que las hojas tienen baja reflectancia en la región del visible –por la absorción de la clorofila– y relativamente alta reflectancia en el infrarrojo cercano por la dispersión interna de las hojas. Probablemente el índice más utilizado en teledetección con mucha aceptación en la comunidad científica es el NDVI (Tucker, 1979) que es la diferencia normalizada de las bandas correspondientes al rojo y al infrarrojo cercano con valores entre -1 y 1; presenta la ventaja de ser un índice que se calcula de forma muy sencilla, tiene como desventaja su baja eficacia para normalizar el efecto del suelo y su menor sensibilidad a la presencia de vegetación densa (Gilbert, 1997).

$$\text{NDVI} = (\text{IRC}-\text{R}) / (\text{IRC}+\text{R}) \quad (1)$$

Diferentes trabajos muestran la relación entre el rendimiento de los cultivos y los índices de vegetación. Para el cultivo de maíz, De la Casa & Ovando (2007), observaron que los valores acumulados de NDVI presentaron una asociación positiva con el rendimiento y que durante la etapa reproductiva, el NDVI expresó una elevada asociación con el rendimiento. En el cinturón del maíz de EE.UU, Hayes & Decker (1996) utilizaron el índice de condición de la vegetación para estimar la producción de maíz. También Seiler (1997) analizó la variabilidad del estado de los cultivos y de los rendimientos de maíz, por departamentos en la provincia de Córdoba, Mika *et al.* (2002) en Hungría y Mkhabela *et al.* (2005) en cuatro regiones agroecológicas en Suiza. Estos autores han mostrado que los datos del NOAA-AVHRR pueden ser utilizados para obtener índices de vegetación que explican una parte sustancial de la variabilidad del rendimiento de maíz sobre grandes extensiones geográficas.

Mekliche *et al.* (2015) realizaron un experimento con varios genotipos de trigo y mostraron que el rendimiento de trigo y NDVI se asociaron entre sí. Rivas *et al.* (2011) hallaron una relación directa entre el rendimiento de trigo y el índice de vegetación (estimado a partir de una imagen Landsat 5 Thematic Mapper) y consideran que las variaciones del índice reproducen adecuadamente los cambios en el rendimiento de trigo. A su vez, para cereales de invierno, Zajac *et al.* (2013) encontraron regresiones significativas entre los rendimientos y los valores de NDVI medios para octubre y noviembre con un  $r^2$  0,82 y 0,79 respectivamente.

Con relación al cultivo de girasol, Farrell & Rivas (2008), concluyeron que el momento óptimo para estimar el rendimiento utilizando el producto MODIS/EVI es al inicio de antesis–mitad de floración y presentan una ecuación de ajuste lineal para estimar el rendimiento en la región centro de La Pampa. Mkhabela *et al.* (2011), evaluaron la posibilidad de utilizar MODIS-NDVI para pronosticar el rendimiento de 4 cultivos en

technology, teledetection, and GPS have enabled new and numerous analyses based on digital elevation models (DEM) that can be used to explain the variability of performance (Franco *et al.*, 2012).

Crop performance is related, among other things, with the conditions of health and vigour or in the number of days before-during-after flowering, that can be monitored through remote sensors to evaluate temporal and spatial behaviour.

The vegetation indices (VI) emerged through teledetection when using some bands of the electromagnetic spectre, given that the leaves have low reflectance in the region of the visible – for the absorption of the chlorophyll– and relatively high reflectance of the near infra red in the internal dispersion of the leaves. The most used index in teledetection with high acceptance by the scientific community is probably the NDVI (Tucker, 1979) which is the normalised difference of the bands corresponding to the red and the near infra red with values between -1 y 1; presenting the advantage of being an index that is calculated in a very simple way. Its disadvantage is the low efficiency in normalising the effect of the ground and its lower sensitivity to the presence of dense vegetation (Gilbert, 1997).

$$\text{NDVI} = (\text{IRC}-\text{R}) / (\text{IRC}+\text{R}) \quad (1)$$

Different studies show the relation between crop performance and the vegetation index. In the cultivation of corn, De la Casa & Ovando (2007), observed that the accumulated NDVI values presented a positive association with performance and, that during the reproductive stage, NDVI expressed an elevated association with performance. In the corn belt of the USA, Hayes & Decker (1996) used the index of the vegetation condition to estimate corn production. Seiler (1997) also analysed the variability of the state of the crops and of the performance of corn, in departments of the province of Córdoba, Mika *et al.* (2002) in Hungary and Mkhabela *et al.* (2005) in four agro-ecological regions in Switzerland. These authors have showed that the data of the NOAA-AVHRR can be used to obtain the vegetation indices that explain a substantial part of the variability of the performance of corn in vast geographical extensions.

Mekliche *et al.* (2015) carried out an experiment with various genotypes of wheat and showed that the performance of wheat and NDVI are linked. Rivas *et al.* (2011) discovered a direct relation between



las praderas canadienses y mostraron que los datos MODIS-NDVI pueden ser utilizados eficazmente para predecir el rendimiento del cultivo en las praderas canadienses. Borondo *et al.* (2016) trabajaron con los datos de MODIS-NDVI / Terra obtuvieron resultados que sugieren una correlación lineal entre valores anuales el NDVI y el rendimiento de maní en Senegal. Consideran que los resultados pueden mejorar al tomar datos para periodos más cortos.

Holzman & Rivas (2016) analizaron la aptitud del índice TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) para pronosticar el rendimiento del maíz. Para calcular TDVI se utilizaron el índice EVI y la temperatura superficial (LST), de MODIS/ AQUA, 1 km y el rendimiento de maíz corresponde a una gran zona agrícola de la pampa argentina.

Otro índice importante propuesto por Huete (1988) para tener en cuenta el efecto del suelo en el índice de vegetación NDVI, es el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) el cual incorpora un parámetro L que permite tener en cuenta el índice de área foliar. El SAVI minimiza tanto las variaciones espaciales y temporales en el comportamiento espectral del suelo y se ha encontrado útil en el análisis de la vegetación y en la continua evaluación cualitativa de las condiciones del suelo. La principal desventaja de este índice es la indeterminación de L con un rango de variación amplio, aunque Huete recomienda tomar un valor igual a 1 para densidades de vegetación bajas, 0,5 para valores intermedios y 0,25 para alta densidad.

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L) \quad (2)$$

Por otro lado, Qi *et al.* (1994) propone el índice MSAVI2 que resulta de incluir en la fórmula del SAVI una dependencia explícita de L con la cantidad de vegetación y elimina la necesidad de encontrar la línea de suelo.

$$MSAVI2 = \frac{2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - RED)}}{2} \quad (3)$$

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de los índices NDVI, SAVI y MSAVI2 en función de la altura del terreno en la Localidad de Crespo en la Provincia de Entre Ríos (Argentina), al sur del Departamento Paraná.

## MATERIALES Y METODOS

### Área de estudio

La Provincia de Entre Ríos se caracteriza por presentar un paisaje ondulado a suavemente ondulado, lo que muchas veces determina que dentro de un establecimiento agropecuarios, se observan variaciones de rendimiento entre las zonas de loma, media loma y bajo.

the performance of wheat and the vegetation index (estimated based on a Landsat 5 Thematic Mapper image) and considered that the variations of the index were reproduced adequately in the performance of wheat. In turn, for winter cereals, Zajac *et al.* (2013) found significant regressions between the performance and mean NDVI values for October and November with a  $r^2$  0,82 and 0,79 respectively.

In sunflowers' crops, Farrell & Rivas (2008), concluded that the optimum moment to estimate performance using the MODIS/EVI product is at the beginning of flowering–mid flowering and present an adjusted lineal equation to estimate performance in the central region of La Pampa. Mkhabela *et al.* (2011), evaluated the possibility of using MODIS-NDVI to predict the performances of 4 crops in the Canadian meadows and showed that the MODIS-NDVI data can be used efficiently to predict crop performance in these areas. Borondo *et al.* (2016) worked with the MODIS-NDVI data / Terra obtained results that suggest a lineal correlation between annual NDVI values and the performance of peanut in Senegal. They consider that the results can be improved, by collecting data in shorter periods.

Holzman & Rivas (2016) analysed the aptitude of the TVDI index (Temperature Vegetation Dryness Index) to predict the performance of corn. To calculate TDVI they used the EVI index and superficial temperature (LST), of MODIS/ AQUA, 1 km and the performance of corn corresponds to a large agricultural zone of the Argentine Pampa.

Another important index proposed by Huete (1988) is to be taken into account regarding the effect of the soil on the NDVI vegetation index; it is the vegetation index adapted to the soil (SAVI) which incorporated the parameter L which allows accounting for the foliar area index. The SAVI minimises the spatial variations as much as the temporal variations in the spectral behaviour of the soil and it has been found to be useful in the analysis of the vegetation and in the continued qualitative evaluation of the soil conditions. The principal disadvantage of this index is the non determination of L with a range of ample variation even though Huete recommends taking a value equal to 1 for densities of low vegetations, 0,5 for intermediate values and 0,25 for high density.

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L) \quad (2)$$

El área de estudio presenta una superficie de aproximadamente 435,5 km<sup>2</sup> y abarca la zona suroeste del Departamento Paraná como así también un sector menor al Norte del Departamento Diamante en la Provincia de Entre Ríos (Argentina) (Fig. 1). Corresponde a la carta topográfica del IGN (hoja número 3360-3-1; escala: 1:50000) de la Localidad de Crespo.

El clima de la región es templado húmedo de llanura con una temperatura media anual que ronda los 18.4°C; mientras que las precipitaciones anuales oscilan entre los 1100-1200 mm (Paparotti & Gvozdenovich, 2007).

El paisaje corresponde a una peniplanicie con relieve suavemente ondulado a plano. Ésta posee un rango de pendientes variables que oscilan entre 0,5 y 10 % en ciertos lugares. Los suelos de la zona son en su totalidad del orden de los Molisoles, siendo en su mayor proporción argiudoles ácuicos ubicados en zonas bajas y medias y en menor medida argiudoles vérticos, ubicados en zonas medias y altas.

En la región la producción agrícola es principalmente de secano y se utiliza la siembra directa como práctica habitual y los cultivos extensivos estivales por excelencia son en primer lugar el cultivo de soja (*Glycine max*) y en segundo lugar el Maíz (*Zea Mays*).

#### Modelo digital de elevación

En función de la carta topográfica del IGN de la Localidad de Crespo, se digitalizaron las curvas de nivel. Luego se transformaron dichas curvas (vector de líneas) a un vector de puntos, para su interpolación. Con el vector de puntos se generó un MDE obteniendo

On the other hand, Qi *et al.* (1994) propose the index MSAVI<sub>2</sub> that results in including an explicit dependence of L with the quantity of vegetation in the formula and eliminates the need to find the soil line.

$$MSAVI_2 = \frac{(2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - RED)})}{2} \quad (3)$$

This study's objective is analysing the behaviour of the NDVI, SAVI and MSAVI<sub>2</sub> indices relating to the height of the land in a locality in Crespo in the Province of Entre Ríos (Argentina), to the South of the Department of Paraná.

## MATERIALS AND METHODS

### Area of study

The Province of Entre Ríos is characterised by a landscape that goes from undulating to gradually undulating, which in agricultural establishments often determines variations in performance that can be observed between knolls, medium level and lower level zones. The study area presents a surface of approximately 435,5 km<sup>2</sup> and covers the southwest zone of the Department of Paraná as well as a minor sector to the North of the Department of Diamante in the Province of Entre Ríos (Argentina) (Fig. 1). The area corresponds to the topographical map of the IGN (page number 3360-3-1; scale: 1:50000) of the locality of Crespo.

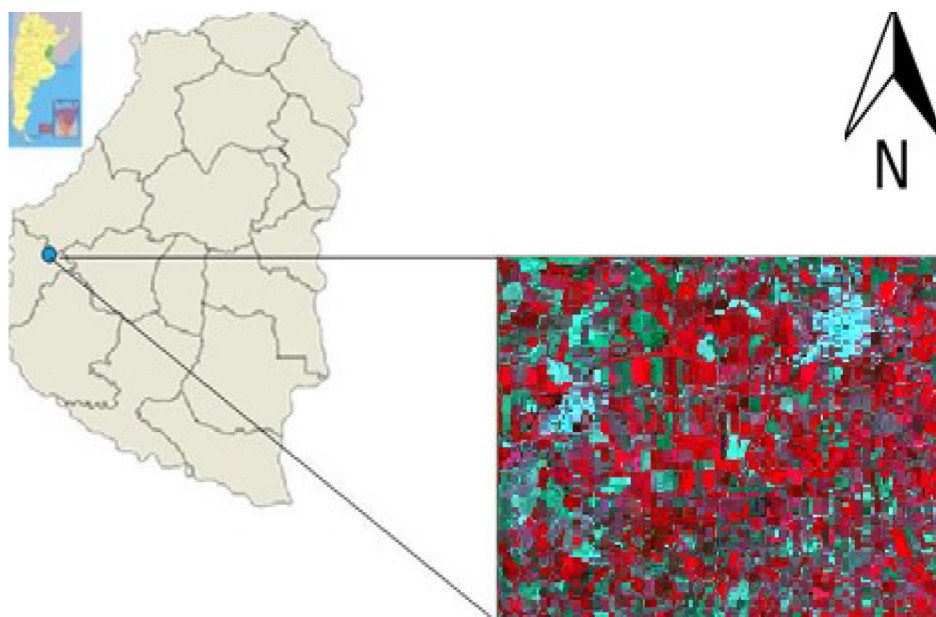


Figure 1. Geographic location of the study area.

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio

un archivo en formato raster con una resolución espacial de 10 m x 10 m.

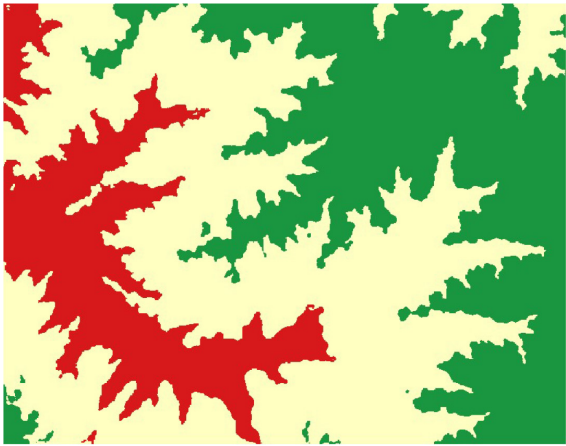
Posteriormente el MDE fue categorizado en: bajo, medio y alto (Fig. 2) de acuerdo a 3 intervalos de clase del 33.3% cada uno, teniendo en cuenta el histograma de frecuencias.

**Imágenes Landsat**

Se obtuvieron las imágenes provenientes del sensor Operational Land Imager (OLI) del Landsat 8 correspondientes al día 22 de febrero de 2016. Se realizó la corrección atmosférica de las bandas y se extrajo un recorte del área en estudio, obteniéndose una imagen con 792 columnas x 622 filas. Para la elaboración de los índices NDVI, SAVI y MSAVI<sub>2</sub> fueron utilizadas las bandas 4 y 5 de dicha escena correspondiente a las bandas del rojo e infrarrojo cercano respectivamente. Finalmente en proyección Posgar 98 Faja 5, se calcularon los índices de vegetación NDVI, SAVI y MSAVI<sub>2</sub> (Fig. 3)

Para el análisis de los índices de vegetación, en las distintas categorías de altura, se vectorizaron 30 polígonos de lotes como sitios de muestra en función de una imagen en falso color compuesto (Fig. 4) de la fecha en estudio que - según la fotointerpretación - corresponden a lotes con cultivos. Para cada una de las categorías definidas del MDE se procedió a obtener la media aritmética de todos los polígonos.

Para conocer si los índices presentan diferencias en función de la altura del terreno se realizó una comparación de medias, de los índices para las 3 alturas. Los valores medios de los índices se obtuvieron de los polígonos de muestra.

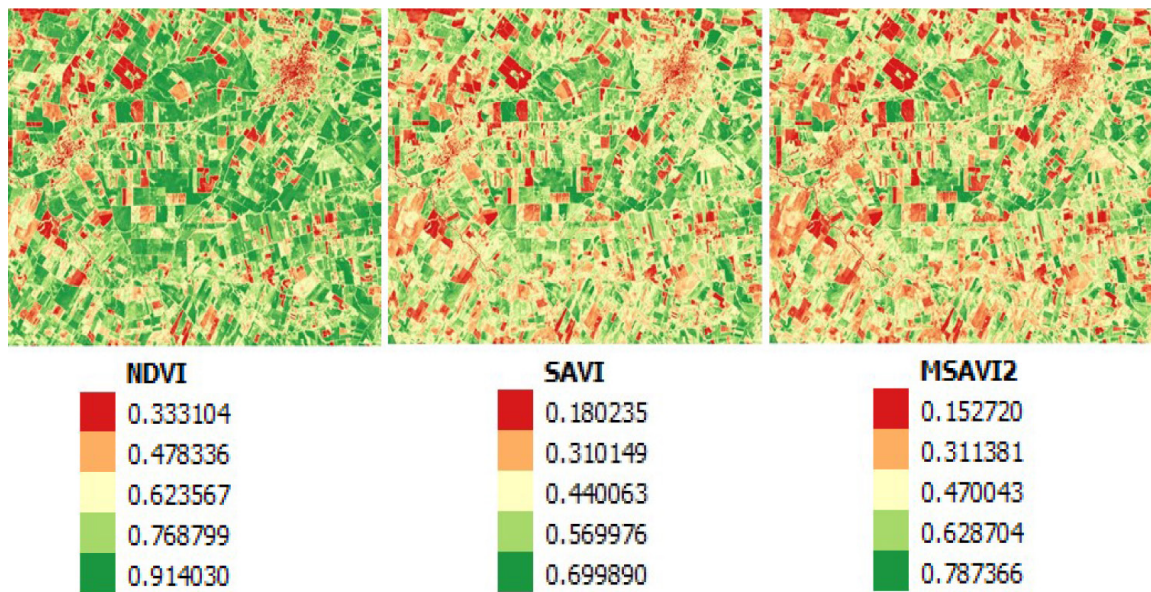


**Figure 2.** Classification of the DEM of the study in: low zones, height values below 60 (Red); medium zones, height values between 60 and 90 m (Yellow) and high zones, height values above 90 m (Green).

**Figura 2.** Clasificación del MDE de la zona en estudio en: zonas bajas, valores de altura menores a 60 m (Rojo); zonas medias, valores de altitud entre 60 y 90 m (Amarillo) y zonas altas, valores de altura superiores a 90 m (Verde)

The region's climate is humid temperate of the plains with a mean annual temperature that touches 18.4°C; while the annual rainfall oscillates between 1100-1200 mm (Paparotti & Gvozdenovich, 2007).

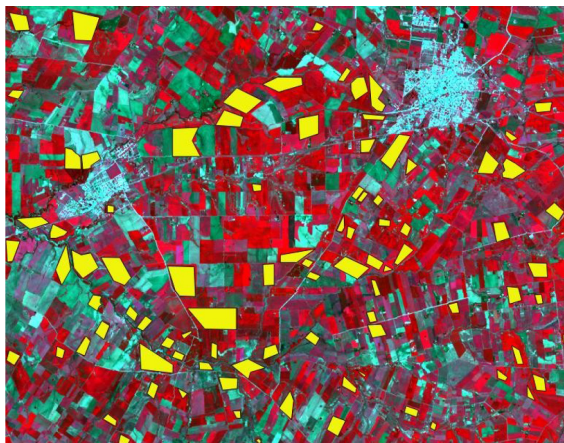
The landscape corresponds with that of a peniplain with a surface that goes from gently



**Figure 3.** Calculated NDVI, SAVI and MSAVI<sub>2</sub> indices in the study area.

**Figura 3.** Índices NDVI, SAVI y MSAVI<sub>2</sub> calculados en la zona de estudio





**Figure 4.** Representation of the sample polygons placed in the fields with summer crops on the 22nd February 2016; the polygons are distributed according to the DEM categorisation.

**Figura 4.** Representación de los polígonos de muestra ubicados sobre lotes con cultivos estivales, de fecha 22 de febrero de 2016; a su vez los polígonos se distribuyen de acuerdo a la categorización del MDE

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores promedios de los 3 índices y los desvíos estándares que se utilizaron para realizar la comparación de medias se presentan en la Tabla 1. En la Fig. 5 se muestran los coeficientes de variación de los 3 índices a distintas alturas.

Los índices con mayor variabilidad se encuentran en la zona de menor altura. Se trata del área más próxima al cauce del Arroyo de la Ensenada. A su vez los índices más bajos se presentaron también en áreas de menor altura.

Los resultados indican que existen diferencias significativas ( $n=30$ ,  $p < 0.05$ ) entre las medias de NDVI de las distintas categorías del modelo digital de elevación. Por otro lado los índices SAVI y MSAVI<sub>2</sub> no muestran diferencias significativas cuando se analizan las categorías media y alta.

Se constató que los valores medios más elevados de los 3 índices se encuentran en la región del MDE categorizada como 'alta'.

Es de destacar que los cultivos de verano, de la campaña 2015-2016 recibieron precipitaciones superiores a la normal, coincidente con la ocurrencia del último evento Niño, que combinadas a cuestiones edáficas de la región como el tipo de suelo, la topografía, la humedad del suelo y otras pudieron haber influenciado en la condición de los cultivos y por lo tanto en los valores de los índices analizados.

Por otro lado la mayoría de los trabajos que indican asociaciones entre el índice de vegetación norma-

undulating to flat. It possesses a range of variable slopes that oscillate between 0,5 and 10 % in certain places. The ground of the zone in its entirety is of Mollisols, with acuíc arguidols in greater proportion located in the low and medium zones and vertical arguidols to a lesser degree, located in medium and high zones.

Agriculture in the region is principally that of dry land and direct sowing is a habitual practice and the extensively cultivated summer crop par excellence is primarily soy (*Glycine max*) and secondly corn (*Zea Mays*).

### Digital elevation model

Based on the IGN topographical map of the locality of Crespo, the level curves were digitalised. Then these curves were transformed (line vectors) in point vectors for their interpolation. With the point vector a DEM was generated obtaining an archive in raster format with a spatial resolution of 10 m x 10 m.

Later, the DEM was categorised as: low, medium and high (Fig. 2) according to 3 class intervals of 33.3% each, considering the histogram of frequencies

### Landsat Images

Images were obtained from the Operational Land Imager (OLI) sensor of Landsat 8 corresponding to the 22nd February, 2016. The atmospheric correction of the bands was carried out and a cutout of the study area was extracted, obtaining thus an image with 792 columns x 622 rows. For the elaboration of the NDVI, SAVI and MSAVI<sub>2</sub> indices, the 4th and 5th bands of the said scene corresponding with the red and near infra red respectively were used. Finally the NDVI, SAVI y MSAVI<sub>2</sub> vegetation indices (Fig. 3), were calculated in Posgar projection 98 Belt 5.

For the analysis of the vegetation indices in the different categories of elevation, 30 polygons of land lots were vectorised as sample sites with an image in a composed false colour (Figure 4) on the study date – according to the photointerpretation corresponding to land lots with crops. The arithmetical mean of all the polygons was obtained for each of these categories defined by the DEM.

To know if the indices presented differences according to the height of the terrain, a comparison of means for the indices of the three elevations was carried out. The values of the indices were obtained with sample polygons.



**Table 1.** Mean values and standard deviations of the vegetation indices for the 3 categories of the DEM and results of the test for different means.

Different letters indicate significant differences.

**Tabla 1.** Valores medios y desvíos estándares de los índices de vegetación para las 3 categorías del MDE y resultados del test de diferencias de medias. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p > 0.05$ ;  $n = 30$ ).

	Categoria DEM / DEM Category								
	Bajo / Low			Medio / Medium			Alto / High		
	Media/ Mean	Desvío estándar / Standard Deviation		Media/ Mean	Desvío estándar / Standard Deviation		Media/ Mean	Desvío estándar / Standard Deviation	
NDVI	0.82	0.06	a	0.88	0.02	b	0.89	0.02	c
SAVI	0.54	0.07	a	0.63	0.04	b	0.65	0.04	b
MSAVI <sub>2</sub>	0.57	0.10	a	0.68	0.06	b	0.71	0.05	b

lizado y rendimiento con altura del terreno, se refieren a alturas relativas en el lote (usualmente loma, media loma y bajo) como se aplica en agricultura de precisión. En este trabajo se indaga para un área extensa considerando el atributo de altura absoluta sobre el terreno, por lo cual dentro de una misma categoría pueden estar incluidos lotes que internamente presentan loma media loma y bajo.

Los resultados pueden ser considerados en posteriores trabajos sobre índices de vegetación cuando sean aplicados a relieves ondulados como ocurre en la provincia de Entre Ríos.

Los resultados encontrados pueden explicarse a partir de que en condiciones de secano, la distribución espacial del agua acumulada en el perfil determina en gran medida la variabilidad de los rendimientos en grano de los cultivos (Abbate *et al.*, 1997). Además si los atributos del terreno determinan el flujo y acumulación del agua en diferentes posiciones del lote, así también la redistribución de partículas minerales del suelo y materia orgánica, a través de la erosión, determinando la distribución espacial de los rendimientos (Pachepsky *et al.*, 2001) es posible que una dinámica similar ocurra en una zona como la de Crespo.

### CONCLUSIONES

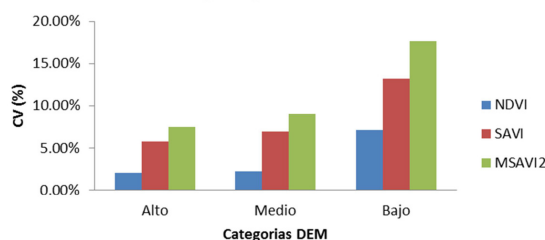
En función del análisis de los distintos índices de vegetación para cada una de las clases de MDE descritas en la fecha evaluada para cultivos estivales, se concluye que los valores de los índices NDVI, SAVI y MSAVI<sub>2</sub> resultan afectados por la altura del terreno. El índice NDVI fue el que expresó diferencias en los promedios para las tres categorías de altura del MDE.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. Agr. Maltese Nicolás por la colaboración en la redacción del presente trabajo.

Este trabajo se enmarca dentro de los proyectos: "Análisis de la variabilidad, la evapotranspiración e

### Coefficiente de variación de los índices según posición en altura

**Figure 5.** Coefficient of variation of the indices for each of the DEM categories.**Figura 5.** Coeficiente de variación de los índices para cada una de las categorías del MDE.

### RESULTS AND DISCUSSION

The average values of the 3 indices and the standard deviations that were used to carry out the comparison of means are presented in Table 1. Fig. 5 shows the coefficients of variation in the 3 indices of different heights.

The indices with greater variability are found in the least high zone. This is the area nearest to the channel of the Stream of the Ensenada. Meanwhile, the lowest indices are also presented in the lowest areas.

The results indicate that significant differences exist ( $n=30$ ,  $p < 0.05$ ) between the means measured in NDVI in the different categories of the digital elevation models. On the other hand, the SAVI and MSAVI<sub>2</sub> indices do not show significant differences when the medium and high categories are analysed.

It was seen that the highest means of the 3 indices were found in the DEM region categorised as 'high'.

índices de vegetación en áreas agrícolas de Entre Ríos" PIDUNER 2161 y "Desarrollo de metodologías y software específico para la asimilación de datos provenientes de sensores remotos y redes de medición orientados a la producción agropecuaria en la Provincia de Entre Ríos" PIO CONICET-UNER 2015-2016.

## BIBLIOGRAFIA

- Abbate, P. E.; Andrade, F. H.; Culot, J. P. & Bindraban, P. S. 1997. Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period. *Field Crops Research*, 54(2), 245-257
- Borondo Martin, S. J.; Morales, A.; Losada, J. C.; Tarquis, A. M. & Benito, R. M. 2016. Correlation between NDVI and the annual groundnut yield in Senegal. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Vol. 18, 11350 pp.
- De la Casa, A. & Ovando, G. 2007. Integración del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) y del ciclo fenológico de maíz para estimar el rendimiento a escala departamental en Córdoba, Argentina. *Agricultura Técnica*, 67(4), 362-371.
- Farell, M. & Rivas, R. 2008. Relación entre índices de vegetación provenientes de imágenes MODIS y el rendimiento en girasol en el área centro de la Pampa, Argentina. *Actas de la XII Reunión Argentina de Agrometeorología*, (A.A.D.A.): 183-184.
- Franco, C.; Peralta, N.; Domenech, M. & Costa, J. L. 2012. Relación cuantitativa entre atributos topográficos y rendimiento.
- Gilabert, M. A.; González-Piqueras, J. & García-Haro, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(10):
- Gvozdenovich, J. & Paparotti, O. 2010. Variación del rendimiento del cultivo de soja debido a la Erosión Hídrica. [http://www.inta.gov.ar/actual/info/2010/Variacion\\_rendimiento\\_cultivo\\_soja\\_erosion\\_hidrica.pdf](http://www.inta.gov.ar/actual/info/2010/Variacion_rendimiento_cultivo_soja_erosion_hidrica.pdf)
- Hayes, M. J. & Decker, W. L. 1996. Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States corn belt. *Int. J. Remote Sens.* 17:3189- 3200.
- Holzman, M. E., & Rivas, R. E. 2016. Early Maize Yield Forecasting From Remotely Sensed Temperature/Vegetation Index Measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1): 507-519.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3): 295-309.
- Jiang, P. & Thelen, K. D. 2004. Effect of Soil and Topographic Properties on Crop Yield in a North-Central Corn-Soybean Cropping System. *Agron. J.* 96(1): 252-258.
- Kaspar, T. C.; Colvin, T. S.; Jaynes, D. B.; Karlen, D. L.; James, D. E.; Meek, D. W.; Pulido, D. & Bulter, H. 2003. Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. *Precision Agriculture* 4(1): 87-101.
- Kravchenko, A. N. & Bullock, D. G. 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and

It must be stated that the summer crops of the 2015-2016 campaign received rainfall that was higher than normal coinciding with the occurrence of the last Niño event that together with edaphic questions of the region such as the type of soil, topography, soil humidity and other factors could have influenced the condition of the crops and thereby of the analysed indices.

On the other hand, the majority of studies that indicate associations between the normalised vegetation index and performance with the height of the terrain refers to the relative heights of the lot (usually knoll, medium knoll and low) as applied in precision agriculture. In this study, an extensive area was researched considering the absolute height on the terrain, and thus within one category, lots that internally present medium and low knolls can be included.

The results of later studies on vegetation indices can be considered when applied to undulating reliefs as found in the province of Entre Ríos. The results found can be explained considering that in dry conditions, the spatial distribution of water accumulated in the profile greatly determines the variability in the performance of the grain profile in the crops (Abbate *et al.*, 1997). Moreover if the terrain's attributes determine the flow and accumulation of water in different positions of the lot and the redistribution of mineral particles in the soil and organic matter through erosion determine the spatial distribution of crop performance (Pachepsky *et al.*, 2001), it is possible that a similar dynamic occurs in a zone such as that of Crespo.

## CONCLUSIONS

In function with the analysis of the different vegetation indices for each of the DEM classes of summer crops described on the evaluated date, it can be concluded that the values of the NDVI, SAVI and MSAVI<sub>2</sub> indices are affected by terrain height. The NDVI index showed differences in the averages for the three categories of height of the DEM.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Engineer Nicolás Maltese for collaborating in the writing of this article.

This study is part of the projects: "Analysis of the variability, evapotranspiration and vegetation indices in agricultural areas of Entre Ríos" PIDUNER 2161 and "Development of methodologies and specific software for the assimilation of data from

- Soil Properties. *Agron. J.* 92(1): 75-83.
- Mekliche, A., Hanifi-Mekliche, L., Aidaoui, A., Gate, P. H., Bouthier, A., & Monneveux, P. H. 2015. Grain yield and its components study and their association with normalized difference vegetation index (NDVI) under terminal water deficit and well-irrigated conditions in wheat (*Triticum durum* Desf. and *Triticum aestivum* L.). *African Journal of Biotechnology*, 14(26): 2142-2148.
- Mika, J.; Kerényi, J.; Rimóczi-Paál, A.; Merza, Á., Szinell, C. & Csiszár, I. 2002. On correlation of maize and wheat yield with NDVI: Example of Hungary (1985-1998). *Adv. Space Res.* 30:2399-2404.
- Mkhabela, Ma. S.; Mkhabela, Mi. S. & Mashinini, N. N. 2005. Early maize yield forecasting in four agroecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. *Agric. For. Meteorol.* 129:1-9.
- Mkhabela, Ma. S.; Bullock, P.; Raj, S.; Wang, S. & Yang, Y. 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3): 385-393
- Pachepsky Y. A.; Timlin D. J.; Rawls, W. J. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1787-1795.
- Paparotti, O. & Gvozdenovich, J. 2007. Caracterización de Zonas y Subzonas Agroeconómicas Homogéneas de Entre Ríos. *RIAP Entre Ríos RIAN-RIAP (Red de Información Agroeconómica para la Región Pampeana)*, Centro Regional Entre Ríos- INTA.
- Peralta, N., Costa, J. L., Castro, M., & Balzarini, M. 2013. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 38(6): 418-424.
- Qi, J.; Chehbouni, A. L.; Huete, A. R., Kerr H. & Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment* 48: 119-126.
- Rivas, R., Ocampo, D. & Carmona, F. 2011. Modelo de predicción de rendimiento de trigo a partir de NDVI: aplicación en el contexto de la agricultura de precisión. In *XV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Vol. 30: 584-590.
- Seiler, R. A. 1997. Estado de la vegetación y rendimientos de maíz en la provincia de Córdoba evaluados mediante datos NOAA-NDV. Vegetation conditions and yields of corn in the Province of Córdoba-Argentina evaluated by NOAA-NDVI data. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 17(1).
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- Zajac, C. C.; Galantini, J. A.; Zajac, E. E.; Vallejos, A. G. & Córdoba, M. 2013. Análisis del rendimiento y el NDVI en cereales de invierno en el Sudoeste Bonaerense. *Ciencia y experiencia para una siembra directa sustentable en los ambientes frágiles del S y SO Bonaerense*, 104.
- remote sensors and measurement networks related to agricultural production in the Province of Entre Ríos” PIO CONICET-UNER 2015-2016.