

---

# Dinámica estacional de las coberturas

---

del suelo en una región semiárida  
de Argentina mediante teledetección

---

Seasonal-land-covers dynamics in a semi-arid region  
of Argentina using remote sensing techniques

**Federico Ferrelli<sup>1,2</sup>**

**Andrea S. Brendel<sup>1,3</sup>**

**Gerardo M. E. Perillo<sup>1,4</sup>**

**María Cintia Piccolo<sup>1,2</sup>**

**1** Universidad Nacional del Sur (UNS)/CONICET, Instituto Argentino de Oceanografía (IADO)

**2** Universidad Nacional del Sur (UNS), Departamento de Geografía y Turismo

**3** Universidad Nacional del Sur (UNS), Departamento de Agronomía

**4** Universidad Nacional del Sur (UNS), Departamento de Geología

Bahía Blanca, Argentina

fferrelli@criba.edu.ar; asbrendel@iado-conicet.gob.ar; perillo@criba.edu.ar;

Ferrelli: <https://orcid.org/0000-0002-5623-8929>

Brendel: <https://orcid.org/0000-0002-0909-4694>

Perillo: <https://orcid.org/0000-0002-1200-5138>

Piccolo: <https://orcid.org/0000-0002-5184-9149>

---

### Resumen

El objetivo del presente trabajo fue evaluar métodos de clasificación supervisados y no supervisados para clasificar las coberturas del suelo a escala estacional y con alta resolución espacial en el sur de la región Pampeana (Argentina). Para ello, se realizaron viajes de campo y procesaron imágenes satelitales SPOT 6 y SPOT 7 sobre las que se calcularon índices espectrales de vegetación, suelo y agua. Posteriormente, se aplicaron cinco métodos de clasificación. Del análisis se obtuvo que en la primavera y el verano el método de Distancia de Mahalanobis fue el que arrojó valores más precisos, mientras que para el otoño y el invierno fue el de Máxima Verosimilitud. Los resultados constituyen una herramienta esencial para aquellos espacios que basan su economía en la producción agropecuaria de secano y muestran una alta vulnerabilidad climática a la ocurrencia de eventos extremos de precipitación.

**PALABRAS CLAVE:** imágenes SPOT; mapas de coberturas del suelo; métodos de clasificación supervisados y no supervisados.

### Abstract

The aim of this study was to evaluate supervised and unsupervised classification methods to organize land cover on a seasonal scale with high spatial resolution in the south of the Pampeana Region (Argentina). Field trips were made, and georeferenced sites were recorded with a differential GPS. Moreover, SPOT 6 and SPOT 7 satellite images were processed on which spectral indices of vegetation, soil and water were calculated. Five classification methods were applied based on reflectivity and spectral knowledge of land cover. The results were compared with a pixel-by-pixel confusion matrix and the Kappa Coefficient (CK). From the analysis, it was obtained that in the spring and summer, the Mahalanobis Distance method was the one that yielded more precise values. At the same time, for Autumn and Winter, it was the Maximum Likelihood (CK of 0.90 and 0.97, respectively). Designed maps represent an essential tool for those spaces that base their economy on rainfed agricultural production and show high climatic vulnerability to the occurrence of extreme precipitation events.

**KEYWORDS:** SPOT images; Land-cover maps; Supervised and unsupervised methods.

## 1. Introducción

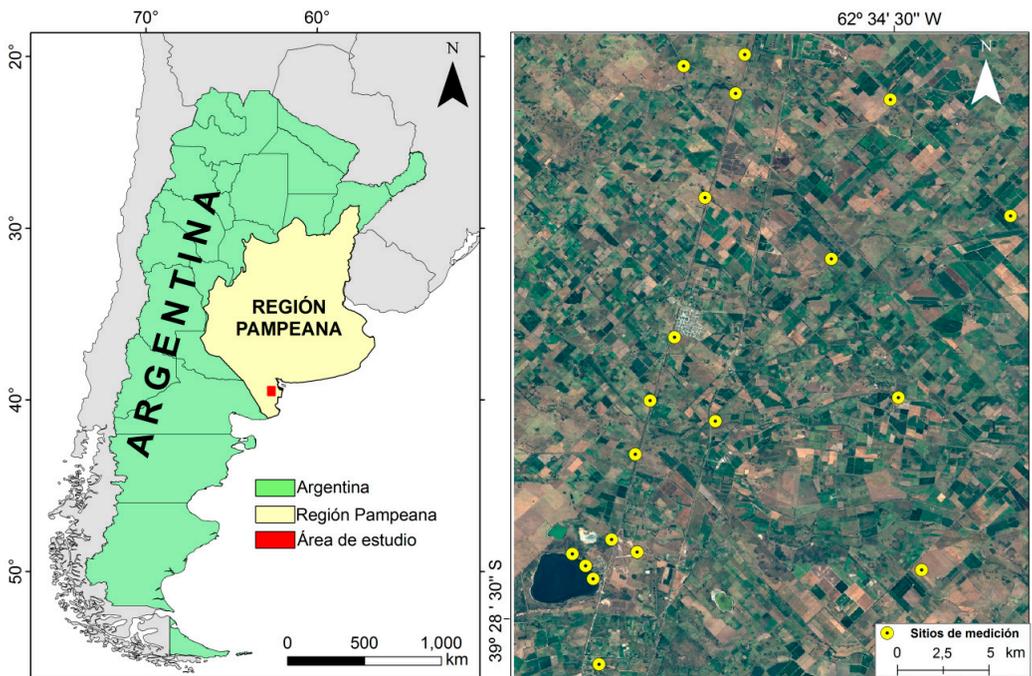
La clasificación de las coberturas del suelo constituye una herramienta fundamental para el diseño de políticas destinadas al ordenamiento del territorio, principalmente en aquellos paisajes complejos localizados en las regiones semiáridas del planeta. En este contexto, la teledetección surge como una herramienta indispensable para el monitoreo y el mapeo de las cubiertas terrestres emplazadas sobre estas áreas (Rawat y Kumar, 2015). Para realizar este tipo de mapas se deben considerar numerosos factores tales como: la complejidad del paisaje, el tipo de imágenes satelitales a utilizar, la resolución espacial y temporal del satélite y los métodos de clasificación (Benniou y Bahlouli, 2015).

En la literatura son escasas las investigaciones destinadas al estudio de las coberturas del suelo en las regiones semiáridas, comparando distintos métodos de clasificación supervisados y no supervisados. Un mapa de coberturas del suelo

con excelente precisión resulta de la aplicación de uno o más algoritmos (Brendel *et al.*, 2019). Dentro de ellos, los que mejores ajustes han arrojado fueron el método de Máxima Verosimilitud (MAV), (p. ej., Chen *et al.*, 2015), el de Distancia Mínima (DIM) (p. ej., Castillejo-González *et al.*, 2009), el de Distancia de Mahalanobis (DMH) (p. ej., Brendel *et al.*, 2019), el ISODATA y el K-means (KM) (p. ej., Ferrelli y Aliaga, 2016). Los resultados de estos métodos varían según el conjunto de datos que se utilizan. En este contexto, se ha demostrado que los compuestos por información espectral y por la reflectancia de las coberturas mejora significativamente los resultados obtenidos (Chen *et al.*, 2015).

El área de estudio se localiza al sur de la Región Pampeana (Argentina), (FIGURA 1). El clima es árido y semiárido, con un régimen pluviométrico de tipo seco a muy seco (Aliaga *et al.*, 2017). Existe evidencia de que los eventos pluviométricos

FIGURA 1. Localización del área de estudio



extremos ocasionan la reducción drástica de las áreas sembradas (hasta un 17 %) y de los pastizales (13 %), generando pérdidas económicas y deterioro ambiental (Ferrelli, 2017). Por esta razón, la confección de un mapa de coberturas del suelo con gran precisión en un área altamente vulnerable a las variaciones del clima adquiere importancia, dado que podría fortalecer las bases para establecer un plan de manejo sustentable de los recursos naturales (Alrababah y Alhamad, 2006).

Por lo mencionado, el objetivo de esta investigación fue evaluar métodos de clasificación supervisados y no supervisados utilizando como base de su clasificación datos de reflectividad de superficie medida *in situ* y del comportamiento espectral de las distintas coberturas del suelo obtenido del procesamiento de imágenes satelitales SPOT. La finalidad fue obtener mapas de coberturas del suelo con alta resolución espacial, a escala estacional y con excelente precisión para el sur de la Región Pampeana (Argentina). De esta manera, se generó información relevante para orientar políticas destinadas a mejorar el manejo de la producción agrícola, considerando los lineamientos del desarrollo sustentable.

## 2. Metodología

Se corrigieron geométrica y radiométricamente imágenes satelitales SPOT 6 y SPOT 7 del catálogo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE, Argentina). Con distintas combinaciones de falso color (RGB), se definieron los sitios de muestreo. Luego, durante viajes de campo, se adquirieron firmas espectrales y coordenadas GPS. Para ello, se utilizó un radiómetro de campo. Las muestras fueron tomadas en modo de reflectancia de superficie luego de que las distorsiones fueran corregidas con instrumentos de máxima y mínima reflectividad (blanco y negro). Complementariamente, se calcularon índices de vegetación, agua y

suelo que permitieron caracterizar espectralmente las distintas cubiertas y ampliar las regiones de interés necesarias para aplicar distintos algoritmos de clasificación. El área de entrenamiento para aplicar cada uno de los métodos de clasificación fue de 120 km<sup>2</sup>. Esta superficie se obtuvo en forma de polígonos en las salidas de campo. Luego, se aplicó un método estadístico aleatorio de selección, de manera de evitar cualquier tipo de sesgo sobre los resultados de los *tests*. Finalmente, se evaluaron los resultados obtenidos con métodos supervisados y no supervisados y se diseñaron mapas de coberturas del suelo a escala estacional, es decir, representativa de cada una de las estaciones del año. El método de trabajo aplicado en este estudio se resume en la FIGURA 2.

### 2.1. Procesamiento de imágenes satelitales

Los viajes de campo estacionales durante los años 2017 y 2018 permitieron reconocer las coberturas del suelo del área de estudio (FIGURA 1). Estas se determinaron a partir de la combinación de falso color (RGB) realizado con imágenes satelitales SPOT 6 y SPOT 7 y luego se adquirieron firmas espectrales de cada una de ellas con un espectro-radiómetro de campo *Ocean Optics USB 2000+*. Este permitió estudiar la reflectancia de superficie desde los 400 a los 1200 μm. Como resultado, se determinaron las coberturas del suelo descritas en la TABLA 1.

Posteriormente, se procesaron imágenes satelitales SPOT (6 y 7) provistas por la CONAE para el período septiembre 2017- julio 2018 (TABLA 2). Estas abarcaron un área de 500 km<sup>2</sup>. Se utilizaron dos imágenes por cada estación del año de los productos PMS, es decir, la fusión de las cuatro bandas convertidas a la resolución espacial de la banda pancromática (1,5 metros). Las imágenes tuvieron un pre-procesamiento *Standard Ortho* que consistió en una orto-rectificación mediante un modelo digital de elevaciones (MDE) y una

FIGURA 2. Esquema metodológico aplicado en este estudio

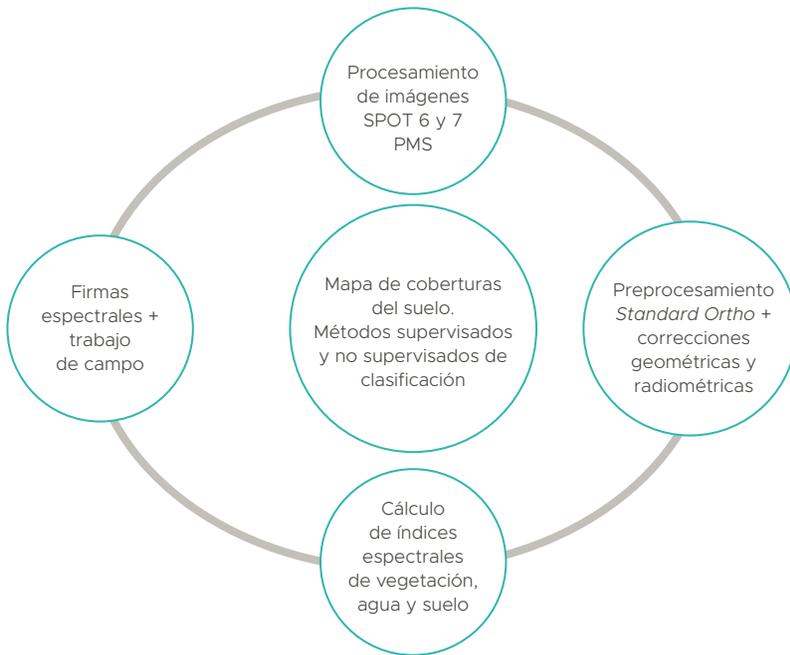


TABLA 1. Coberturas del suelo identificadas mediante el procesamiento digital de imágenes SPOT y validaciones con salidas de medición en el terreno.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

| Cobertura           | Descripción   |
|---------------------|---|
| Agua superficial    | Cuerpos de agua, cultivos bajo riego, llanuras de inundación y terrenos anegados  |
| Vegetación densa    | Árboles y arbustos con alta densidad  |
| Suelos descubiertos | Suelos desnudos y áreas agrícolas en barbecho o con rastrojos   |
| Pastizal            | Pasturas naturales e implantadas  |
| Cultivos            | Se incluyen todos los cultivos que se realizan en la región; los principales son alfalfa, cebolla, trigo y maíz                 |
| Centros poblados    | Pueblos y ciudades emplazadas dentro del área de estudio. Las mismas son dos y se delimitaron a partir de un recorrido de campo |

corrección radiométrica, a partir del método del vecino más cercano (Coeurdevey y Soubirane, 2013).

Como se mencionó con anterioridad, el procesamiento digital de las imágenes SPOT incluyó una corrección geométrica y radiométrica, tal como se describe en Torres Vivar *et al.* (2017).

En una primera instancia, se transformaron los datos espectrales (valores digitales) a valores de radiancia para posteriormente calcular los valores de reflectancia (Coeurdevey y Soubirane, 2013; Baghdadi y Zribi, 2016). Para ello, se aplicaron las siguientes ecuaciones:

**TABLA 2.** Imágenes satelitales SPOT 6 y SPOT 7 analizadas para la clasificación de las coberturas del suelo.

FUENTE: MODIFICADO DE LA CONAE (ARGENTINA)

| Satélite | Fecha                    | Estación del año |
|----------|--------------------------|------------------|
| SPOT 7   | 15 de septiembre de 2017 | Primavera        |
| SPOT 7   | 20 de noviembre de 2017  |                  |
| SPOT 6   | 31 de enero de 2018      | Verano           |
| SPOT 6   | 19 de febrero de 2018    |                  |
| SPOT 7   | 18 de abril de 2018      | Otoño            |
| SPOT 6   | 15 de mayo de 2018       |                  |
| SPOT 6   | 22 de junio de 2018      | Invierno         |
| SPOT 7   | 24 de julio de 2018      |                  |

$$L_b(p) = \frac{DC(p)}{Gain(b)} + Bias_{(b)} \quad [1]$$

$$P_b(p) = \frac{\pi * L_b(p)}{E_0(b) * \cos(\theta_s)} \quad [2]$$

Donde es la radiancia al techo de la atmósfera ( $w sr^{-1} m^{-2} \mu m^{-1}$ ), son los niveles digitales, y son coeficientes que se establecen para cada banda, es la reflectancia exoatmosférica adimensional, es a radiancia exoatmosférica solar media de cada banda y es el coseno la elevación solar de la escena. Los parámetros se obtuvieron de los metadatos de cada una de las imágenes analizadas.

Posteriormente, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), dado que permite evidenciar áreas cubiertas por vegetación, tales como los cultivos, las coberturas arbóreas, pastizales, entre otros (Aguirre-Salado *et al.*, 2011). Para ello, se consideró la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad [3]$$

Donde IRC y R hacen referencia a las bandas infrarroja y roja respectivamente.

Adicionalmente, se calcularon índices de agua, suelo y vegetación para evaluar el comportamiento espectral estacional de cada. Estos representan una herramienta fundamental para ampliar las regiones de interés necesarias para la clasificación y facilitar la diferenciación espectral entre las

cubiertas terrestres (Brendel *et al.*, 2019). Por ello, se consideraron el índice de vegetación mejorado (EVI), el índice ajustado de suelo y vegetación (SAVI), el índice modificado de suelo y vegetación (MSAVI), el índice normalizado de diferencia de humedad de suelos (NDMI) y el índice normalizado de agua (NDWI). Para calcularlos, se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$EVI = \left( \frac{IRC - R}{IRC + C_1 * R - C_2 * A + L} \right) \quad [4]$$

Donde IRC es la banda del Infrarrojo Cercano, R: la del Rojo,  $C_1$  y  $C_2$  son coeficientes necesarios para corregir la dispersión atmosférica, L es el factor de corrección del suelo y A es la banda Azul,

$$SAVI = \left( \frac{IRC - R}{(IRC + R + L) * (1 + L)} \right) \quad [5]$$

Donde IRC es el Infrarrojo Cercano, R es el Rojo y L es un factor de corrección del suelo

$$MSAVI = \frac{2 * IRC + 1 - \sqrt{(2 * IRC + 1)^2 - 8 * IRC - R}}{2} \quad [6]$$

Donde IRC es el Infrarrojo Cercano y R es el Rojo

$$NDMI = \frac{IRC - IRM}{IRC + IRM} \quad [7]$$

Donde IRC es el Infrarrojo Cercano y IRM es el Infrarrojo Medio,

$$NDWI = \frac{V - IRC}{V + IRC} \quad [8]$$

Donde IRC es el Infrarrojo Cercano y V es la banda del Verde.

## 2.2. Clasificación de las coberturas del suelo

Tras evaluar el comportamiento espectral y de la reflectancia de las coberturas del suelo, se diferenciaron las coberturas del suelo presentes en el área de estudio. Posteriormente, se procedió a comparar distintos métodos de clasificación supervisados y no supervisados, considerando los espacios de muestreo que presentaron un área de 120 km<sup>2</sup>. El objetivo de su aplicación fue el de identificar el algoritmo más preciso para la delimitación de las coberturas del suelo a escala estacional. Estos procedimientos fueron realizados en el software ENVI 5.1. Se evaluaron cinco métodos de clasificación, tres de ellos supervisados: Máxima Verosimilitud (MAV), Distancia de Mahalanobis (DMH), Mínima Distancia (MID) y dos no supervisados: ISODATA y K-means (KM).

La base sobre la que se aplicaron estos algoritmos fueron las bandas transformadas a reflectividad, junto con aquellas resultantes del cálculo de cada uno de los índices espectrales. Se trabajó con un total de 18 bandas, nueve por cada imagen representativa de cada estación del año.

Luego, se evaluó la precisión de la clasificación a partir de la aplicación de una matriz de confusión de tipo píxel por píxel. Esta está compuesta por dos métricas: la Precisión General (PG) que contiene la Precisión del Usuario (PU) y la Precisión del Productor (PP), (Smits *et al.*, 1999) y el Coeficiente Kappa (CK), (Conglaton y Mead, 1983). La precisión indica la cantidad de píxeles bien clasificados, la del productor la probabilidad de que un píxel identificado como una categoría represente realmente dicha categoría y la del usuario indica qué tan bien se clasificó el conjunto de píxeles de entrenamiento (Rogan *et al.*, 2003). Por su parte, el Coeficiente Kappa (CK) es una medida de precisión que mide las diferencias entre los datos de la clasificación y los de referencia, comparada con la precisión que

se derivaría de un clasificador aleatorio (Conglaton, 2001). Este índice oscila entre 0 y 1 y según Monserud y Leemans (1992), el mismo tiene una clasificación cualitativa considerando los rangos presentados en la **TABLA 3**.

**TABLA 3.** Tipo de ajuste según el Coeficiente Kappa (CK).  
FUENTE: MODIFICADO DE MONSERUD Y LEEMANS (1992)

| Coeficiente Kappa (CK) | Tipo de ajuste |
|------------------------|----------------|
| CK < 0,4               | Muy malo       |
| 0,4 > CK < 0,55        | Moderado       |
| 0,55 > CK < 0,71       | Bueno          |
| 0,71 > CK < 0,85       | Muy Bueno      |
| CK > 0,85              | Excelente      |

## 3. Resultados

### 3.1. Caracterización espectral de las coberturas del suelo

Las coberturas del suelo presentaron una diferenciación reflectiva notoria (**FIGURA 3**). Por ejemplo, los suelos descubiertos y el agua superficial registraron un comportamiento típico de estas cubiertas. La primera, con valores constantes ( $\cong 20\%$ ) a lo largo del espectro y la segunda, con un pico leve (3,5%) en el espectro visible (**FIGURA 3**). Las coberturas con presencia de vegetación mantuvieron una firma espectral similar, con máximos en el verde (550  $\mu\text{m}$ ) y en el infrarrojo cercano (750  $\mu\text{m}$ ). Estas fueron fácilmente diferenciadas entre sí dado que la vegetación densa presentó valores mayores, seguido por los cultivos y finalmente por los pastizales (**FIGURA 3**).

Las características espectrales de cada una de las coberturas favorecieron su diferenciación en todas las estaciones del año. El NDVI presentó valores negativos para el agua superficial durante todo el año y positivos y cercanos a cero para los suelos descubiertos (**FIGURA 4**). Una situación similar se observó al analizar el EVI, donde la vegetación densa registró los picos máximos y se diferenció de los cultivos en el verano y el otoño. El MSAVI y

el SAVI identificaron que todas las cubiertas discriminadas se distinguieron entre sí durante todo el año. Los suelos al descubierto y los pastizales

tuvieron un comportamiento similar. Sin embargo, el NDMI y el NDWI los separaron espectralmente con mayor eficacia (FIGURA 4).

FIGURA 3. Firmas espectrales de cada cobertura del suelo

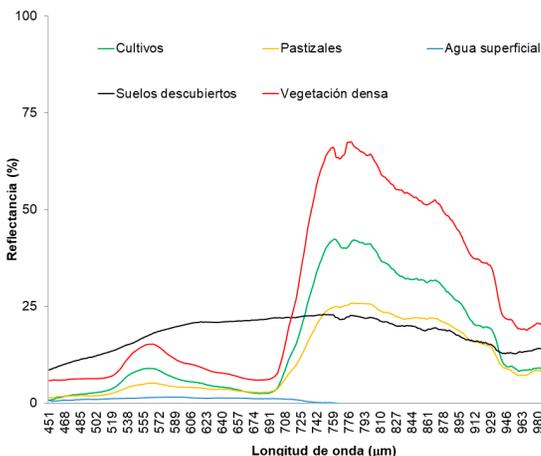
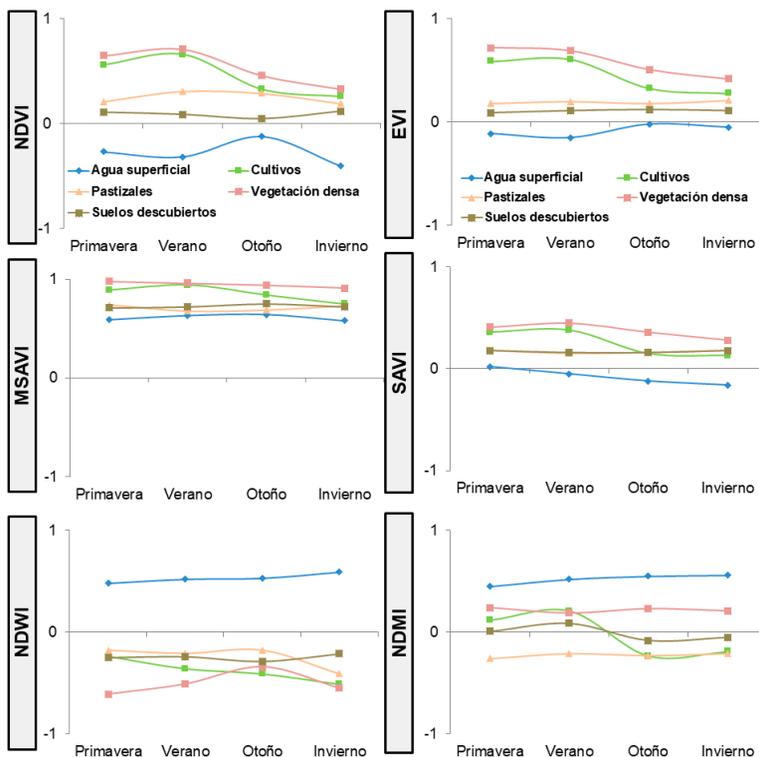


FIGURA 4. Comportamiento estacional de los índices espectrales en cada una de las cubiertas del suelo



### 3.2. Evaluación de los métodos de clasificación

Los métodos supervisados fueron más precisos que los no supervisados. Estos últimos presentaron ajustes moderados e insuficientes a lo largo de todo el año, registrando valores de CK de 0,19 a 0,36 y una PG inferior al 52 % (FIGURA 5). El método DIM mostró ajustes moderados (en primavera, otoño e invierno) y buenos (en el verano), (FIGURA 5). El método MAV y el DMH exhibieron resultados excelentes, con valores de CK superiores a 0,85 y una PG mayor a 86 % (FIGURA 5).

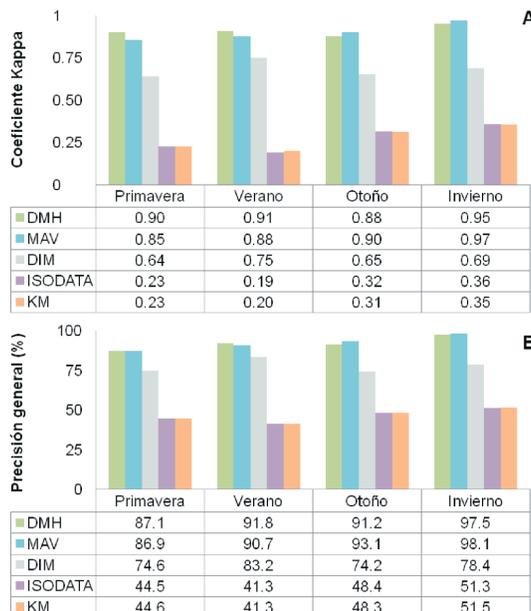
El análisis de las áreas (km<sup>2</sup>) de cada una de las coberturas discriminadas con cada método mostró diferencias significativas. Los métodos DMH y MAV presentaron valores similares, evidenciando la existencia de rotación de cultivos entre las estaciones del año. El método DIM subestimó las cubiertas de cultivo y vegetación densa y sobreestimó las de pastizales y suelos al

descubierto (FIGURA 6). Por otro lado, los métodos no supervisados de ISODATA y KM presentaron áreas que no se corresponden con lo observado en la superficie. Ambos sobrestimaron la superficie de agua superficial y la de suelos al descubierto y no permitieron realizar un estudio estacional de las variaciones de los cultivos y pastizales. Estas últimas clases tuvieron áreas similares a lo largo de todo el año (FIGURA 6).

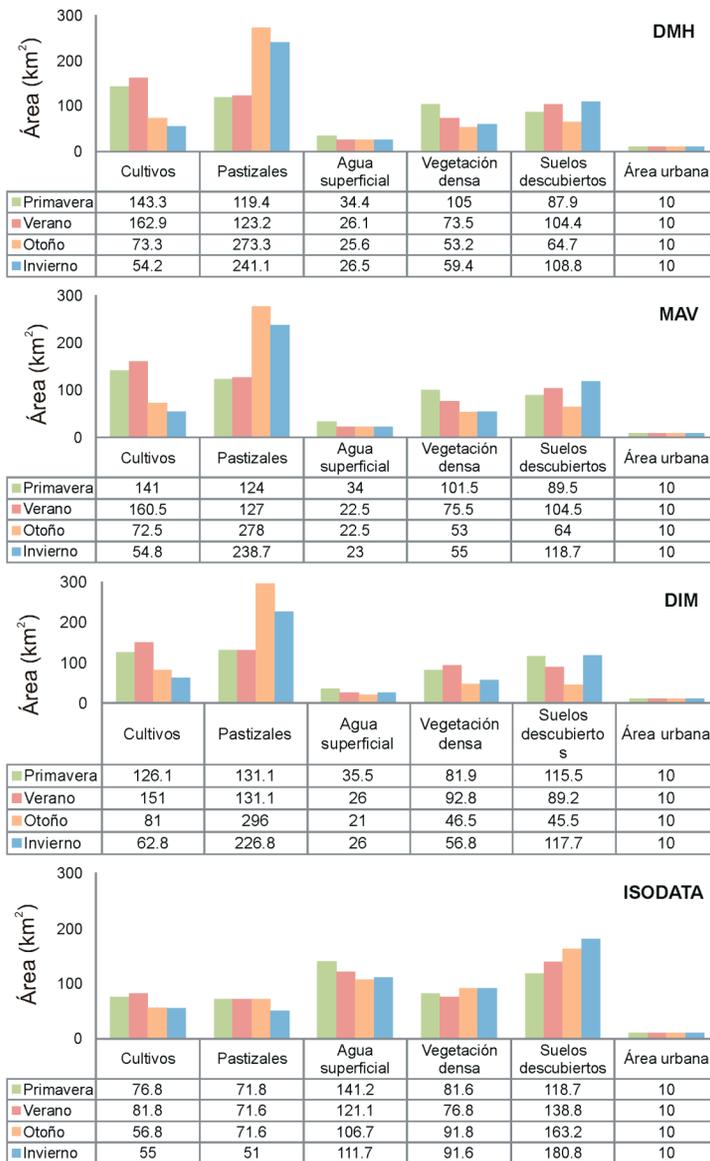
### 3.3. Mapas de cobertura del suelo a escala estacional

Del análisis realizado se estableció que MAV y DMH fueron los algoritmos que mejores resultados arrojaron. Por lo tanto, se procedió a compararlos considerando los resultados obtenidos a escala de cobertura del suelo, analizando la PU y la PP (FIGURA 7). Al analizar la PU, se observó que el método DMH presentó excelentes valores para la discriminación de las coberturas del suelo a lo

FIGURA 5. Precisión General y Coeficiente Kappa obtenido para los métodos supervisados de Distancia de Mahalanobis (DMH), Máxima Verosimilitud (MAV), Distancia Mínima (DIM) y los no supervisados ISODATA y K-medias (KM)

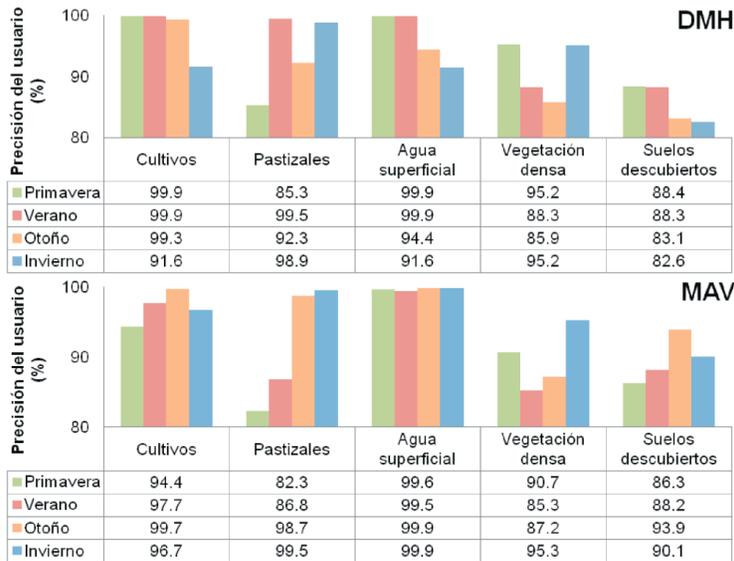
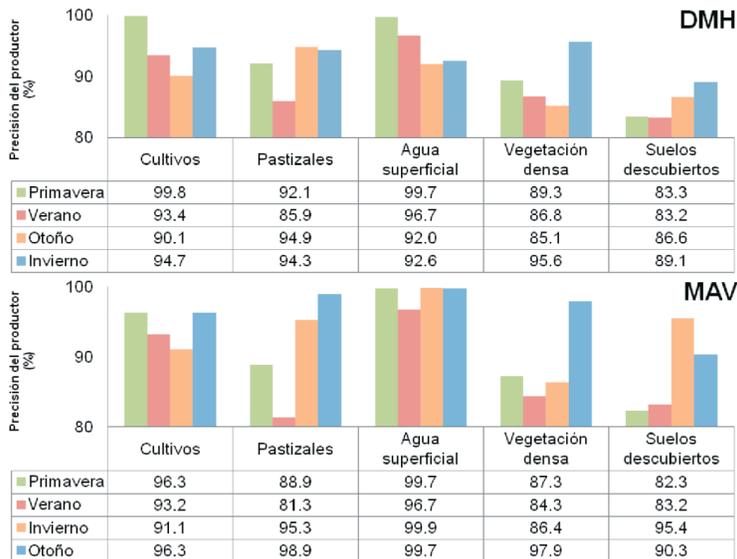


**FIGURA 6.** Área de las coberturas del suelo discriminadas estacionalmente con Distancia de Mahalanobis (DMH), Máxima Verosimilitud (MAV), Mínima Distancia (DIM) e ISODATA



largo de todo el año. Sin embargo, obtuvo valores mayores el MAV durante la primavera y el verano (FIGURA 7). El MAV evidenció excelente precisión en la determinación de los pastizales, la vegetación densa y los suelos al descubierto. Además, arrojó buenos ajustes para el agua durante todo el año

(FIGURA 7). En ambos métodos, la cobertura menos exacta fue la de suelos descubiertos. Por otro lado, la PP corroboró que el DMH tiene mayores valores que el MAV en la primavera y el verano (FIGURA 8), mientras que el MAV para el otoño y el invierno (FIGURA 8).

**FIGURA 7.** Precisión del usuario estacional de los métodos A. Máxima Verosimilitud (MAV) y B. Distancia de Mahalanobis (DMH) para cada cobertura del suelo**FIGURA 8.** Precisión del productor estacional de los métodos de Distancia de Mahalanobis (DMH) y de Máxima Verosimilitud (MAV) para cada cobertura del suelo

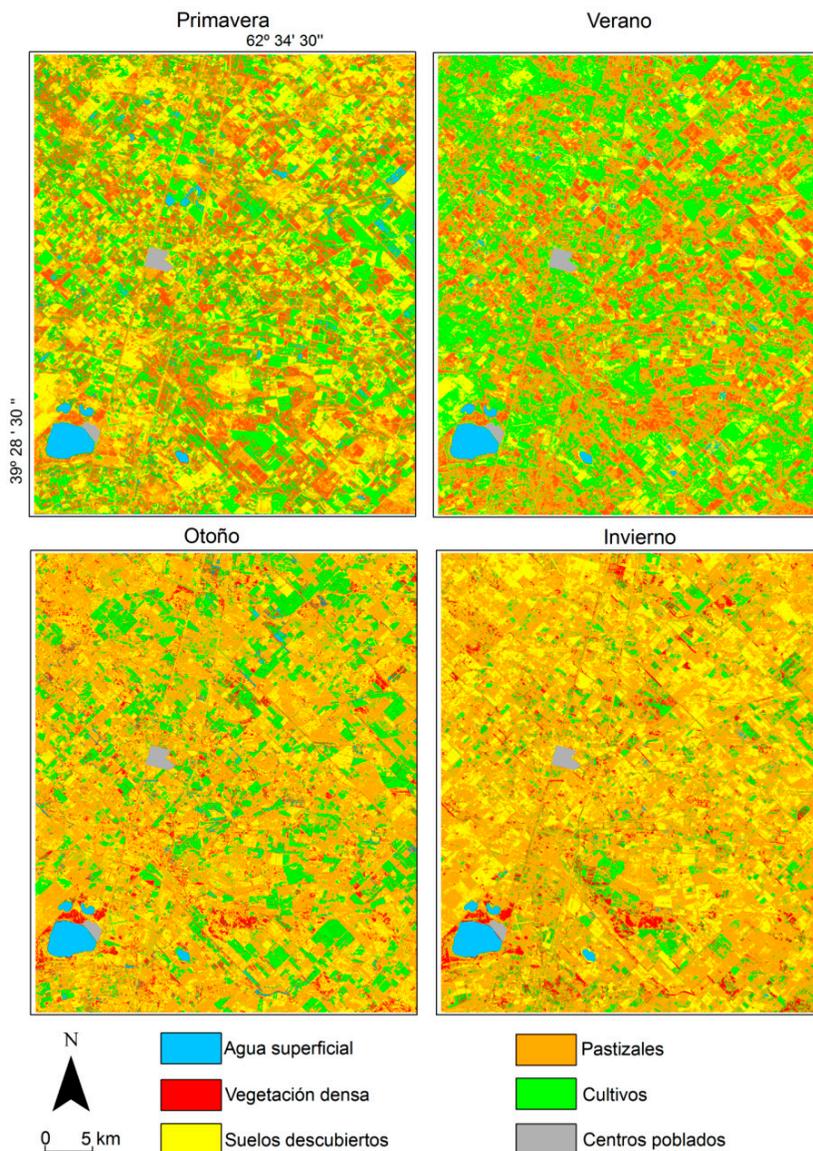
El análisis permitió confeccionar mapas de coberturas del suelo a escala estacional considerando el DMH para la primavera y el verano, y el MAV para el otoño y el invierno (FIGURA 9). Los

cultivos registraron una marcada estacionalidad, con un área mayor en el verano y una menor en el invierno. Esta última estación se caracterizó por el predominio de pastizales, suelos al descubierto y

vegetación densa. En menor medida, se identificaron pequeños lotes con cultivos sembrados tempranamente. En el otoño, estos cultivos comenzaron a ocupar mayor superficie. Además, las áreas de suelo al descubierto (observadas en el invierno), se cubrieron de vegetación y conformaron los

pastizales. Finalmente, en la primavera el paisaje también fue heterogéneo y se caracterizó por una mayor extensión de las cubiertas de cultivos, suelos al descubierto y vegetación densa que de las de pastizales y agua superficial (FIGURA 9).

FIGURA 9. Coberturas del suelo estacionales de 2018 determinadas con el método de Máxima Verosimilitud (otoño e invierno) y Distancia de Mahalanobis (primavera y verano)



#### 4. Discusión

El diseño de mapas de coberturas del suelo con excelente nivel de precisión surge de la evaluación y selección de algoritmos robustos. En este estudio, se compararon cinco métodos de clasificación supervisados y no supervisados, utilizando como base de clasificación el comportamiento estacional de seis índices y la medición de firmas espectrales a campo. Se destaca que los métodos no supervisados presentaron diagramas de sedimentación heterogéneos de acuerdo a la estación del año que se analizó. El número óptimo de clases se forzó al inicio de la clasificación de manera de generar mapas con la misma cantidad de clases de aquellos obtenidos con los métodos de clasificación supervisados. De todas maneras, su ajuste y precisión fue demasiado baja como para contemplar las matrices resultantes de estos métodos (ISODATA y K-means). Estos resultados se han observado en otros estudios realizados en la región (p.ej., Brendel *et al.*, 2019).

Los métodos supervisados permitieron generar mapas de coberturas del suelo estacional con una precisión superior al 85 % en una región semiárida de Argentina. Estacionalmente, el método MAV obtuvo buenos resultados durante el otoño y el invierno, mientras que el DMH arrojó excelentes ajustes en la primavera y el verano. Estos resultados coinciden con los analizados en otras regiones (Anurogo *et al.*, 2018). En este contexto es importante destacar que el clasificador MAV requiere que se cumpla con la normalidad multivariante, lo que supone que sus resultados sean más eficientes en comparación con otros métodos de clasificación. El mismo ha demostrado ser un método útil para la clasificación de los usos del suelo en distintas partes del mundo. La posibilidad de generar una matriz de correlación de tipo píxel-por-píxel hace que los resultados alcancen ajustes superiores al 90 % en regiones subtropicales. En este contexto, la separación entre los valores medios de cada una

de las clases en el denominado espacio de decisión es uno de los factores que conduce a la generación de una alta precisión en la clasificación del MAV (Ahmad y Quegan, 2012).

Por otro lado, el trabajo de campo orientado a la adquisición de firmas espectrales y la obtención de coordenadas GPS es una tarea indispensable para obtener buenos resultados (Monserud y Leemans, 1992) y para lograr una óptima diferenciación de las coberturas del suelo (Ferrelli *et al.*, 2015). Esta metodología, junto con el procesamiento de imágenes satelitales, ha demostrado ser una técnica robusta para generar mapas de coberturas del suelo con gran ajuste (Mushore *et al.*, 2017).

La utilización de índices espectrales favorece la discriminación de las coberturas del suelo a escala estacional y al aplicarlos en esta investigación, la precisión aumentó hasta 15% (Xiuwan, 2002; Brendel *et al.*, 2019). El NDVI es uno de los índices más utilizados (Mushore *et al.*, 2017). En este sentido, se observaron excelentes resultados al aplicar los métodos supervisados sobre la combinación de las bandas de reflectividad junto con los índices espectrales de vegetación, suelo y agua. Con esta base de datos se logró obtener mapas de coberturas del suelo con excelente precisión para cada estación del año.

El estudio y la delimitación de las cubiertas terrestres a escala regional y con gran resolución espacial representan una herramienta útil para el manejo de los recursos naturales y el ordenamiento sustentable del territorio, fundamentalmente en las regiones semiáridas del mundo (Saadat *et al.*, 2011). Considerando que en el sur de la Región Pampeana (Argentina) ocurren los eventos pluviométricos más intensos y duraderos (Aliaga *et al.*, 2017; Mulenga *et al.*, 2017) y gran parte de los cultivos se realizan bajo condiciones de secano (Ferrelli, 2017), los mapas constituyen una herramienta muy útil para los diferentes actores sociales. La alta variabilidad de las precipitaciones en el área de estudio ocasiona,

en muchas situaciones, impactos sociales y económicos negativos (Aliaga *et al.*, 2017). Por estas razones, el conocimiento de las coberturas del suelo y su variación a escala estacional es esencial para interpretar los efectos nocivos sobre la biodiversidad y la sostenibilidad de los ecosistemas (Gilani *et al.*, 2015; Brendel *et al.*, 2019).

## 5. Conclusión

Este estudio permitió conocer por primera vez la dinámica de las coberturas del suelo a escala estacional en el sur de la Región Pampeana. Para ello, se evaluaron cinco métodos supervisados y no supervisados de clasificación utilizando como base de la clasificación el uso de seis índices espectrales y el cálculo de la reflectividad de superficie con imágenes satelitales SPOT. Se destaca que las mediciones de campo es una tarea fundamental para validar las coberturas del suelo, aumentar las muestras espaciales necesarias para aplicar los

diferentes métodos y lograr una clasificación más precisa. Además, permiten conocer la dinámica propia de las coberturas del suelo y evaluar con mayor exactitud su comportamiento reflectivo. Se observó que el DMH presentó excelentes ajustes en la primavera y el verano, coincidente con una mayor heterogeneidad espacial de las coberturas, mientras que en el invierno y el otoño el mejor método fue el MAV. El DIM mostró registros moderados y buenos. Sin embargo, los ajustes fueron menores con respecto a los obtenidos con los otros métodos supervisados de clasificación. Los no supervisados no presentaron ajustes relevantes ni discriminaron de forma adecuada las áreas de las coberturas.

Los resultados obtenidos en este estudio representan una base de datos esencial para los diferentes actores sociales y tomadores de decisiones dado que conforman una herramienta indispensable para orientar planes destinados a mejorar la calidad de vida de la población y el ambiente.

## 6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y a la Universidad Nacional del Sur (CONICET - UNS) por el financiamiento del presente trabajo. Además, queremos destacar el rol de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) por el suministro de las imágenes satelitales utilizadas en esta investigación.

## 7. Referencias citadas

- AGUIRRE-SALADO, C. A.; VALDEZ-LAZALDE, J. R.; ÁNGELES-PÉREZ, G.; DE LOS SANTOS-POSADAS, H. M. y A. I. AGUIRRE-SALADO. 2011. "Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos SPOT 5 HRG: regresión y k-nn". *Agrociencia*, 45(1): 105-119.
- AHMAD, A. & S. QUEGAN. 2012. "Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data". *Applied Mathematical Sciences*, 6(129): 6.425-6.436.
- ALIAGA, V. S.; FERRELLI, F. & M. C. PICCOLO. 2017. "Regionalization of climate over the Argentine Pampas". *International journal of climatology*, 37: 1.237-1.247.
- ALRABABAH, M. A. & M. N. ALHAMAD. 2006. "Land use/cover classification of arid and semi-arid Mediterranean landscapes using Landsat ETM". *International journal of remote sensing*, 27(13): 2703-2718.

- ANUROGO, W.; LUBIS, M. Z. & M. A. K. MUFIDA. 2018. "Modified soil-adjusted vegetation index in multispectral remote sensing data for estimating tree canopy cover density at rubber plantation". *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 3(1): 15-24.
- BAGHDADI, N. & M. ZRIBI. 2016. *Optical Remote Sensing of Land Surface: Techniques and Methods*. Elsevier.
- BENNIYOU, R. & F. BAHLOULI. 2015. "Climate change and agriculture conservation in semi-aride environment". *Energy Procedia*, 74: 25-31.
- BRENDEL, A. S.; FERRELLI, F.; PICCOLO, M. C. & G. M. PERILLO. 2019. "Assessment of the effectiveness of supervised and unsupervised methods: maximizing land-cover classification accuracy with spectral indices data". *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1): 014503. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.014503>
- CASTILLEJO-GONZÁLEZ, I. L.; LÓPEZ-GRANADOS, F.; GARCÍA-FERRER, A.; PEÑA-BARRAGÁN, J. M.; JURADO-EXPÓSITO, M.; DE LA ORDEN, M. S. & M. GONZÁLEZ-AUDICANA. 2009. "Object-and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery". *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(2): 207-215.
- COEURDEVEY, L. & J. SOUBIRANE. 2013. *SPOT 6 & SPOT 7 Imagery User Guide*. Toulouse, France.
- CONGALTON, R. G. 2001. "Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information". *International Journal of Wildland Fire*, 10(4): 321-328.
- CONGALTON, R. G. & R. A. MEAD. 1983. "A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(1): 69-74.
- CHEN, J.; CHEN, J.; LIAO, A.; CAO, X.; CHEN, L.; CHEN, X. & W. ZHANG. 2015. "Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7-27.
- FERRELLI, F.; BUSTOS, M. L.; HUAMANTINCO CISNEROS, M. A. y M. C. PICCOLO. 2015. "Utilización de imágenes satelitales para el estudio de la distribución térmica en distintas coberturas del suelo de la ciudad de Bahía Blanca (Argentina)". *Revista de Teledetección*, 44: 31-42.
- FERRELLI, F. y V. S. ALIAGA. 2016. "Variabilidad de las precipitaciones y sus efectos sobre la respuesta espacio-temporal de cuerpos de agua en la región pampeana, Argentina". *HUELLAS*, (20): 242-246.
- FERRELLI, F. 2017. "Variabilidad pluviométrica y sus efectos sobre las coberturas del suelo al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina". *Revista Geográfica Venezolana*, 58(1): 26-37.
- GILANI, H.; SHRESTHA, H. L.; MURTHY, M. S. R.; PHUNTSO, P.; PRADHAN, S.; BAJRA-CHARYA, B. & B. SHRESTHA. 2015. "Decadal land cover change dynamics in Bhutan". *Journal of environmental management*, 148: 91-100.
- MONSERUD, R. A. & R. LEEMANS. 1992. "Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic". *Ecological modelling*, 62(4): 275-293.
- MULENGA, B. P.; WINEMAN, A. & N. J. SITKO. 2017. "Climate trends and farmers' perceptions of climate change in Zambia". *Environmental management*, 59(2): 291-306.
- MUSHORE, T. D.; MUTANGA, O.; ODINDI, J. & T. DUBE. 2017. "Assessing the potential of integrated Landsat 8 thermal bands, with the traditional reflective bands and derived vegetation indices in classifying urban landscapes". *Geocarto international*, 32(8): 886-899.

- RAWAT, J. S. & M. KUMAR. 2015. "Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India". *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1): 77-84.
- ROGAN, J.; MILLER, J.; STOW, D.; FRANKLIN, J.; LEVIEN, L. & C. FISCHER. 2003. "Land-cover change monitoring with classification trees using Landsat TM and ancillary data". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(7): 793-804.
- SAADAT, H.; ADAMOWSKI, J.; BONNELL, R.; SHARIFI, F.; NAMDAR, M. & S. ALE-EBRAHIM. 2011. "Land use and land cover classification over a large area in Iran based on single date analysis of satellite imagery". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(5): 608-619.
- SMITS, P. C.; DELLEPIANE, S. G. & R. A. SCHOWENGERDT. 1999. "Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach". *International journal of remote sensing*, 20(8): 1.461-1.486.
- TORRES-VIVAR, J. E.; VALDEZ-LAZALDE, J. R.; ÁNGELES-PÉREZ, G.; SANTOS-POSADAS, H. M. D. L. y C. A. AGUIRRE-SALADO. 2017. "Inventario y mapeo de un bosque bajo manejo de pino con datos del sensor SPOT 6". *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(39): 25-44.
- XIUWAN, C. 2002. "Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development". *International journal of remote sensing*, 23(1): 107-124.