

Eficacia de diferentes métodos de clasificación de imágenes Landsat 8 OLI y TIRS para inventarios en el área cañera del departamento Lules, Tucumán, R. Argentina

Carmina Fandos*, Marcelo L. Gandini** y Federico J. Soria*

RESUMEN

La información de superficie y producción de caña de azúcar al comienzo de la zafra es fundamental para planear estrategias de cosecha, logística y comercialización. Su estimación mediante tecnologías basadas únicamente en relevamientos a campo implica costos altos. La teledetección espacial permite reducir los costos en las determinaciones de los usos y coberturas de la tierra. Los sensores Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS) a bordo del satélite Landsat 8, con sus bandas en el rango del visible al infrarrojo térmico, constituyen una alternativa para diferenciar coberturas vegetales, considerando que la vegetación presenta baja respuesta espectral en el visible, más elevada en el infrarrojo cercano y menor en el infrarrojo medio; y que las cubiertas vegetales presentan temperaturas más bajas que su entorno durante el día, lo que facilita su diferenciación de otras coberturas. Los objetivos fueron evaluar diferentes técnicas de clasificación multispectral en las bandas correspondientes al rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio del sensor OLI y en las bandas térmicas del sensor TIRS, y como producto del análisis estimar superficie y producción de caña de azúcar mediante procesamiento SIG. El estudio de las bandas 4, 5 y 6 permitió constatar la mayor separabilidad entre coberturas y niveles de producción de caña de azúcar en la banda 5. La combinación de bandas situadas en el infrarrojo medio y térmico mejoró la precisión de las clasificaciones. La clasificación de máxima probabilidad de las bandas 4, 5 y 6 restringida por la banda 10 sería la indicada para cañaverales con niveles de producción en proporciones similares, o con un predominio del nivel bajo. La clasificación por árbol de decisión de la banda 5 restringida por la banda 10 sería la más adecuada para zonas con predominio de niveles medio y alto de producción.

Palabras clave: clasificación multispectral, árbol de decisión, SIG.

ABSTRACT

Efficacy of different methods of classification in images landsat 8 OLI and TIRS for inventories in the sugarcane planted area of the Lules department . Tucuman, R. Argentina

Information about sugarcane planted area and production at the beginning of the harvest is fundamental for the planning of harvesting strategies, logistics and marketing. Their estimation, using technologies based only on field surveys, involves considerable effort, and high costs. Spatial remote sensing allows to reduce costs in land use/land cover determinations. The Operational Land Imager (OLI) and the Thermal Infrared Sensor (TIRS) on board of Landsat 8 satellite, with their bands in the range from visible to thermal infrared, constitute an alternative for the discrimination of vegetation covers, taking into account that vegetation has a reduced spectral response in the visible, higher in the near infrared and lower in the mid infrared; and that vegetation covers present lower temperatures than their environment during the day, which facilitates their differentiation from other covers. The objectives were to evaluate different multispectral classification techniques using the red, near infrared and middle infrared bands of the OLI sensor, and the thermal bands of TIRS sensor, and as a product of the analysis, estimate crop area and sugarcane production by GIS processing. The study of bands 4, 5 and 6 showed that band 5 has the greatest separability between coverages and between sugarcane production levels. The combination of mid-infrared and thermal spectral bands achieved improved classification accuracy. Precision reached in the classification of different production levels indicates that the maximum likelihood classification restricted by band 10 would be adequate for the identification and quantification of sugarcane crops and production levels, in the case of similar proportions of the three production levels, or with a predominance of the low production level. The classification by decision tree of band 5 restricted by band 10 would be the most appropriate for areas with predominantly medium and high levels of production.

Key words: multispectral classification, decision tree, GIS.

Fecha de recepción: 23/01/2020 - Fecha de aceptación: 19/08/2020

* Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán.

** Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Bs. As. E-mail: carminaf@eeaac.org.ar

INTRODUCCIÓN

La economía tucumana está directamente relacionada con la agroindustria derivada de la caña de azúcar, cultivo con un alto nivel de arraigo cultural y parte importante del desarrollo agrícola e industrial de la provincia (Giancola *et al.*, 2012).

El conocimiento de la superficie implantada y de la producción probable de caña de azúcar previo al inicio de la zafra facilita el planeamiento de las estrategias de cosecha, logística y comercialización. La estimación de dicha información, mediante tecnologías basadas únicamente en relevamientos a campo, implica costos altos, tanto económicos como operativos, y conlleva un lapso considerable de tiempo (Soria *et al.*, 2000).

Las tecnologías basadas en la teledetección espacial han permitido reducir los costos y el tiempo invertido en la identificación de los usos de la tierra, destacándose la diferenciación de coberturas vegetales utilizando información satelital (Chuvieco, 2000). En el campo de la agricultura se destaca la identificación y extensión de cultivos, seguimiento y predicción de cosechas (Sobrinho *et al.*, 2000).

El sensor Thematic Mapper (TM) del satélite Landsat 5 es muy utilizado en la diferenciación de coberturas vegetales, debido a la distribución estratégica de sus bandas en el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio del espectro electromagnético, teniendo en cuenta que la vegetación presenta baja respuesta espectral en el visible, más elevada en el infrarrojo cercano y menor en el infrarrojo medio (Chuvieco, 2000; Moreira, 2012).

El sensor TM también fue incorporado en los satélites Landsat 6 y 7. El Landsat 6, lanzado en 1993, fue un fracaso, ya que por fallos de comunicación con la plataforma no se ubicó en la órbita precisa y se perdió. El Landsat 7 fue lanzado en 1999. Incluía una versión mejorada del sensor TM, el ETM+ (Enhanced Thematic Mapper). El 31 de mayo de 2003 se produjo una falla en uno de sus scanners, resultando en imágenes con significativa pérdida de datos (NASA, 2014).

Con respecto al cultivo de caña de azúcar y el sensor TM, Noonan (1999) señala que mediante clasificaciones no supervisadas (con todas las bandas del TM y de las bandas 3, 4 y 5 solamente) y con Índice Infrarrojo se pudo predecir el tonelaje global de caña de azúcar en dos distritos de Queensland, Australia. Dicho autor destaca que la clasificación no supervisada es el primer paso para identificar áreas de variación de productividad y a partir de ella se puede mejorar la calibración de clases de productividad utilizando una clasificación supervisada.

En un trabajo realizado a nivel regional, Volante *et al.* (2004) concluyen que es posible identificar y cuantificar las áreas ocupadas con caña de azúcar utilizando imágenes TM y metodologías de clasificación multispectral. Por otra parte, Soria *et al.* (2000; 2007) estimaron superficie y diferenciaron niveles de rendimiento de caña de azúcar en Tucumán, con un nivel de precisión satisfactorio, empleando metodologías de clasificación digital de imágenes TM y Terra ASTER.

En los últimos años se están considerando también imágenes térmicas para el estudio de la vegetación, debido a la característica de las cubiertas vegetales de presentar temperaturas más bajas que su entorno durante el día, lo que facilita su diferenciación de otras cobertu-

ras (Chuvieco, 2000; Moreira, 2012). En Andrade Abe *et al.* (2017) se analiza la banda térmica 10 del sensor TIRS, en combinación con las bandas 4, 5 y 6 para mejorar la diferenciación de zonas antropizadas y zonas naturales en la isla de Santa Catarina, Brasil. Veiga de Camargo *et al.* (2015) estudiaron la banda 10 del sensor TIRS para evaluar el efecto del daño del barrenador de la caña de azúcar en la reflectancia del cultivo en una localidad de Sao Paulo, Brasil, y comprobaron que el daño del tejido vegetal llevó a una disminución en la absorción de calor, favoreciendo el aumento de la reflectividad.

Las clasificaciones basadas solo en los valores espectrales de la imagen no siempre permiten separar cubiertas. Pueden existir distintas categorías informacionales con un comportamiento espectral similar. En ese caso, se puede utilizar información auxiliar (topografía, suelos, etc.), lo que se facilita notablemente por la creciente conexión con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Chuvieco, 2000). Nguyen and Pham (2016) mencionan que fue posible mejorar la precisión de clasificaciones de coberturas vegetales a partir de imágenes Landsat 8 utilizando información auxiliar, por ejemplo modelos digitales de elevación.

El sensor TM, a bordo del satélite Landsat 5, fue ampliamente utilizado para el estudio de coberturas vegetales hasta el cese de funciones en noviembre de 2011. En febrero de 2013 fue lanzado el satélite LDCM, Landsat Data Continuity Mission, luego rebautizado como Landsat 8. Lleva a bordo dos instrumentos: Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras; y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como nubes, agua y nieve. Por otra parte, el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+ (NASA, 2014).

Las bandas 4, 5 y 6 del sensor OLI son similares a las bandas 3, 4 y 5 del sensor TM (NASA, 2014). Existen antecedentes de relevamientos de caña de azúcar utilizando las bandas 4, 5 y 6 del sensor OLI. Silva Dias *et al.* (2017) realizaron la identificación y monitoreo de caña de azúcar en el municipio de Ituiutaba, Brasil, aplicando un análisis visual de las bandas 4, 5 y 6, mientras que Cechim Júnior *et al.* (2015) mencionan que mediante clasificación multispectral supervisada de las bandas 4, 5 y 6 fue posible el mapeo y estimación de áreas cultivadas con caña de azúcar en el estado de Parana, Brasil.

La similitud de bandas espectrales, sumada a la necesidad de dar continuidad al monitoreo de los cultivos de caña de azúcar y a la disponibilidad de imágenes sin costo, permiten suponer que el sensor OLI podría ser utilizado para estimar superficie y diferenciar niveles de producción en caña de azúcar.

Los objetivos del trabajo fueron evaluar la eficacia de diferentes técnicas de clasificación multispectral para identificar cultivos de caña de azúcar con diferentes nive-

les de rendimiento, utilizando la información de las bandas correspondientes al rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio del sensor OLI y las bandas térmicas del sensor TIRS de Landsat 8, y estimar la superficie y producción de caña de azúcar mediante procesamiento SIG.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El marco espacial se circunscribe al departamento Lules de la provincia de Tucumán, República Argentina. El área específica de estudio abarca alrededor de 23.000 ha y comprende las regiones de Pedemonte y Llanura, donde se desarrolla la caña de azúcar. En la Figura 1 se expone la situación relativa del área de estudio.

Ordenamiento de la información de campo

Se construyó un SIG del área de estudio cargando archivos existentes y elaborando nuevos archivos en formato vector con una base de datos asociada de la información de campo relevada.

Entre los archivos digitales existentes se encontraban el Bosquejo Agrológico de la provincia de Tucumán (Zuccardi y Fadda, 1985), las capas digitales contenidas en el Atlas Tucumán 100 K y las coberturas temáticas surgidas de las clasificaciones digitales de soja y cítricos para el año 2014 (Fandos *et al.*, 2014a; Fandos *et al.*, 2014b).

Se contó con la información de campo obtenida de tres grandes empresas que poseen cañaverales en el departamento Lules, a las que se denominó A, B y C. Parte de la información fue recibida en formato papel y otra parte en formato digital (planilla de cálculo Excel), por lo que en primera instancia se digitalizaron los lotes en formato vector y se elaboró una base de datos asociada. Los datos relevados fueron: localización, número de surcos, variedad, edad (año de plantación), estimación de rendimiento para la zafra 2014, etc.

Se dispuso de la información de 215 lotes cañeros que totalizaron 6738 ha. Con respecto a las variedades se identificaron dos: la predominante LCP 85-384, que ocupaba el 96% de la superficie, y TUC 95-10, el 4% restante. La información relativa a variedades concuerda con la informada por Ostengo *et al.* (2014), donde se indica que la variedad de caña de azúcar predominante en el departamento Lules para la campaña 2013/2014 fue LCP 85-384, con el 90,14%; seguida por TUC 95-10, con el 3,92%.

En lo relativo a edad, se constató que el 21% correspondía a cañaverales implantados en 2013, 20% en 2012, 30% en 2011, 15% en 2010, 7% en 2009, 5% en

2008 y 2% en 2007.

Con respecto a las estimaciones de producción, el 9% de los lotes presentaba rendimientos de menos de 56 t/ha; el 53% entre 57 y 75 t/ha, mientras que el 38% restante correspondía a cañaverales de más de 76 t/ha. La mayor proporción de cañaverales que superaban las 57 t/ha pertenecían en gran medida a cultivos jóvenes.

La Figura 2 muestra la disposición geográfica de los lotes con caña de azúcar relevados para el estudio.

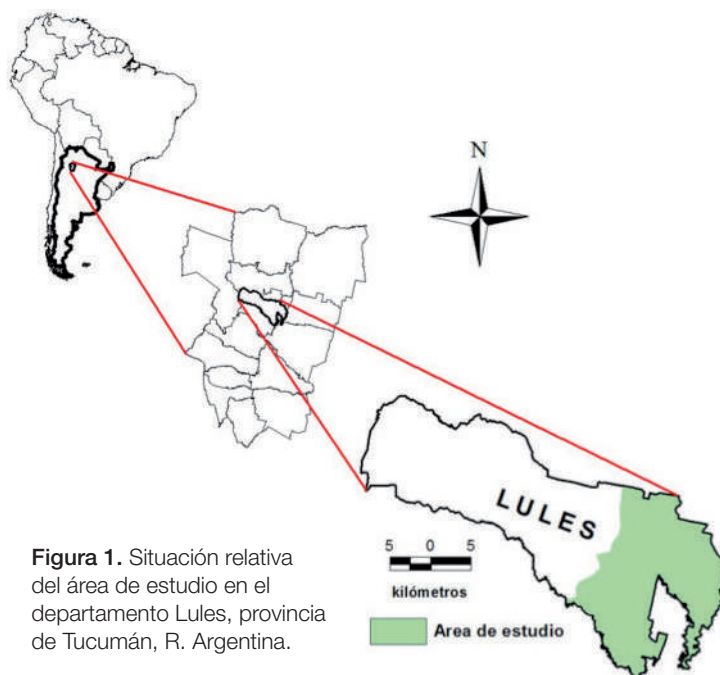


Figura 1. Situación relativa del área de estudio en el departamento Lules, provincia de Tucumán, R. Argentina.

Selección de imágenes y transformaciones geométricas

Varios autores (Rudorff and Batista, 1990; Soria *et al.*, 2000; Bappel *et al.*, 2005) recomiendan, para caña de azúcar, utilizar imágenes previas a la cosecha, cuando el dosel se ha desarrollado plenamente. Tomando en cuenta esta recomendación, se utilizó una imagen Landsat 8

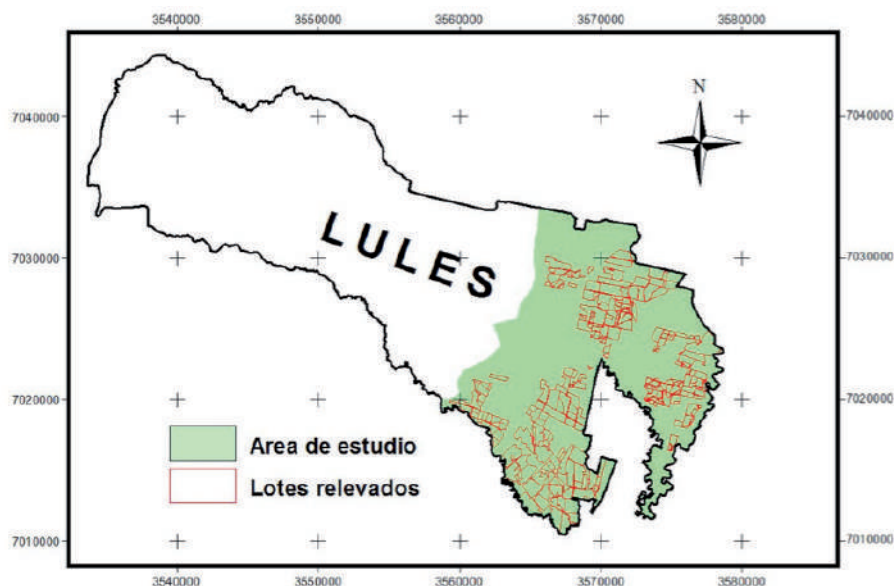


Figura 2. Disposición geográfica de los lotes con caña de azúcar relevados en el área de estudio.

OLI correspondiente a la órbita/punto 231/079, obtenida el 17 de marzo de 2014. Esta imagen fue adquirida a través del sitio GloVis perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey, USGS, <http://glovis.usgs.gov/>).

Si bien la fecha de la imagen analizada no se corresponde con la inmediatamente anterior a la cosecha, puesto que la zafra recién se inicia en el mes de mayo, se consideró adecuada debido a que alrededor de esa fecha los cañaverales se encuentran finalizando el período de gran crecimiento, en el que los tallos ya alcanzaron el número, la altura y el peso de cosecha, componentes principales del rendimiento cultural, es decir el tonelaje por hectárea (Romero *et al.*, 2009).

En este trabajo se utilizó información de las bandas 4, 5 y 6 del sensor OLI y las bandas 10 y 11 del sensor TIRS de Landsat 8. En la Tabla 1 se indican las características de las bandas correspondientes a dichos sensores.

La imagen empleada tiene un nivel 1 de procesamiento, es decir que se encuentra corregida radiométrica y geométrica para cada banda. Para adaptarla a la proyección oficial fue reproyectada a Gauss - Krüger, faja 3, meridiano central 66° O.

Teniendo en cuenta distintos criterios se realizaron diferentes procesos de enmascaramiento de la imagen. En primera instancia, se restringió la imagen al departamento Lules. Seguidamente, tomando como base la Ley 6292 de Recursos Naturales Renovables y Áreas Naturales Protegidas de Tucumán, que prohíbe realizar desmontes para agricultura en terrenos con pendientes superiores al 10%, se procedió a enmascarar las zonas no aptas para uso agrícola, por ubicarse en pendientes elevadas y poseer cobertura boscosa. Para ello se generaron curvas de nivel, a partir del modelo de elevación (MDE) generado por la Misión Topográfica Radar Shuttle (en inglés, Shuttle Radar Topography Mission - SRTM), y a partir de estas se derivó un mapa de pendientes. Finalmente se enmascararon las zonas con pendientes por encima de 10%.

Procesamiento de la imagen satelital, clasificación digital

En la clasificación digital se distinguen las siguientes fases: entrenamiento, asignación y comprobación y verificación de resultados.

Los métodos de clasificación pueden ser supervisados o no supervisados, de acuerdo a la forma en que se obtienen las estadísticas de entrenamiento. En el presente estudio se utilizó el método supervisado. Inicialmente se realizó un análisis visual en las bandas ópticas con la finalidad de detectar los grupos espectrales homogéneos; para ello se utilizó el conocimiento de campo y la información auxiliar existente, que permitieron definir *a priori* las clases a discriminar, entre ellas, los tres niveles de producción de caña de azúcar: alto (mayor a 75 t/ha), medio (56 a 75 t/ha) y bajo (menor a 56 t/ha). Estos niveles de producción fueron determinados para cultivos de caña de la provincia de Tucumán por Soria *et al.* (2000). Seguidamente se

realizó la toma de las áreas de entrenamiento muestras y la construcción de gráficos para el estudio de las estadísticas.

En la Figura 3 se expone un diagrama de dispersión espectral de las cubiertas analizadas, en las bandas 4, 5 y 6. La mayor separabilidad entre niveles de caña de azúcar y demás coberturas se manifiesta en la banda 5. Se constata, además, la gran dispersión de la categoría soja, que se solapa con todos los niveles de producción. El nivel bajo de producción se solapa además con las categorías cítricos, bosque montano inferior subtropical, arbustal y vegetación de margen río, principalmente. Cabe resaltar que la firma espectral de la “cobertura frutilla” después fue denominada como categoría “Plástico frutilla”, porque se corresponde principalmente con el plástico negro con que se cubren los suelos donde se efectúan las plantaciones en marzo; mientras que la categoría “Hortícolas” corresponde a lotes con vegetación que no cubre totalmente el terreno.

En base a la similitud espectral y las características comunes que presentaban ciertas coberturas se optó por la agrupación de algunas de ellas para realizar la fase de asignación. Es así que en la categoría “Urbano” se agrupó las coberturas urbano, rutas y plástico invernadero, este último transparente; “Agua” incluyó ríos y efluentes; “Hortícolas y frutales arbustivos” concentró ambas categorías, mientras que “Suelo” englobó los suelos con escasa vegetación y suelos desnudos.

En la Tabla 2 se observa una evaluación numérica de la separabilidad entre las firmas luego de realizar el agrupamiento, considerando las bandas 4, 5 y 6. La misma confirma las valoraciones efectuadas previamente sobre las posibles confusiones entre clases.

Seguidamente se analizaron las bandas térmicas 10 y 11, cuyo diagrama de dispersión espectral entre cubiertas se expone en la Figura 4. Se aprecia en la banda 10 mayores Niveles Digitales (ND) que en la banda 11. En ambas, la separación espectral entre niveles de producción es escasa; sin embargo, en la banda 10 se observó separación espectral de coberturas, como la de Hortícolas y frutales arbustivos, Plástico frutilla, Urbano y Suelo, las cuales presentaban valores digitales más elevados que las restantes coberturas.

Tabla 1. Regiones del Visible e Infrarrojo del espectro electromagnético y sensores OLI TIRS. Fuente: NASA, 2014.

| Espectro electromagnético (um) | Sensor | Bandas | Resolución Espectral (um) | Resolución Espacial (m) |
|--|--------|--------|---------------------------|-------------------------|
| | OLI | 8 | 0,50 - 0,68 | 15 |
| Azul 0,40- 0,50 | | 1 | 0,43 - 0,45 | 30 |
| Verde 0,50 - 0,60 | | 2 | 0,45 - 0,51 | 30 |
| Rojo 0,60 - 0,70 | | 3 | 0,52 - 0,60 | 30 |
| Infrarrojo Cercano 0,70 - 1,30 | | 4 | 0,63 - 0,68 | 30 |
| | | 5 | 0,84 - 0,88 | 30 |
| Infrarrojo Medio 1,30 - 8,00 | | 9 | 1,36 - 1,39 | 15 |
| | TIRS | 6 | 1,56 - 1,66 | 30 |
| | | 7 | 2,10 - 2,30 | 30 |
| Infrarrojo lejano o térmico 8,00 - 14,00 | | 10 | 10,60- 11,19 | 100 |
| | | 11 | 11,50 - 12,51 | 100 |

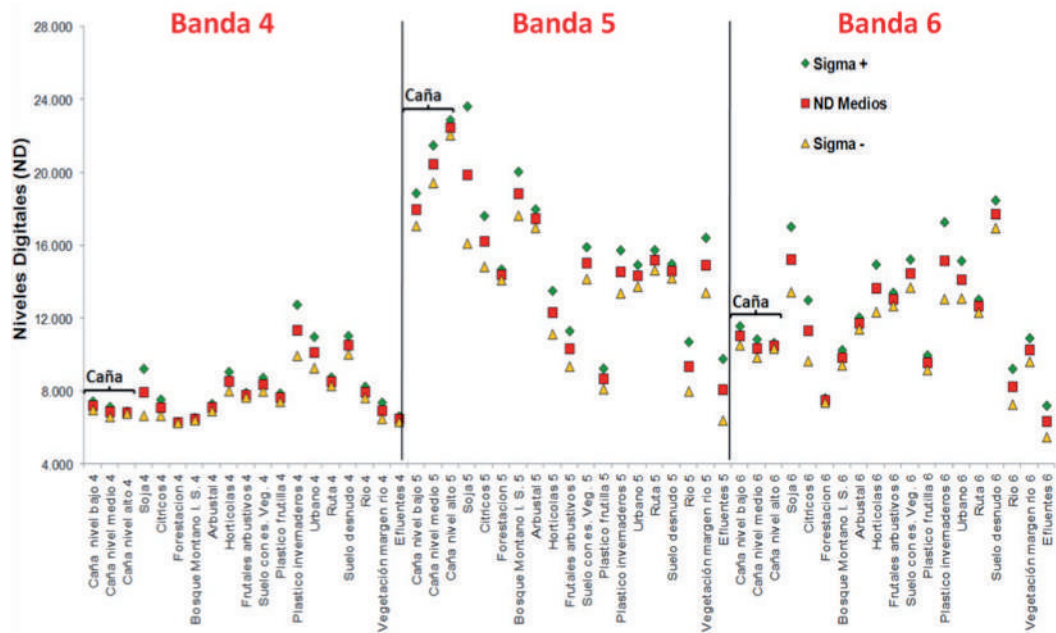


Figura 3. Diagrama de dispersión de las coberturas en el área de estudio. Bandas 4, 5 y 6 del sensor OLI del satélite Landsat 8.

Tabla 2. Separación numérica entre categorías, considerando las bandas 4,5 y 6 del sensor OLI del satélite Landsat 8.

| Categoría | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
|---------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|
| Plástico Frutilla | 1 | 0 | 6177 | 9897 | 7975 | 5220 | 11977 | 5591 | 8777 | 11472 | 13743 | 7510 | 12482 | 7700 |
| Forestación | 2 | 6177 | 0 | 4787 | 3030 | 2195 | 10318 | 6898 | 4832 | 6477 | 8595 | 7294 | 9616 | 4316 |
| Bosque Montano | 3 | 9897 | 4787 | 0 | 1968 | 4715 | 7272 | 7559 | 1967 | 1731 | 3932 | 6630 | 5733 | 2843 |
| Margen río | 4 | 7975 | 3030 | 1968 | 0 | 2826 | 7757 | 6291 | 1986 | 3666 | 5899 | 5901 | 6717 | 1942 |
| Agua | 5 | 5220 | 2195 | 4715 | 2826 | 0 | 8631 | 4749 | 3860 | 6308 | 8570 | 5174 | 8344 | 2998 |
| Suelos | 6 | 11977 | 10318 | 7272 | 7757 | 8631 | 0 | 6625 | 5814 | 6849 | 7693 | 4707 | 2434 | 6050 |
| Hortícolas y frutales arbustivo | 7 | 5591 | 6898 | 7559 | 6291 | 4749 | 6625 | 0 | 5706 | 8592 | 10659 | 2460 | 7640 | 4725 |
| Caña nivel bajo | 8 | 8777 | 4832 | 1967 | 1986 | 3860 | 5814 | 5706 | 0 | 2930 | 5129 | 4686 | 4809 | 1168 |
| Caña nivel medio | 9 | 11472 | 6477 | 1731 | 3666 | 6308 | 6849 | 8592 | 2930 | 0 | 2273 | 7265 | 4961 | 4053 |
| Caña nivel alto | 10 | 13743 | 8595 | 3932 | 5899 | 8570 | 7693 | 10659 | 5129 | 2273 | 0 | 9121 | 5486 | 6267 |
| Urbano | 11 | 7510 | 7294 | 6630 | 5901 | 5174 | 4707 | 2460 | 4686 | 7265 | 9121 | 0 | 5853 | 4116 |
| Soja | 12 | 12482 | 9616 | 5733 | 6717 | 8344 | 2434 | 7640 | 4809 | 4961 | 5486 | 5853 | 0 | 5410 |
| Cítricos | 13 | 7700 | 4316 | 2843 | 1942 | 2998 | 6050 | 4725 | 1168 | 4053 | 6267 | 4116 | 5410 | 0 |

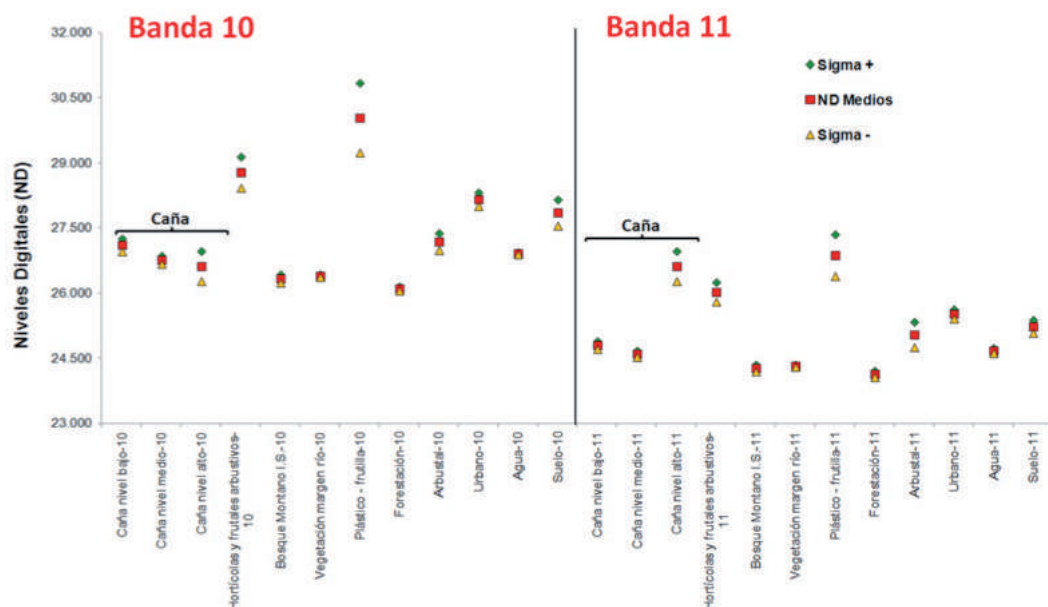


Figura 4. Diagrama de dispersión de las coberturas seleccionadas. Bandas 10 y 11 del sensor TIRS del satélite Landsat 8.

Debido al solapamiento entre las coberturas de soja y cítricos con los cultivos de caña de azúcar y considerando que dichos cultivos ocupaban extensiones importantes en el área analizada, se optó por enmascarar las zonas con cítricos o soja, previo a la fase de asignación. El enmascaramiento se realizó utilizando las coberturas temáticas de granos y cítricos generadas por Fandos *et al.* (2014a; 2014b). Sobre la imagen restringida, se realizó el proceso de asignación utilizando el criterio de máxima probabilidad.

Posteriormente, considerando el comportamiento espectral de la banda térmica 10, que presentaba mayores valores de ND en las coberturas con escasa vegetación que aquellas con vegetación predominante, se aplicó una clasificación por árbol de decisión con la finalidad de separar caña de azúcar, y demás cubiertas vegetales, de aquellas con escasa cobertura vegetal.

Seguidamente, la cobertura temática generada en el proceso de clasificación en árbol de la banda 10 se utilizó para separar caña de azúcar y demás cubiertas vegetales de las categorías de escasa cobertura vegetal, Hortícolas y frutales arbustivos, Plástico frutilla, Urbano y Suelo. Sobre la imagen resultante se realizó el proceso de

asignación. Se efectuó una clasificación multiespectral supervisada, adoptando el criterio de máxima probabilidad, utilizando el juego de firmas espectrales de las coberturas definidas en la fase de entrenamiento.

Por otra parte, teniendo en cuenta que en la banda 5 se detectaba la mayor separabilidad entre niveles de caña de azúcar y demás coberturas, se realizó una clasificación de la banda 5 por árbol de decisión. En la Figura 5 se exhiben esquemas de las fases de entrenamiento y asignación.

La verificación de la fiabilidad de los resultados de las clasificaciones fue realizada mediante el análisis de matrices de confusión. Para ello se seleccionaron 256 puntos de manera aleatoria y se comparó la precisión global y la precisión por categoría de producción.

Para la estimación de la producción de caña de azúcar se calcularon las medias ponderadas de cada nivel de producción, a partir de los datos de los lotes relevados, y cada valor fue multiplicado por la superficie correspondiente.

Finalmente, se elaboraron los mapas temáticos.

En el trabajo se utilizaron los softwares ERDAS Imagine 8.4 y ARC View 3.3.

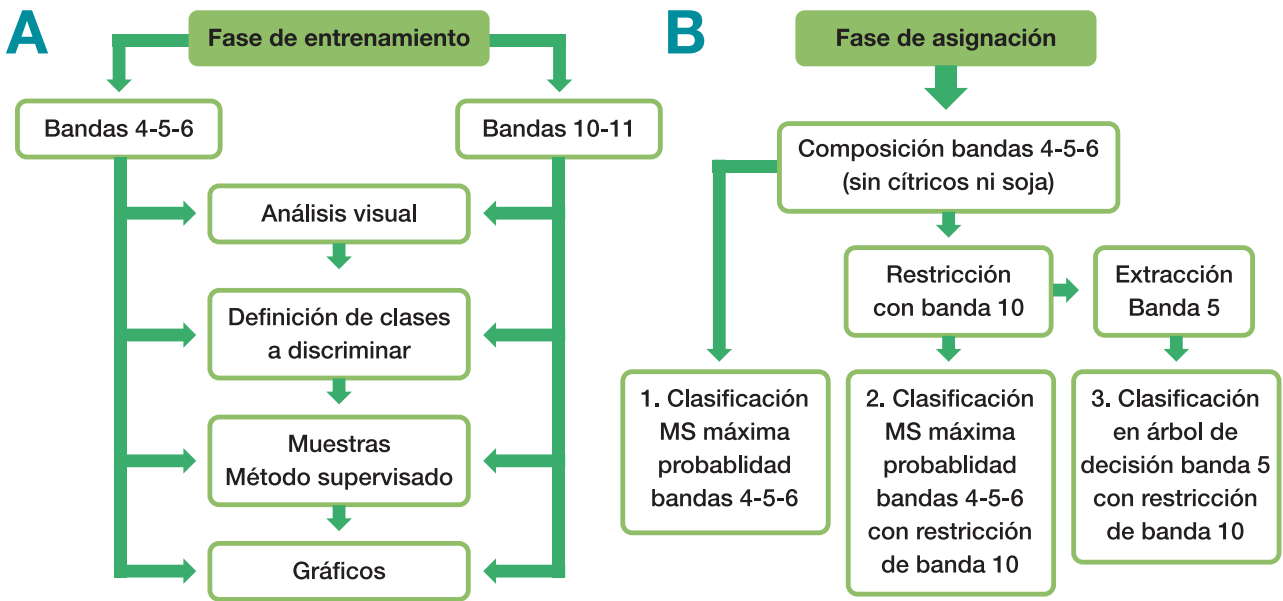


Figura 5. A: Esquema de la fase de entrenamiento. B: Esquema de la fase de asignación. MS: multiespectral.

RESULTADOS

Restricciones de la imagen

En la Figura 6 se expone la imagen restringida al departamento Lules, en composición RGB: 5-6-4, es decir, al cañón rojo se le asignó la banda 5; al verde, la banda 6 y al azul, la banda 4. Esta combinación permite una adecuada discriminación de cubiertas vegetales (Chuvienco, 2000).

Los cultivos de caña de azúcar se aprecian en tonalidades rojizas (Silva Dias *et al.*, 2017), mientras que los cultivos de

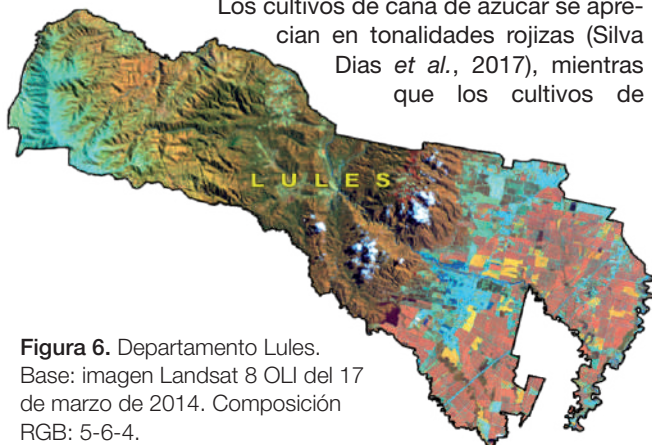


Figura 6. Departamento Lules. Base: imagen Landsat 8 OLI del 17 de marzo de 2014. Composición RGB: 5-6-4.

soja se observan en amarillo. Los cítricos se observan en tonalidades marrones, similares a las zonas forestadas y la vegetación arbórea de áreas montañosas; los lotes destinados a cultivos de frutilla se distinguen en azul debido a la cobertura plástica de los bordos, en tanto que las zonas urbanas y los suelos desnudos se aprecian en tonalidades celestes en general.

La segunda restricción se realizó para enmascarar las zonas no aptas para cultivo por presentar pendientes elevadas. Las Figuras 7 a 9 muestran las distintas etapas seguidas para la generación de las pendientes del departamento Lules y del enmascarado en zonas con pendientes superiores al 10%. En la Figura 7 se aprecia el MDE del departamento Lules en escala de grises (Figura 7A) y en escala de colores (Figura 7B). Se constata que las alturas se van incrementando de este a oeste, con valores extremos de 363 m y 3395 m aproximadamente, por lo que el paisaje va cambiando de llanura a zona de alta montaña.

En la Figura 8 se observan las curvas de nivel generadas a partir del MDE, mientras que en la Figura 9 se muestra el archivo TIN y la cobertura de pendientes. Se puede apreciar que las pendientes se incrementan de este a oeste, con valores entre 0% y superiores al 100%.

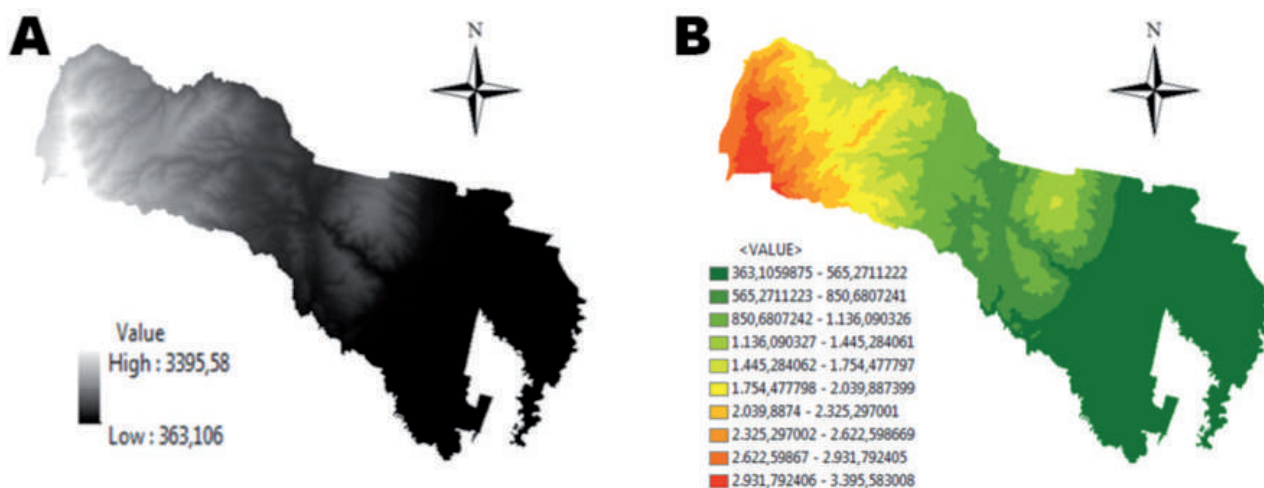


Figura 7. Departamento Lules. MDE SRTM. Altura (m). A: escala de grises; B: escala de color.

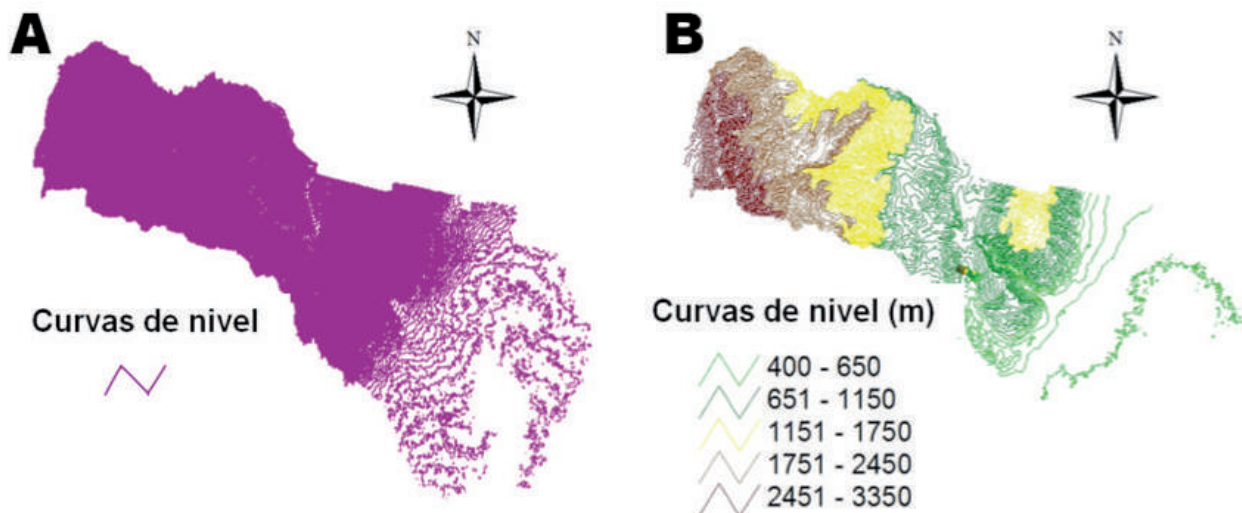


Figura 8. Departamento Lules. Curvas de nivel a partir de MDE SRTM (m). A: total de curvas; B: graduación de curvas.

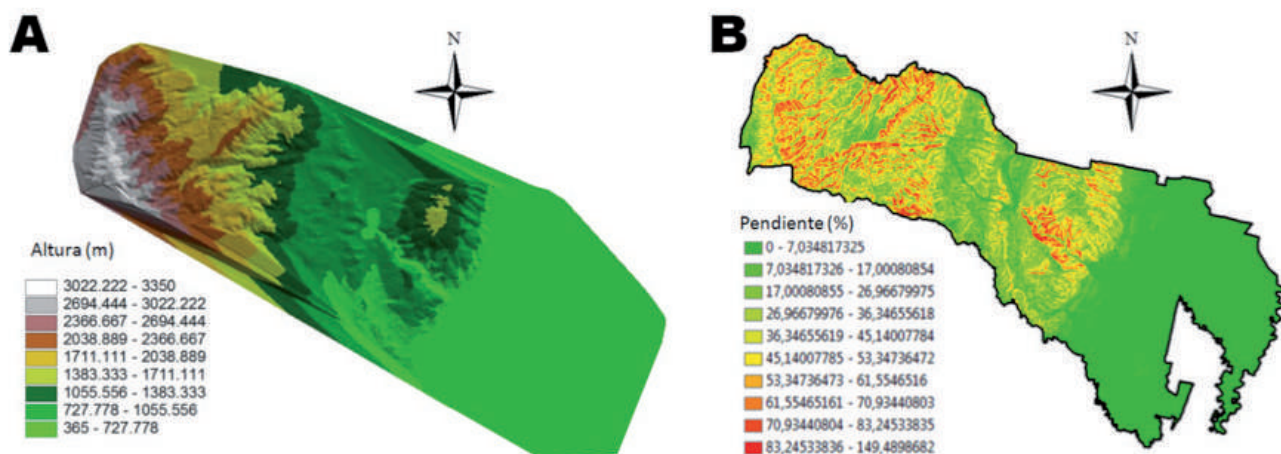


Figura 9. Departamento Lules. Archivos a partir de MDE SRTM (m). A: altura, modelo TIN; B: pendientes.

La Figura 10 muestra las zonas del departamento Lules con pendientes superiores al 10%.

Seguidamente se realizó la tercera restricción para enmascarar los cultivos de soja y cítricos (Figura 11). La imagen resultante fue utilizada como base para la clasificación multiespectral supervisada (MS) de máxima probabilidad de la imagen compuesta por las bandas 4, 5 y 6.

El análisis de las bandas térmicas reveló la posibilidad de separar coberturas vegetales de aquellas con escasa vegetación utilizando la banda 10. En la Figura 12 se exhibe la imagen resultante de todos los procesos restrictivos, incluida la restricción de las cubiertas con escasa vegetación. Dicha imagen fue usada como base para la clasificación MS de máxima probabilidad de las bandas 4, 5 y 6, y la clasificación en árbol de decisión de la banda 5, ambas con restricción de la banda térmica 10.

Clasificación digital

En la Figura 13 se exponen los mapas temáticos resultantes de la clasificación multiespectral supervisada (MS) de máxima probabilidad de la imagen compuesta por las bandas 4, 5 y 6, y de la clasificación de máxima probabilidad de las bandas 4, 5 y 6 con restricción de la banda 10.

En la Figura 14 se muestra el mapa temático correspondiente a la clasificación en árbol de decisión de la banda 5 con restricción de la banda térmica 10.

Los valores de fiabilidad obtenidos a partir de la matriz de confusión para las categorías de interés en las tres clasificaciones se indican en la Tabla 3.

La fiabilidad de un mapa se considera adecuada cuando la precisión global del mismo es mayor o igual a 80% (Chuvieco, 2000). Si se tiene en cuenta la fiabilidad de las clasificaciones en las categorías de caña de azúcar, surge que la clasificación 2 sería la más adecuada. Sin embargo, es importante considerar la proporción de cada nivel de producción. A igual proporción de los tres niveles, tendría menor incidencia en el cálculo de producción el nivel bajo.

En base al trabajo de campo se pudo constatar que en el área de estudio existe un predominio de los niveles medio y alto de producción, lo que deriva en la necesidad de contar con metodologías que permitan una adecuada discriminación de dichos niveles, dada su importancia cuantitativa al momento de calcular la producción de caña de azúcar. Entonces, si se considera el porcentual de distribución de los niveles productivos, surge

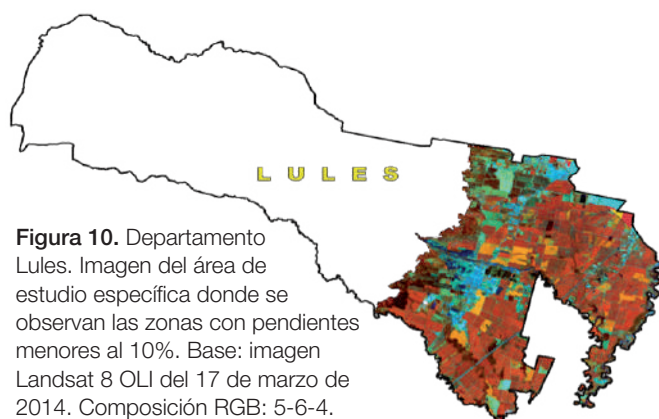


Figura 10. Departamento Lules. Imagen del área de estudio específica donde se observan las zonas con pendientes menores al 10%. Base: imagen Landsat 8 OLI del 17 de marzo de 2014. Composición RGB: 5-6-4.

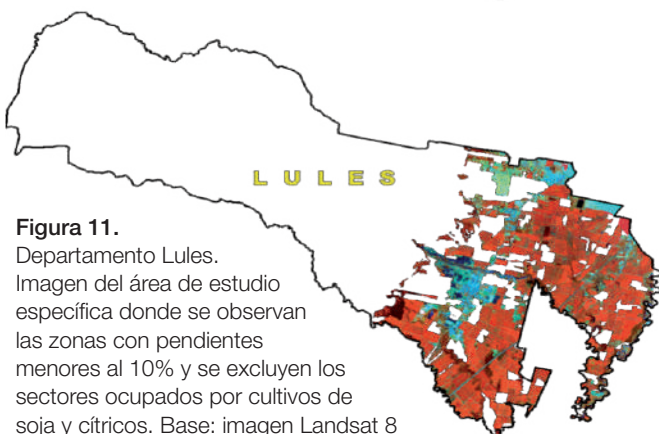


Figura 11. Departamento Lules. Imagen del área de estudio específica donde se observan las zonas con pendientes menores al 10% y se excluyen los sectores ocupados por cultivos de soja y cítricos. Base: imagen Landsat 8 OLI, 17 de marzo de 2014. Composición RGB: 5-6-4.

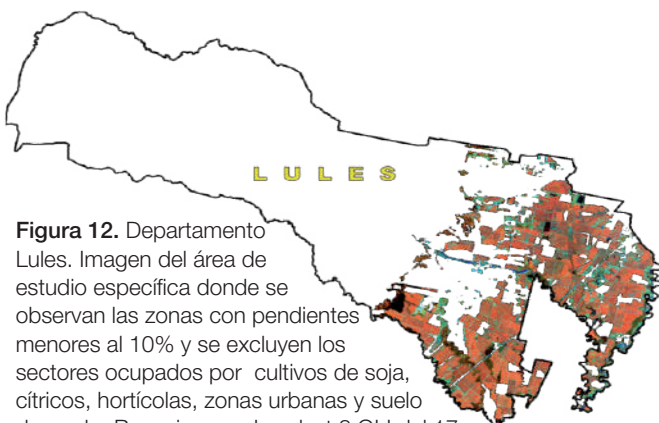


Figura 12. Departamento Lules. Imagen del área de estudio específica donde se observan las zonas con pendientes menores al 10% y se excluyen los sectores ocupados por cultivos de soja, cítricos, hortícolas, zonas urbanas y suelo desnudo. Base: imagen Landsat 8 OLI del 17 de marzo de 2014. Composición RGB: 5-6-4.

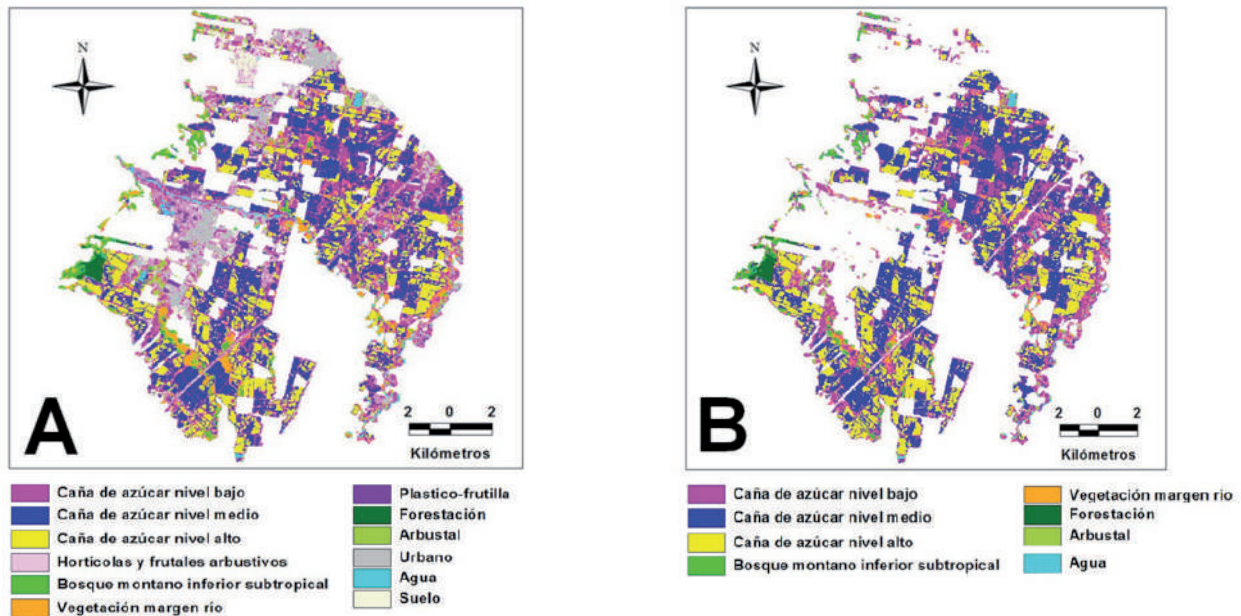


Figura 13. A: Clasificación MS de máxima probabilidad, bandas 4, 5 y 6. B: Clasificación MS de máxima probabilidad, bandas 4, 5 y 6, con restricción de banda térmica 10.

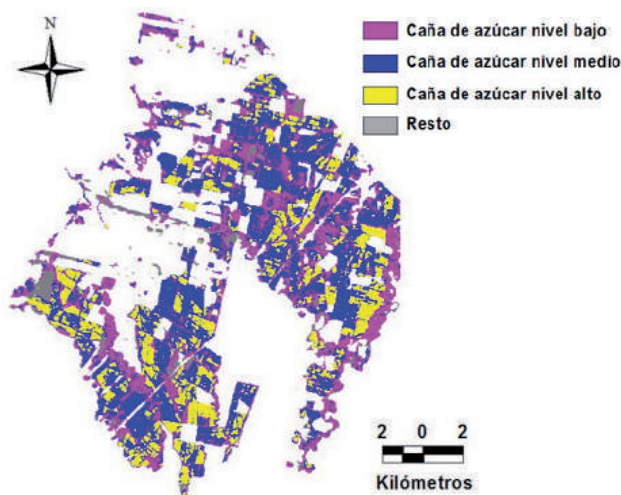


Figura 14. Clasificación en árbol de decisión. Banda 5 con restricción de banda térmica 10.

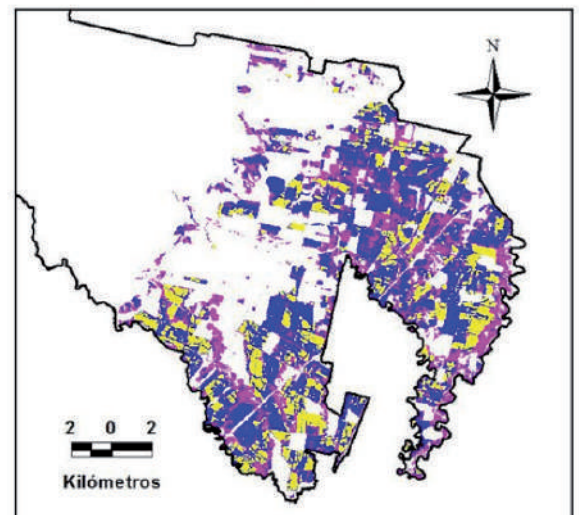
Tabla 3. Comparación de la fiabilidad de las clasificaciones según categorías de interés.

| Categorías | Fiabilidad (%) | | |
|----------------------------|--|--|---|
| | 1. Clasificación multiespectral supervisada Bandas 4-5-6 | 2-Clasificación multiespectral supervisada Bandas 4-5-6 (con restricción por banda 10) | 2-Clasificación en árbol de decisión Banda 5 (con restricción por banda 10) |
| Caña de azúcar nivel bajo | 71,43 | 77,14 | 65,00 |
| Caña de azúcar nivel medio | 78,79 | 89,22 | 88,89 |
| Caña de azúcar nivel alto | 72,13 | 77,94 | 81,82 |
| Caña de azúcar en general | 74,21 | 83,41 | 79,71 |
| Global | 75,00 | 80,08 | 93,75 |

que la clasificación 3 sería la más adecuada, puesto que presenta una fiabilidad general para el cultivo de caña de azúcar del 80%, y diferenciando en niveles, del 89% en el nivel medio y del 82% en el nivel alto de producción.

En la Figura 15 se exhibe el mapa de niveles de producción de caña de azúcar resultante del proceso de clasificación 3, con el inventario de la superficie estimada para cada uno de los niveles de producción. El cálculo final de producción se logró mediante la sumatoria del tonelaje obtenido para los tres niveles y alcanzó un valor total de 746.000 t de caña disponibles para la cosecha.

**Departamento Lules - Provincia de Tucumán
Área cañera por niveles de producción
Zafra 2014**



Niveles de producción de caña de azúcar

- Bajo (menos de 56 t/ha): 3.040 ha
- Medio (entre 56 y 75 t/ha): 5.540 ha
- Alto (más de 75 t/ha): 2.830 ha

Figura 15. Mapa del área cañera y estadísticas de producción de caña de azúcar. Departamento Lules, Tucumán, Argentina. Zafra 2014.

CONCLUSIONES

Los resultados permitieron el logro de los objetivos, los que estaban centrados en la evaluación de técnicas de clasificación multiespectral usando los sensores OLI y TIRS para la estimación de superficie y producción de caña de azúcar con procesamiento SIG.

En el proceso de clasificación digital, el conocimiento de campo, la información auxiliar y la generación de diferentes gráficos que resumen el comportamiento espectral de las diferentes coberturas facilitaron la visualización de las diferencias y similitudes entre clases, lo que contribuyó a la selección de las clases a discriminar.

La construcción de un SIG aportó a la concentración de la información disponible y su utilización en los procesos de clasificación.

El análisis de la información de campo permitió constatar el predominio de la variedad LCP 85-384, la que ocupaba el 96% de la superficie, valor concordante con la información relativa a variedades para el departamento Lules, que indicaba un porcentual del 90% para dicha variedad en el año 2014 (Ostengo *et al.*, 2014). Se destacó también en los lotes relevados el predominio de cañaverales con rendimientos medios y altos, asociados mayormente a cultivos jóvenes.

Nguyen and Pham (2016) mencionan que fue posible mejorar la precisión de clasificaciones de coberturas vegetales a partir de imágenes Landsat 8 utilizando información auxiliar, por ejemplo modelos digitales de elevación. En este estudio, la elaboración de un MDE simplificó la visualización del relieve y facilitó el enmascaramiento de las zonas no aptas para cultivo por presentar pendientes elevadas.

En la elección del sensor OLI como base para la presente investigación fue decisivo su poder de resolución espectral, que permite la discriminación de los cultivos predominantes en el área de estudio. Otras características destacables fueron la facilidad para la rápida disponibilidad de imágenes en las fechas previas al inicio de la zafra cañera, momento ideal para las estimaciones de producción, y la similitud con el sensor TM del satélite Landsat 5, utilizado exitosamente en estimaciones de producción de caña de azúcar.

En Andrade Abe *et al.* (2017) se analiza la banda térmica 10 del sensor TIRS, en combinación con las bandas 4, 5 y 6 para mejorar la diferenciación de zonas antropizadas y zonas naturales, y refieren una reducción del acuerdo entre los datos clasificados y los datos de referencia cuando se adicionó la banda 10. En el presente estudio, el análisis de las bandas 4, 5 y 6 permitió constatar que en la banda 5 se detectaba la mayor separabilidad entre coberturas y entre niveles de producción de caña de azúcar. La utilización de la banda 10 facilitó la separación de cubiertas vegetales de aquellas con escasa vegetación. La combinación de bandas espectrales situadas en el infrarrojo medio y térmico se tradujo en una mejora de la precisión en las clasificaciones.

Cechim Júnior *et al.* (2015) manifiestan que mediante clasificación multiespectral supervisada de máxima probabilidad de las bandas 4, 5 y 6 fue posible el mapeo y estimación de áreas cultivadas con caña de azúcar, obteniendo una precisión global del 94,75%. En este trabajo, la clasificación multiespectral supervisada de máxima probabilidad de las bandas 4,5 y 6 arrojó valores de fiabilidad

total del 75%, y del cultivo de caña de azúcar del 74%, aumentando la precisión al incorporar la restricción de la banda 10, con fiabilidad global del 80% y del 83% en caña de azúcar.

La clasificación por árbol de decisión de la banda 5 restringida por banda 10 presentó la mayor fiabilidad global, 94%, mientras que en caña de azúcar alcanzó el 80%.

La clasificación de máxima probabilidad restringida por la banda 10 sería la indicada para realizar la identificación y cuantificación de superficie de caña de azúcar y de niveles de producción, en el caso de contar con proporciones similares de los tres niveles productivos o bien con un predominio del nivel bajo. A la vez, la clasificación por árbol de decisión de la banda 5 restringida por la banda 10 sería la más adecuada para zonas con predominio de niveles medio y alto de producción.

El mapa temático de niveles de producción de caña de azúcar generado contribuye a una mejor planificación operativa de la cosecha y poscosecha y a la sectorización de ambientes que requieren manejos diferenciales.

En base a los resultados obtenidos se considera de suma importancia la adecuada planificación de la fase de trabajo de campo a los fines de conseguir un muestreo representativo de la proporción de las variedades y de los distintos niveles de producción de caña de azúcar del área que se encuentre en análisis. Dicha información direccionará la elección del método de clasificación.

La obtención de la información de superficie y producción de caña de azúcar al comienzo de la zafra es fundamental para el planeamiento de estrategias de cosecha, logística y comercialización. Las limitaciones de la estadística agraria convencional en relación a los altos costos, tanto económicos como operativos, y la lentitud en el proceso de recolección de los datos obligan a la búsqueda de otras metodologías que permitan agilizar la generación de estadísticas confiables de superficie y producción. En este sentido, la metodología de teledetección y SIG utilizando imágenes satelitales Landsat 8 desarrollada en esta investigación constituye un gran aporte al relevamiento de superficie y producción de cultivos de caña de azúcar, ya que permitiría la obtención de estadísticas confiables en lapsos cortos y con bajos costos.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Andrade Abe, C.; V. Souza Martins y E. Bertol Rosa. 2017.** Evaluation of two supervised classification techniques and the influences of thermal band application on target distinction: a case study of Santa Catarina Island, Brazil. En: Actas Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), XVIII, Santos, SP Brasil, pp. 40-47.
- Bappel, E.; A. Bégué; P. Degenne; V. Lebourgeois y B. Siegmund. 2005.** Real-time sugarcane harvest monitoring using spot 4 and 5 satellite data. International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT), XXV Congress, Jan. 30- Feb. 4 2005, Guatemala.
- Cechim Júnior, C.; R. Paloschi y J. Johan. 2015.** Uso de técnicas de geoprocessamento aplicadas ao mapeamento da cultura de cana-de-açúcar com imagens Landsat-8 no estado do Paraná. En: Actas Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), XVII, João Pessoa-PB, Brasil, pp. 5117-5124.

- Chuvieco, E. 2000.** Fundamentos de Teledetección Ambiental. 3º ed. Revisada. Ediciones RIALP, SA, Madrid.
- Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. J. Soria. 2014a.** Superficie cultivada con soja y maíz en la campaña 2013/2014 en la provincia de Tucumán. Comparación con campañas precedentes. Reporte Agroindustrial Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán 92, 8pp. [En línea] Disponible en <https://www.eeaoc.gov.ar/?publicacion=ra92-superficie-cultivada-con-soja-y-maiz-en-la-campana-20132014-en-la-provincia-de-tucuman-comparacion-con-campanas-precedentes> (consultado 19 junio 2017). Ediciones EEAOC. Tucumán.
- Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. J. Soria. 2014b.** Área implantada con cítricos en Tucumán en 2014 y comparación con años anteriores. Reporte Agroindustrial Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán 97. [En línea] Disponible en <https://www.eeaoc.gov.ar/?publicacion=ra97-area-implantada-con-citricos-en-tucuman-en-2014-y-comparacion-con-anos-antiores>. (consultado 19 junio 2017). Ediciones EEAOC. Tucumán.
- Giancola, S. I.; J. L. Morandi; N. Gatti; S. Di Giano; V. Dowbley y C. Biaggi. 2012.** Causas que afectan la adopción de tecnología en pequeños y medianos productores de caña de azúcar de la provincia de Tucumán. Enfoque cualitativo. Serie: Estudios socioeconómicos de la adopción de tecnología 1. [En línea] Disponible en <http://inta.gov.ar/documentos/causas-que-afectan-la-adopcion-de-tecnologia-en-pequenos-y-medianos-productores-de-cana-de-azucar-en-la-provincia-de-tucuman-enfoque-cualitativo/> (consultado 26 junio 2014). Ediciones INTA. Buenos Aires.
- NASA, 2014.** Landsat Science. Landsat 8 [En línea] Disponible en <http://landsat.gsfc.nasa.gov>. Actualizado 20 junio 2014 (consultado 23 junio 2014).
- Moreira, M. A. 2012.** Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4ª edição atualizada e ampliada. Editora Universidad Federal de Viçosa (UFV) Viçosa, Brasil.
- Nguyen, T. T. H. and T. T. T. Pham. 2016.** Incorporating ancillary data into Landsat 8 image classification process: a case study in Hoa Binh, Vietnam. *Environ Earth Sci* 75, 430. [En línea] Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5278-1> (consultado 12 agosto 2020).
- Noonan, M. 1999.** Classification of fallow and yields using Landsat TM data in the sugarcane lands of the Herbert River catchment. Herbert Resource Information Centre.
- Ostengo, S.; M. A. Espinosa; J. V. Díaz; E. R. Chavanne; D. Costilla y M. Cuenya. 2014.** Distribución de variedades comerciales de caña de azúcar en la provincia de Tucumán, R. Argentina. *Avance Agroindustrial* 35 (4): 10-14.
- Romero, E. R.; J. Scandaliaris; P. A. Digonzelli; M. F. Leggio Neme; J. A. Giardina; J. Fernández de Ulivarri; S. D. Casen; M. J. Tonatto y L. P. G. Alonso. 2009.** Capítulo 1: La caña de azúcar, características y ecofisiología. En: Romero, E. R.; P. A. Digonzelli y J. Scandaliaris (Eds.), *Manual del cañero*, EEAOC. Argentina, pp.13-21.
- Rudorff, B. F. T. and G. T. Batista. 1990.** Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological spectral methods. *Remote Sensing of Environment* 33 (3): 183-192.
- Silva Dias, B. A.; L. Castro Brumano Vicoso e J. Dos Santos Rosendo. 2017.** Atualização da área plantada com cana-de-açúcar no município de Ituiutaba-MG no ano de 2015 com imagens da série Landsat. En: *Actas Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), XVIII*, Santos, SP Brasil, pp. 2323-2330.
- Sobrino, J. A.; N. Raissouni; Y. Kerr; A. Oliosio; M. J. López-García; A. Belaid; M. H. El Kharraz; J. Cuenca y L. Dempere. 2000.** Teledetección. Sobrino, J. A. (Ed.), Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia. Valencia, España.
- Soria, F.; C. Fandos y J. Scandaliaris. 2000.** Determinación por imágenes satelitales del área cultivada con citrus y granos, y producción de caña de azúcar. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 77 (1): 49-69.
- Soria, F.; C. Fandos; J. Scandaliaris; M. Morandini y D. Perez. 2007.** Evaluación de los datos del sensor ASTER para estimar la superficie cultivada y los niveles de producción de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 84 (1): 23-26.
- Veiga de Camargo, F.; F. De Carvalho Alves; M. Goussain; J. Campos Moraes y R. De Cassia Santos Goussain. 2015.** Spectral signature of *Diatraea saccharalis* attack in sugarcane using Landsat 8 image and in-situ data. En: *Actas Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), XVII*, Joao Pessoa, Brasil, pp. 4322-4328.
- Volante, J.; P. Benedetti; H. Paoli; R. Moreno y D. Fernandez. 2004.** Monitoreo de cultivos del Noroeste Argentino a partir de Sensores Remotos. Campaña Agrícola 2004 – CAÑA DE AZUCAR. [En línea]. Disponible en: https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-informe_final_caa2004.pdf. Argentina. (consultado 20 junio 2017). INTA, EEA SALTA.
- Zuccardi, R. B. y Fadda, G. S. 1985.** Bosquejo Agrológico de la Provincia de Tucumán. *Miscelánea* 86. 63 p. Facultad de Agronomía y Zootecnia de la U.N.T. Tucumán. Argentina.