

Discriminación de la superficie agrícola sembrada bajo labranza de conservación empleando análisis multitemporal

Noé Saldaña Robles^{1§}, Agustín Zavala Segoviano¹, José Manuel Cabrera Sixto¹, Ryszard Serwatowski¹, Salvador García Barrón¹, César Gutiérrez Vaca¹, Adrián Flores Ortega¹ y Álvaro Flores García²

¹Departamento de ingeniería agrícola. División de Ciencias de la Vida. Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao, km 9. Ex-hacienda "El Copal", Irapuato, Guanajuato. (jncabrera@ugto.mx), (ryszard@ugto.mx), (savagb@ugto.mx). ²Departamento de ingeniería ambiental. División de Ciencias de la Vida. Universidad de Guanajuato, Tel 462 624 5215, (alvoflo2002@yahoo.com). [§]Autor para correspondencias: saldanar@ugto.mx.

Resumen

La labranza de conservación (LC) ofrece una solución a la erosión de los suelos agrícolas, debido al intenso laboreo. En el estado de Guanajuato existen instituciones que promueven la adopción de LC y fueron éstas quienes solicitaron un estudio para el ciclo primavera-verano 2010, lo que permitió obtener las primeras estadísticas sobre la superficie sembrada en LC en el corredor de El Bajío guanajuatense. Las estadísticas se generaron empleando clasificación supervisada y tres imágenes de satélite Spot 4 para diferenciar dos clases, LC y LT. La clasificación realizada discriminó LC con precisión de 92.7%. El 7.3% de error se debió principalmente a las fechas de toma de las imágenes de satélite y a la dinámica del campo agrícola. Por lo anterior, en el presente trabajo se llevó a cabo, la clasificación de una imagen de satélite Landsat 7ETM+ de toma posterior a las imágenes Spot 4. El objetivo fue mejorar la precisión de la clasificación del primer análisis mediante un análisis multi-temporal. La precisión de ambas clasificaciones se evaluó y comparó empleando la matriz de error y el índice kappa y se contrastaron los resultados empleando un análisis de matriz cruzada. La clasificación de la imagen Landsat 7ETM+, obtuvo una precisión de 96.3% para LC y 97.4% para LT, mayores a las precisiones logradas para las imágenes SPOT 4; sin embargo, la superficie analizada fue 83.6% de la analizada en las imágenes SPOT 4. La combinación de los resultados de ambas clasificaciones logró una precisión de 93.2 y 95.3% para LC y LT respectivamente.

Palabras clave: Landsat 7ETM+, Spot 4, labranza tradicional, percepción remota, quema de residuos.

Introducción

En el estado de Guanajuato existen instituciones que promueven la labranza de conservación como una alternativa para lograr la sustentabilidad de la agricultura y la reducción de problemas de erosión, entre las que se encuentran Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT) la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Centro de Desarrollo Tecnológico Villadiego, Asociación para la Siembra Directa (ASOSID), Distrito de Riego 011, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y Universidad de Guanajuato, las cuales a través de recursos federales desarrollan tecnologías y actividades de promoción para la labranza de conservación.

En México las estadísticas actuales para la estimación del área bajo el sistema de labranza de conservación son con base a los apoyos otorgados por el gobierno para la adquisición de equipo y específicamente sembradoras para labranza de conservación, la cual fue estimada en 650 000 ha; sin embargo, se ha encontrado que los agricultores utilizan éstas máquinas para el sistema de labranza convencional. Por lo tanto contar con estadísticas confiables para las instituciones que impulsan la adopción de LC, resulta importante para medir el impacto de sus actividades, conocer el avance de adopción y las zonas con menor adopción (oportunidad).

Durante las últimas dos décadas se han realizado investigaciones, para discriminar los suelos en donde se práctica la labranza de conservación de aquellos bajo

labranza de convencional, empleando para ello técnicas de percepción remota. Las investigación para determinar el tipo de labranza (conservación o convencional), se ha encaminado a través de tres grandes vertientes: 1) el cálculo de índices de residuo y suelo desnudo a partir de la información espectral de las imágenes de satélite que resalten y faciliten la discriminación del tipo de labranza, por mencionar algunos está el índice de diferencia normalizada para labranza (por sus siglas en inglés NDI, desarrollado por McNairn y Protz 1993); 2) los métodos de clasificación basados en algoritmos de análisis de los niveles digitales pixel por pixel en las imágenes de satélite; y 3) el desarrollo de metodología que combine la clasificación supervisada pixel por pixel con conocimiento experto de la zona agrícola bajo estudio. Aun cuando los mejores resultados se han logrado a través de índices, la información espectral requerida para su cálculo no existe en los satélites disponibles para la observación de la tierra en la resolución adecuada a un nivel regional.

Los índices desarrollados son aplicados a una imagen para resaltar áreas en donde existe una característica de interés. Entre los índices desarrollados para facilitar la discriminación de residuo agrícola en una región mediante imagen de Landsat, están el NDI5 y NDI7 (McNairn y Protz, 1993); el índice de diferencia normalizada para vegetación en senescencia (NDVSI por sus siglas en inglés) fue creado por Qi *et al.* (2002), el realizó investigación con mediciones de luz reflejada en un rango de longitudes de onda dentro del infrarrojo de onda corta, de donde se derivó el índice de absorción por celulosa (por sus siglas en inglés CAI, ec. 1.1). CAI fue desarrollado con el objetivo concreto de disponer de un parámetro que se relacione directamente con el porcentaje de superficie cubierta por residuo de cultivos.

Este índice se calcula empleando el alto porcentaje de luz absorbida por la celulosa del residuo en las longitudes de onda de 2.1 μm , 2.2 μm y 2.3 μm (Daughtry *et al.*, 1996) y requiere de bandas especales que sólo se encuentran actualmente en el satélite Hiperion. Daughtry *et al.* (2005) evaluó varios índices especales (CAI, NDI5, NDI7) y desarrolló el índice de absorción por lignina (LCA) para medir el porcentaje de área cubierta con residuo agrícola en las parcelas, llegando a la conclusión de que el mejor índice para discriminar residuo era CAI. Sin embargo, Hiperion está disponible para investigaciones militares del Departamento de Defensa de Estados Unidos de América, en conjunto con muy pocas universidades de ese mismo país.

Puesto que el residuo agrícola es la característica principal de la labranza de conservación y se ausenta en la labranza convencional, Ben-Dor (2002); Ben-Dor *et al.* (2003); Daughtry *et al.* (2001); Daughtry *et al.* (2005); Serbin *et al.* (2009); Brown *et al.* (2006) realizaron estudios para comparar la firma espectral de diferentes tipos de suelos y residuos, la contribución de la humedad del suelo, el porcentaje de materia orgánica, los minerales y la textura del suelo.

Llegaron a la conclusión que la información espectral contenida en CAI es la más adecuada para separar los residuos agrícolas de suelos desnudos y vegetación agrícolas. Sin embargo, el estudio de Serbin *et al.* (2009) afirma que para una gran cantidad de tipos de suelo existe la posibilidad de usar información espectral contenida en satélites como Lansat 7ETM+ o Spot 4 (cuyas imágenes contienen información de cuatro bandas especales contenidas en los Lansat 5 y 7). Lo anterior explica porque los resultados de estudios basados en métodos de clasificación como Biard y Baret (1997); Bannari *et al.* (2000); Bricklemeyer *et al.* (2002); Bannari *et al.* (2006) y otros más, han generado resultados satisfactorios en la separación de residuos de suelos desnudos, empleando imágenes de satélite como Lansat 7ETM+ o Ikonos.

Saldaña *et al.* (2012) realizó un estudio separando el área del estado de Guanajuato que ofrece un suelo Vertisol pélico, y realizando una clasificación supervisada para discriminar la LC de la LT. El método empleado consistió en analizar tres imágenes Spot 4 mediante clasificación supervisada. El área analizada en el estado de Guanajuato se separó empleando datos de INEGI (2011), correspondiendo al tipo de suelo Vertisol pélico y dicha área correspondió también principalmente a la zona agrícola más importante del estado de Guanajuato. La clasificación supervisada de las imágenes se realizó por separado y las imágenes clasificadas se unificaron para evaluar la precisión de toda la zona estudiada. Para mejorar la separabilidad de la firma espectral se observó que era necesario separar las clases LC y LT en cinco clases.

LC se separó en siembra directa y labranza mínima, mientras que LT se separó en labranza convencional sin residuo visible, labranza convencional con residuo abundante visible y siembra directa con quema del residuo agrícola. Lo anterior respondió a que cada práctica de preparación del suelo ofreció cambios importantes en el perfil espectral de los pixeles en las imágenes Spot 4 empleadas. Puesto que los métodos de clasificación supervisada se basan en medidas estadísticas como la media, mediana, desviación estándar, varianza,

etc., agrupar esas clases comprometería los resultados de la clasificación supervisada. En los resultados obtenidos se pudo observar que 92.7% de las parcelas de referencia en campo fueron correctamente clasificadas. Sin embargo, 7.3% restante correspondía a parcelas mal clasificadas.

Por lo tanto, el estudio anterior asume los siguientes supuestos para afirmar tal precisión: el residuo agrícola que se detectó sobre las parcelas, en todos los casos representa parcelas con LC, lo mismo para los suelos agrícolas sin residuo son asumidos como LT. La fecha escogida para la toma de imagen satelital, consideró que ya se realizó una amplia mayoría de la siembra, por lo que no habrá cambios como la remoción de residuos o quema de los mismos, y que la fecha escogida permitirá que el residuo agrícola sobre las parcelas participe de manera determinante en la reflectancia al momento de la toma; por último la fecha escogida para la toma de la imagen, asume que la mayor área posible con LC o LT detectables por la clasificación estará disponible, y las parcelas con cultivos cuya cobertura ya oculta el residuo o el suelo desnudo será la mínima posible.

Por lo anterior, el presente trabajo consistió en analizar una imagen de satélite Landsat, 7ETM+ de fecha posterior a las imágenes Spot 4 analizadas por Saldaña *et al.* (2012). El trabajo tuvo como objetivos, mejorar la precisión de la clasificación supervisada mediante un análisis multitemporal, comparar la precisión de las clasificaciones en la primera y segunda fecha, reportar cuantitativamente los cambios agrícolas relacionados al tipo de labranza entre la primera clasificación de las imágenes Spot, y la segunda clasificación de la imagen Landsat y comparar la superficie total en que aún pudo ser clasificado el tipo de labranza para ambos análisis.

Materiales y métodos

En Saldaña *et al.* (2012) se estudió la zona agrícola del estado de Guanajuato delimitada por la línea verde mostrada en la Figura 1, cubierta por tres imágenes Spot 4 quedando incluidos los siguientes municipios: Salamanca, Irapuato, Valle de Santiago, Pueblo Nuevo, Abasolo, Huanímaro, Pénjamo, Manuel Doblado, Juventino Rosas, Villagrán, Cueramaro, Apaseo el Alto, Apaseo el Grande, Celaya, Comonfort, Cortazar y Jaral del Progreso; además se incluyeron Jerecuar, Salvatierra y Tarímoro (un área parcial menor a 70% para estos últimos).

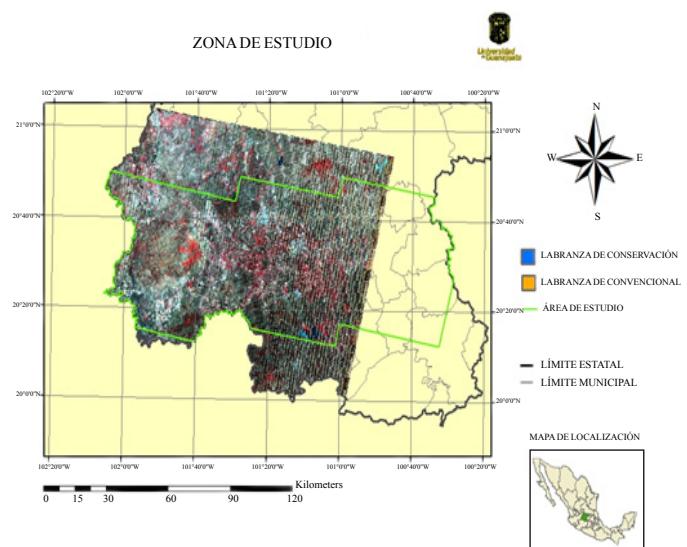


Figura 1. Área de estudio definida por las tres imágenes Spot 4.

En el presente estudio se empleó la imagen de satélite Landsat 7ETM+ (Figura 1). La superficie que representa el traslape de las dos zonas, representa la superficie estudiada en el presente estudio, la cual tiene un área de 632 026.7 ha. En el caso de la imagen Landsat debido a la falla de uno de sus sensores, se pierde información en franjas periódicas, y por tanto la superficie de estudio se redujo a 514 991 ha, que representa 55.7% de la superficie original estudiada por Saldaña *et al.* (2012). La imagen Landsat fue recortada para estudiar el área en que fue realizado el muestreo original para las imágenes Spot 4.

Características de la zona de estudio

Esta región agrícola se encuentra en promedio a 1 700 msnm, con una precipitación promedio anual de 700 mm. Las temperaturas oscilan entre los 3 y los 30 °C, con un promedio anual de 20 °C. Predominan el Vertisol pelico y textura fina en los suelos. En el estado de Guanajuato se establecen cultivos en dos ciclos (SDA Guanajuato, 2010): 1) otoño-invierno con siembras entre octubre y febrero, con la mayoría sembrando en diciembre. Se establecen principalmente: trigo, cebada y la mayor parte de las hortalizas; y 2) primavera-verano (PV). Las siembras se realizan entre marzo y septiembre, con la mayoría sembrando en mayo. La mayor superficie la ocupan los cultivos de maíz y sorgo.

Adicionalmente, la superficie agrícola del estado tiene cultivos perennes como alfalfa, agave y fresa, y hortalizas con un promedio de 60 mil hectáreas, siendo alfalfa la de mayor superficie con 90% (Flores-López y Scott, 2000). Los

cultivos se establecen bajo riego con agua proveniente de dos fuentes: agua almacenada en las presas y agua del suelo obtenida mediante bombeo. La agricultura de temporal se sustenta sólo en la humedad proveniente de las lluvias. De acuerdo con García y Martínez (2007) la superficie agrícola de temporal en el estado es de 671 588 ha mientras que 502 973 ha son de riego.

Características de la imagen empleada

En el estudio realizado por Saldaña *et al.* (2012) se utilizaron tres imágenes del satélite Spot 4 (Cuadro 1). Las características de las imágenes se resumen en: 1) resolución radiométrica de 8 bits; 2) resolución espacial de 20 m * 20 m/pixel; y 3) resoluciónpectral de cuatro bandas, banda 1-infrarrojo cercano (0.69-0.89 μm), banda 2-rojo (0.61-0.68 μm), banda 3 - verde (0.5- 0.59 μm) y banda 4 - infrarrojo medio (1.58-1.75 μm).

- | | |
|----------|---|
| Imagen 1 | 582 309 con fecha del 26 de mayo de 2010, tomada a las 17:32:08. |
| Imagen 2 | 584 309 con fecha del 26 de mayo de 2010, tomada a las 17:16:28. |
| Imagen 3 | 583 309 con fecha del 06 de junio de 2010, tomada a las 17:16:29. |

En el presente estudio se empleó la imagen de satélite Landsat 7ETM+ con fecha del 03 de Junio de 2010. La imagen Landsat correspondió a la región definida por la ruta del satélite paso: 28, línea: 46. Las características de la imagen empleada son: 1) resolución radiométrica de 8 bits; 2) resolución espacial de 30 m * 30 m/pixel; 3) resoluciónpectral de 7 bandas, azul (0.45-0.515 μm), verde (0.525-0.605 μm), rojo (0.63-0.69 μm), infrarrojo cercano (0.775-0.9 μm), infrarrojo de onda corta baja (1.55-1.75 μm), infrarrojo térmico (10.4-12.5 μm), infrarrojo de onda corta alta (2.09-2.35 μm).

Preparación de la imagen de satélite para el análisis

La imagen de satélite Landsat 7ETM+ fue descargada del sitio oficial del Servicio Geológico de Estados Unidos de América (por sus siglas en inglés USGS, 2011), y ya contaba con la corrección geométrica, por lo que sólo se realizó la corrección radiométrica mediante el método del cuerpo negro, para lo cual se consideraron las presas y cuerpos de agua de la región. Además se aplicó el método de ecualización del histograma para mejorar el contraste. La

separación de la zona agrícola de la imagen Landsat, se realizó empleando el mismo método que Saldaña *et al.* (2012) y que es muy similar al aplicado por (Mehdi *et al.*, 2010).

Muestreo en campo y definición de clases

Los datos del muestreo de campo fueron los mismo empleados en Saldaña *et al.* (2012), sin embargo; en el presente trabajo se considera importante describir la metodología de muestreo para presentar claramente los resultados. La preparación de parcelas para ser cultivadas se dividió en labranza de conservación y labranza convencional. Además, para el estudio se consideró importante dividir la preparación de los terrenos en cinco clases descritas a continuación y mostradas en la Figura 2.

Siembra directa (SD1). Parcelas con residuo de trigo o cebada, cubierta de residuo del 30% o mayor, sin remover el suelo se siembra maíz o sorgo.

Labranza mínima (SD2). Igual a SD1, además se lleva a cabo un mínimo laboreo del suelo, remarcando los surcos para favorecer el riego por gravedad.

Labranza convencional sin residuo (C1). El residuo se empaca al mayor porcentaje posible y de forma común se pueden llevar a cabo las siguientes operaciones en el suelo: cincelado (opcional), barbecho, rastreo. El residuo se integra de tal forma que desaparece por completo de la superficie.

Labranza convencional con residuo (C2). El residuo del cultivo anterior se integra al suelo sin removerlo y se llevan a cabo las siguientes operaciones en el suelo: cincelado, barbecho, rastreo (una o dos veces) y nivelación, por la abundancia del residuo este se mantiene presente en la superficie.

Siembra directa sobre residuo quemado (SD3). El residuo del cultivo anterior es quemado en diferentes proporciones y con el suelo sin alterar se siembra el siguiente cultivo.

Otras coberturas en parcelas agrícolas (B). Alfalfa, brócoli, calabacita, agave, cebolla, ajo, sandia, etc., suelos no preparados para siembra y residuos de vegetación ajenos a la labranza de conservación.

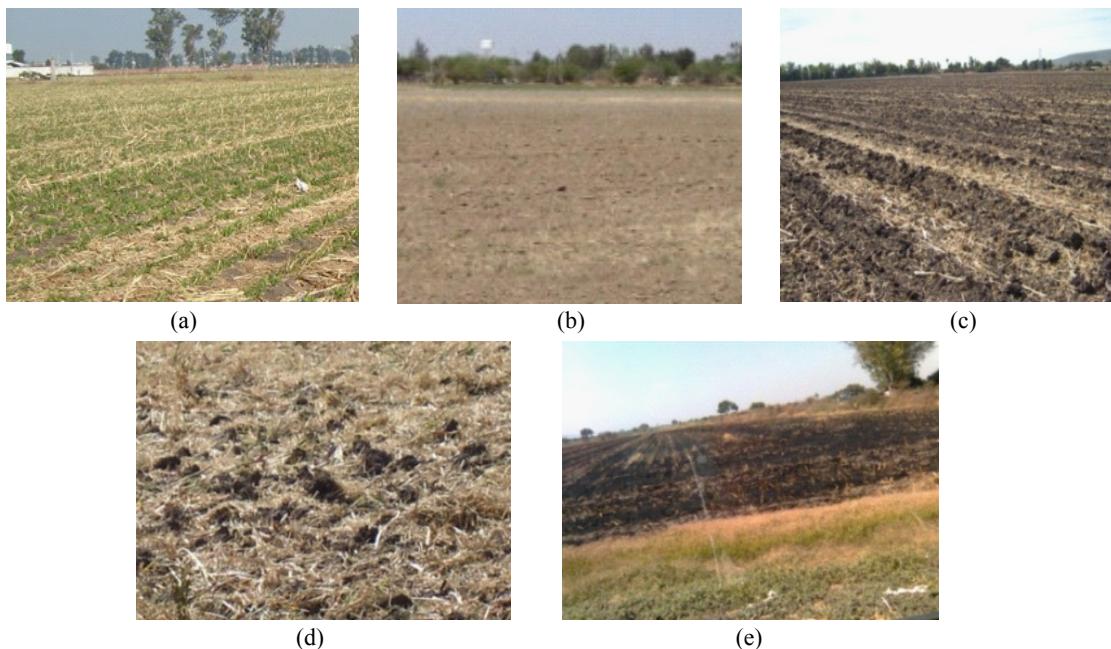


Figura 2. a) siembra directa de conservación (SD1); b) labranza convencional sin residuo (C1); c) labranza convencional con residuo (C2); d) labranza mínima (SD2); y e) siembra directa con quema de residuo (SD3).

El muestreo en campo para obtener la información consistió en levantar los siguientes datos: posición geo-referenciada de la poligonal de la parcela con un sistema compuesto de un GPS, Garmin 60 csx (sistema de posicionamiento global, por sus siglas en inglés, Garmin International Inc., Olathe, KS, USA) y una computadora portátil con el programa ARCGIS 9.3 (ESRI Inc., Redlands, CA, USA); tipo de residuo (trigo o cebada) o última operación de preparación del suelo; fecha de siembra aproximada (en caso de planta emergente); cultivo sembrado y tipo de siembra (hileras por surco). El muestreo se realizó bajo un esquema estratificado-sistématico que consistió en dividir la región de estudio de acuerdo a los límites municipales y las carreteras primarias y secundarias.

El muestreo se llevó a cabo del 24 al 28 de mayo y se consideró que las parcelas que se registraron dentro de algún tipo de labranza estuviesen ya sembradas (regadas, con planta emergente o con semilla de maíz o sorgo visible). Los registros originales del muestreo en campo se describen en Saldaña *et al.* (2012) y de dichos datos se emplearon aquellos que quedaron dentro de la imagen Landsat 7ETM+ con información espectral útil para el análisis, por lo que se usaron 196 parcelas de referencia en C1, 25 en C2, 139 en SD1, 88 en SD2 y 100 en SD3 sumando un total de 548 parcelas verificadas en campo. Las referencias de otras coberturas se redujeron hasta 13 parcelas, por lo que se consideró inapropiado incluir esta clase en el presente estudio.

Clasificación supervisada de la imagen Landsat 7ETM+ y evaluación de resultados

La clasificación de la imagen Lansat 7ETM+ se realizó de la misma forma en que se clasificaron las imágenes Spot 4 (Saldaña *et al.*, 2012) mediante un análisis de componentes principales, seguido de una clasificación supervisada empleando el método de Mahalanobis por paralelepípedos, para lo cual se empleó el programa ERDAS IMAGINE 9.1 (ERDAS Inc., Atlanta, GA 30329, Estados Unidos), los pixeles que no cayeron en los paralelepípedos establecidos se dejaron sin clasificar. El entrenamiento del algoritmo de clasificación supervisada se hizo empleando 12 parcelas para cada uno de los cinco tipos de labranza.

A la imagen resultante de la clasificación se aplicó un filtro de “mayoría”, básicamente limpiando pixeles aislados o altamente descartables. Los resultados de la clasificación supervisada se evaluaron a través de la matriz de error y el índice kappa (Maclure y Willet, 1987; Cook, 1998). La matriz de error y el índice kappa se calcularon a partir de los datos restantes del muestreo que no se utilizaron en el entrenamiento, empleados como puntos de verificación. Los resultados de evaluación en el presente estudio para la imagen Lansat 7ETM+ se contrastaron con los obtenidos por Saldaña *et al.* (2012) para las imágenes SPOT 4.

Análisis multi-temporal

Una vez que se llevó a cabo la clasificación supervisada de la imagen Landsat 7ETM+ Se procedió a realizar un análisis multi-temporal entre los resultados de la clasificación realizada por Saldaña *et al.* (2012) y la resultante de este estudio. El análisis se realizó mediante un método denominado matriz cruzada que consiste en superponer la imagen de clases de labranza resultante de la imagen Landsat 7ETM+ a la imagen de clases resultante de las imágenes Spot 4, para observar los cambios que hubo sobre la superficie. En el método de matriz cruzada

obtenida para cinco clases de labranza en cada clasificación, se espera una imagen con 25 clases, aunque puede ser menor dependiendo de las coincidencias entre clases.

Clasificación multi-temporal

Para generar una imagen final de las clases de labranza se empleó la matriz presentada en el Cuadro 1, que destaca los cambios de cobertura en los suelos agrícolas que presentan lógica, y se descartan cambios de las clases que no presentan lógica en el campo agrícola.

Cuadro 1. La palomita indica los cambios lógicos que se pueden presentar entre las cinco clases de labranza.

Clasificación de las imágenes SPOT 4 mayo 26 y junio 1	Clasificación de la Imagen Landsat 7ETM+ 03 de junio 2010				
	C1	C2	SD1	SD2	SD3
C1	√	X	X	X	X
C2	√	√	X	X	X
SD1	√	√	√	√	√
SD2	X	X	X	√	X
SD3	√	√	X	X	√

Por ejemplo; una parcela que fue clasificada como labranza convencional sin residuo (C1) (en las imágenes Spot 4) no puede en fecha posterior aparecer con reflectancia de una parcela con residuo sobre su superficie (imagen Landsat 7ETM+). De esta manera, las clases lógicas esperadas son 12, incluyendo las clases que en ambas clasificaciones coinciden y están marcadas con una palomita, y las clases ilógicas quedan marcadas con una cruz.

Portanto la imagen de clases final combinando la información de la primera clasificación y la información de la segunda clasificación, se generó clasificando cada pixel en las cinco clases de labranza, aceptando sólo los cambios lógicos ocurridos en la imagen Landsat 7ETM+ e incorporándolos a los resultados de la clasificación de las imágenes Spot 4, ya que ésta última tiene mayor área de análisis y corresponde al primer resultado de clasificación en orden cronológico. De igual manera se realizó el procedimiento de matriz cruzada para el análisis donde sólo se utilizó las clases de labranza de conservación la cual incluye SD1 y SD2, y labranza tradicional que vez incluye C1, C2, y SD3, utilizando el Cuadro 2 para definir los cambios.

Cuadro 2. La palomita indica los cambios lógicos que se pueden presentar entre las dos clases de labranza LC y LT.

Clasificación de imágenes Spot 4 mayo 26 y junio 1	Clasificación de la Imagen Landsat 7ETM+ 03 de junio 2010	
	LC	LT
LC	√	√
LT	X	√

De la imagen resultante para las cinco clases de labranza, se obtuvo la imagen de dos clases de labranza que son labranza de conservación (SD1 y SD2) y labranza tradicional (C1, C2 y SD3). Las imágenes resultantes se evaluaron nuevamente mediante el método de matriz de error e índice kappa y los resultados se contrastaron con los obtenidos para las clasificaciones de la imagen Landsat 7ETM+ y las imágenes Spot 4.

Resultados y discusión

Clasificación supervisada para la imagen Landsat 7ETM+

El resultado de la evaluación de la clasificación supervisada para la imagen Landsat 7ETM+ se presenta en el Cuadro 3, mediante la elaboración de la matriz de error

y el cálculo del índice kappa Cuadro 4. De las 196 referencias de campo C1 se clasificaron correctamente 140, 37 quedaron clasificadas en SD3 y 18 en C2, y de las 100 referencias para SD3 se clasificaron 23 en C1. Lo anterior muestra la mayor dificultad de separar espectralmente C1 y SD3 entre si, y a su vez de C2, recordando que estas clases pertenecen a LT. En SD1 se presentó la mayor confusión con SD2 y viceversa, pertenecientes ambas a LC.

Cuadro 3. Matriz de error para clasificación supervisada de la imagen Landsat 7ETM+.

Clasificación	Clases	Parcelas de referencia en campo					Totales
		C1	C2	SD1	SD2	SD3	
	C1	140	7	2	0	23	172
	C2	18	10	0	0	0	28
	SD1	0	0	94	44	2	140
	SD2	1	0	39	44	9	93
	SD3	37	8	4	0	66	115
	Total	196	25	139	88	100	548

Los resultados obtenidos por Saldaña *et al.* (2012) para la matriz cruzada, reflejaron el mismo comportamiento de las cinco clases de preparación del suelo observado en el presente estudio, reafirmando que las clases de LT son mucho más similares entre si, y las clases de LC igualmente, pero con mayor facilidad de separación entre LT y LC. Con respecto a los porcentajes de aciertos se puede observar en el Cuadro 4 que éste disminuyó para C1, C2, SD2 y SD3 y aumentó para SD1 en la clasificación de la imagen Landsat 7ETM+, con respecto a los resultados obtenidos

para la clasificación de las imágenes Spot 4. También el porcentaje de la clasificación global de cayó desde 75.8% en la clasificación supervisada de las imágenes Spot 4, hasta 64.6% en la clasificación supervisada de las imágenes Landsat 7ETM+.

En el Cuadro 5 se muestran los índices kappa para cada clase lo que confirma, una menor separabilidad de todas las clases que la mostrada en la clasificación de las imágenes del primer periodo.

Cuadro 4. Resumen de las coincidencias para cada una de las cinco clases de labranza propuestas para las clasificaciones de las imágenes Spot 4 y Landsat 7ETM+.

	Clases	C1	C2	SD1	SD2	SD3	Totales
(%) Referencias clasificadas correctamente en Spot 4 (Saldaña <i>et al.</i> 2012)		71.4	40	67.6	50	66	64.6
(%) Referencias clasificadas correctamente en Landsat 7ETM+		83	76.7	60.9	71	75.4	75.8

Cuadro 5. Índice kappa para las dos clasificaciones supervisadas.

Clases	Índice kappa-clasificación Landsat 7ETM+	Índice kappa-clasificación Spot 4 (Saldaña <i>et al.</i> , 2012)
C1	0.6589	0.9243
C2	0.3296	0.4559
SD1	0.5789	0.7151
SD2	0.3873	0.4752
SD3	0.5219	0.6377

En general puede destacarse un mejor desempeño de la clasificación supervisada, para separar las clases de labranza definidas en las imágenes Spot 4 del primer periodo, que para la imagen Landsat 7ETM+ del segundo periodo, lo cual pudiera que la vegetación de algunas parcelas para la imagen del segundo periodo se desarrolló y generó un perfil espectral con mayor similitud entre clases del mismo tipo general de labranza.

Contrario a la clasificación supervisada para las cinco clases de labranza definidas, la clasificación para dos clases generales (LC y LT) presentó un porcentaje de referencias de campo clasificadas correctamente para la labranza convencional 96.3% y 97.4% para la labranza de conservación, lo que en ambas clases representó un incremento en la precisión de la clasificación con respecto a los valores obtenidos para la clasificación de las imágenes Spot 4 del primer periodo (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resumen de las coincidencias para cada una de las dos clases de labranza propuestas para las clasificaciones de las imágenes Spot 4 y Landsat 7ETM+.

Clases	LT	LC	Totales
(%) Referencias clasificadas correctamente en Spot 4	93.7	92.7	93.2
(%) Referencias clasificadas correctamente en Landsat 7ETM+	96.3	97.4	96.7

Lo anterior pudiera explicarse, ya la corrección que de forma natural se integra en la clasificación de la imagen Landsat 7ETM+ que al pertenecer a una fecha posterior a las imágenes Spot 4, integra cambios de laboreo del suelo en algunas parcelas que fueron clasificadas erróneamente: por ejemplo, por tener residuo que pocos días después fue removido con la preparación tradicional del suelo, y habiendo mayor separabilidad entre la información espectral de LC y LT, mejoró la precisión con que se ficaron correctamente las parcelas en estas dos clases a pesar del desarrollo de la vegetación que si influyó entre las cinco clases de labranza en entre las cuales ya existía mayor similitud para algunas.

Análisis multi-temporal

Los resultados del análisis de matriz cruzada, que consistió en traslapar los pixeles de la imagen resultante de la clasificación del primer periodo (Spot 4), con los pixeles de la imagen resultante de la clasificación del segundo

periodo (Landsat 7ETM+), permitieron revisar los pixeles que permanecieron en la misma clase (Figura 3) y los pixeles que fueron reclasificados en el segundo periodo. Los pixeles clasificados como C1, C2 y SD3 no sufrieron cambios y quedaron nuevamente clasificados en su misma clase.

Por otro lado, algunos de los pixeles de las imágenes Spot 4 que quedaron clasificados en SD1 y SD2, se clasificaron como C1 y SD3 en la imagen Landsat ETM+. Lo anterior, se resumió en un cambio de 3 169 ha representado 1.21% de las 262 104 ha clasificadas en las imágenes SPOT 4, que influyeron principalmente en el porcentaje de labranza de conservación estimada para Pénjamo, Cuerámaro y en menor grado Abasolo. Lo anterior podría indicar que son los últimos municipios que preparan sus suelos en el año (parcelas de regadío únicamente donde puede haber residuos agrícolas del ciclo anterior).

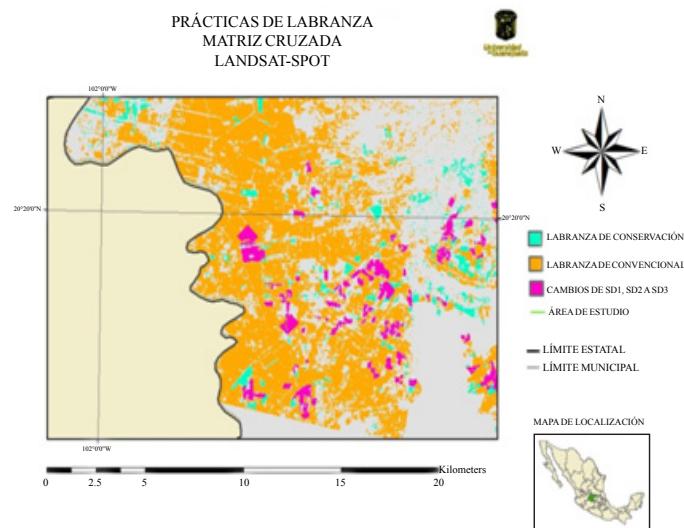


Figura 3. Matriz cruzada para dos clasificaciones supervisadas de diferente fecha. Acercamiento a zona de Pénjamo con cambios de clases.

Clasificación multi-temporal

Los resultados de la evaluación de la clasificación de los pixeles, que surgió de combinar ambas clasificaciones de imágenes Spot 4 y Landsat 7ETM+, se resumen en el Cuadro 7 mediante el índice kappa. Puede notarse un incremento del índice kappa en las cinco clases de labranza propuestas para la reclasificación con la información multi-temporal con respecto a las clasificaciones de imágenes Spot 4 y Landsat 7ETM+. Por otra parte con respecto a la clasificación global en dos clases de labranza (convencional y conservación), se observó un aumento en la precisión con que se logra la discriminación de la labranza de conservación empleando el análisis multi-temporal (Cuadro 8).

Cuadro 7. Comparación del índice kappa para las clasificaciones en diferente fecha y el análisis multi-temporal.

Clases	Imagen spot 4	Imagen landsat 7etm+	Análisis multi-temporal
	índice kappa		
B	0.4786	-	0.5026
C1	0.9243	0.6589	0.9307
C2	0.4559	0.3296	0.4678
SD1	0.7151	0.5789	0.7856
SD2	0.4752	0.3873	0.5117
SD3	0.6377	0.5219	0.6813

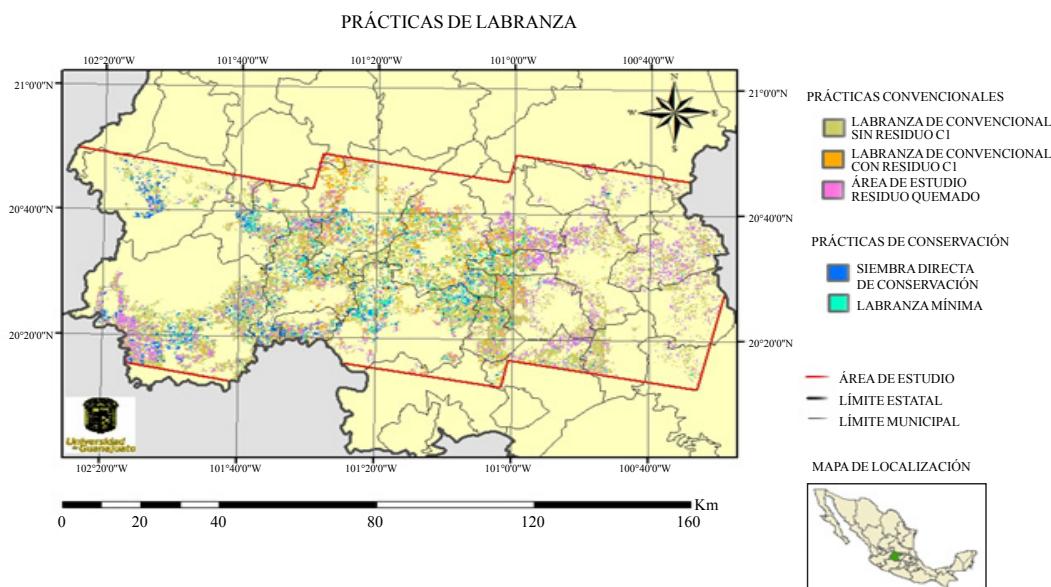
Cuadro 8. Porcentaje de aciertos logrados por el método de análisis multi-temporal.

Clases	Referencias de campo	Clasificación supervisada	Coincidencias entre referencias y clasificación	(%) referencias clasificadas correctamente
LT	633	616	603	95.3%
LC	368	352	343	93.2%
Totales	1044	1044	985	94.3%

Aunque en la clasificación realizada a la imagen Landsat 7ETM+, el porcentaje de precisión fue aún mayor (97.4%), cabe señalar que debido a la fecha en que fue tomada la imagen y el error del sensor se reduce el área de estudio 19.5%. Adicional a lo anterior, la facilidad para separar las cinco clases propuestas disminuye notablemente.

Lo anterior también se pudo ver reflejado en el índice kappa que aumentó con respecto a la clasificación de las imágenes Spot 4, para ambos tipos de labranza en la clasificación por

análisis multi-temporal a 0.9481 para labranza convencional y 0.9611 para labranza de conservación, estos a su vez ligeramente menores a los índices kappa obtenidos para la clasificación de la imagen Landsat 7ETM+, reiterando nuevamente una mayor área analizada para el análisis multi-espectral y mayor precisión para las cinco clases de labranza definidas. La cartografía resultante de esta primera clasificación supervisada se muestra en la Figura 4, y los datos por municipio en el Cuadro 9, en donde se obtuvo 14.9% de labranza de convencional, y 84.1% de labranza de conservación.

**Figura 4. Cartografía final empleado clasificación multi-espectral.**

Cuadro 9. Estadísticas generadas de la clasificación basada en el análisis multi-temporal.

Municipios	Labranza convencional			Labranza de conservación		Total
	C1	C2	SD3	SD1	SD2	
Abasolo	14 947.9	3 083.9	3 574.1	3 207.2	2 261.7	27 074.8
Apaseo el Alto	4 060.4	22.2	1 868.8	34.6	10.7	5 996.7
Apaseo el Grande	6 778.3	192.2	6 088.2	138.4	132.5	13 329.6
Celaya	6 801	399.3	4 714.6	95.8	105.8	12 116.5
Manuel Doblado	4 830.9	170.4	1 158.8	2 122	358.9	8 641
Comonfort	1 715.7	48.6	1 662.2	97.4	83.9	3 607.8
Cortazar	7 101.6	1 007.7	3 728.4	384.8	793.3	13 015.8
Cuerámaro	3 688	198.4	1 944.6	252.7	878.8	6 962.5
Huanímaro	2 017.1	984.7	1 415.5	856.9	486.2	5 760.4
Irapuato	7 436.4	7 324.3	3 965.3	1 799.4	2 183.9	22 709.3
Jaral del Progreso	6 727.1	1 047.5	1 991.4	436.4	706	10 908.4
Jerécuaro	1 390.7	0	536.8	3.1	16.5	1 947.1
Pénjamo	27,928.2	1 186.4	12 164.7	2 931.6	1 798.8	46 009.7
Pueblo Nuevo	1 946.8	389	167.8	181.6	107.4	2 792.6
Salamanca	10 294.4	7 491.7	3 492.1	2 378.7	3 252.2	26 909.1
Salvaterra	5,281.3	441.7	2 612.7	233.4	342.4	8 911.5
Juventino Rosas	2 638.7	1 130.1	5 259.8	405.9	890.2	10 324.7
Tarímoro	4 069.6	45.9	901.6	86.7	68.6	5 172.4
Valle de Santiago	7 809.1	4 392	2 906.9	3 179.4	4 343.6	22 631
Villagrán	2 394.4	976.3	2 434.1	533.7	944.6	7 283.1
Total	129 857.6	30 532.3	62 588.4	19 359.7	19 766	262 104
Porcentajes	49.5	11.6	23.9	7.4	7.5	
		85.1		14.9		

Aun cuando el porcentaje de labranza de conservación para la superficie analizada sólo cambió 1.21%, para algunos municipios que fueron los principales contribuyentes a dicho cambio de labranza de conservación a labranza convencional, representó un mayor cambio porcentual, implicando que hubo quema de residuo en algunas parcelas.

Por ejemplo, Pénjamo presentó en el análisis de la primera clasificación de las imágenes Spot 4, 14.4% y en la clasificación supervisada se redujo a 10.3%. Lo mismo ocurrió con Cuerámaro que presentó 29.9% de labranza de conservación según la clasificación de las imágenes Spot y en el análisis multi-temporal cambió a 16.3%.

Inicialmente de la clasificación supervisada de las imágenes Spot 4, se obtuvo 16.1% de labranza de conservación y el resto de labranza convencional, reportado por Saldaña *et al.* (2012); a partir del análisis multi-temporal se observó 14.9% de labranza de conservación (Cuadro 9).

Conclusiones

El análisis multi-temporal permitió mejorar la precisión para discriminar la superficie agrícola sembrada bajo labranza de conservación, ya que la clasificación supervisada para un primer periodo de imágenes obtuvo una precisión 2.7% al discriminar labranza de conservación, y mediante análisis multi-temporal se logró 93.2%. El porcentaje de labranza de conservación, para la superficie total analizada entre las dos clasificaciones con diferente fecha, sólo representó un cambio de 1.21% que se concentró en Pénjamo, Cuerámaro y Abasolo, representó porcentajes de cambio importantes para éstos municipios.

La superficie clasificable para las imágenes Spot 4 del primer periodo fue 24.2% mayor a la superficie clasificable para la imagen Landsat 7ETM+ del segundo periodo, esto se debió en parte al crecimiento de los cultivos en las parcelas para el

segundo periodo; sin embargo, la precisión de discriminación del tipo de labranza aumentó para el segundo periodo, por lo que la fecha de las imágenes es un compromiso entre la precisión de discriminación y la superficie total que es clasificable por tipo de labranza.

En el presente estudio se encontró 14.9% de las superficie total analizada bajo el esquema de labranza de conservación y el resto fue bajo labranza tradicional.

Literatura citada

- Bannari, A.; Habaudane, D. and Bonn, F. 2000. Interet du moyen infrarouge pour la cartographie des residus de cultures. Canadian J. Remote Sensing. 26(5):384-393.
- Bannari, A.; Pacheco, A.; Staenz, K.; McNairn, H. and Omari, K. 2006. Estimating and mapping crop residues cover on agricultural lands using hyperspectral and IKONOS data. Remote Sensing Environom. 104(4):447-459.
- Ben-Dor, E. 2002. Quantitative remote sensing of soil properties. Adv. Agron. 75:173-244.
- Biard, F. and Baret, F. 1997. Crop residue estimation using multiband reflectance. Remote Sensing. Environ. 59(3):530-536.
- Brickleyer, R. S.; Lawrence, R. L. and Miller P. R. 2002. Documenting no-till and conventional till practices using Landsat ETM+ imagery and logistic Regression. J. Soil Water Conserv. September-October. 57(5):267-271.
- Brown, D. J.; Shepherd K. D.; Walsh M. G.; Mays, M. D. and Reinsch, T. G. 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma 132:273-290.
- Cook, R. J. 1998. Kappa en: la enciclopedia de bioestadística. Armitage, T. P. y Colton, (eds). Nueva York: Wiley. 2160-2166 pp.
- Daughtry, C. S. T.; Nager, P. L.; Kim, M. S.; McMurtrey, J. E. and Chappelle, E. W. 1996. Spectral reflectance of soils and crop residues, near infrared spectroscopy: the future waves Davis, A. M. C. and Williams, P. (ed.) NIR Publications, Chichester. United Kingdom. 505-510 pp.
- Daughtry, C. S. T.; Hunt, Jr.; Doraiswamy, P. C. and McMurtrey, J. E. III. 2005. Remote sensing the spatial distribution of crop residues. Agron. J. 97: 864-871.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2011. Uso del suelo y vegetación. URL:<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/rencat/usosuelo/Default.aspx>.
- McNairn, H. and Protz, R. 1993. Mapping corn residue cover on agricultural fields in Oxford County, Ontario, using Thematic Mapper. Canadian J. Remote Sensing. 19(2):152-159.
- Mehdi, G. M.; Mehdi, B. and Mojaradi, B. 2010. Mapping and Area Estimation of Wheat by SPOT Satellite Image. Map Asia 2010 & ISG 2010 Conference. Delhi, India.SDA, Guanajuato. 2010. La agricultura. URL: <http://sda.guanajuato.gob.mx/agricultura.html>.
- Serbin, G. E.; Hunt, R.; Daughtry, C. S. T.; McCarty, G. W. and Doraiswamy, P. C. 2009. An improved ASTER index for remote sensing of crop residue. J. Remote Sensing. 1:971-991.
- Qi, J.; Marsett, R.; Heilman, P.; Biedenbender, S.; Moran, S.; Goodrich, D. and Weltz, M. 2002. RANGES improves satellite-based information and land cover assessments in southwest United States. Eos. 83:601-606.