UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA

SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

EVALUACION DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA REGION CITRICOLA DE NUEVO LEON

POR

JOSE VERASTEGUI CHAVEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO

MARIN, N. L. SEPTIEMBRE DE 2000

TD
Z5071
FA
2000
V4

1020145342

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA

SUBDIR CCION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

EVALUACION DEL CAMBIO DE USO DE SUELO
EN LA REGION CITRICOLA DE NUEVO LEON

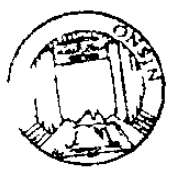
POR

JOSE VERASTEGUI CHAVEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
CON ESPECIALIDAD EN AGUA-SUELO

MARIN N L SEPTIEMBRE DE 2 0

D
Z 507
FA
O
V



F
SIS

18 Nadie se engañe a sí mismo; si alguno entre vosotros parece ser sabio en este siglo, hágase simple, para ser sabio.
19 Porque la sabiduría de este mundo es necedad para Dios; pues escrito está: <<El que prende a los sabios en la astucia de ellos>>
20 Y otra vez: El Señor reconoce los pensamientos de los sabios, que son vanos.
21 Así que, ninguno se glorie en los hombres, porque todo es vuestro.
22 Sea Pablo, sea Apolos, sea Cefas, sea el mundo, sea la vida, sea la muerte, sea lo presente, sea los por venir; todo es vuestro.
23 Y vosotros de Cristo y Cristo de Dios.

1 Cor: 3, 18-23

EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA REGIÓN CITRÍCOLA DE NUEVO LEÓN.

SUSTENTANTE: José Verástegui Chávez

Aprobación de la tesis por el comité particular

Ph. D. RIGOBERTO VAZQUEZ ALVARADO
Asesor Principal

Ph D. EMILIO OLIVARES SÁENZ
Co-Asesor

DR. JUAN F. PISSANI ZÚÑIGA
Co-Asesor

Ph D GERARDO DE LIRA REYES
Co-Asesor

DR EDUARDO J. TREVIÑO GARZA
Co-Asesor Externo

Sudirector de Postgrado

Ph. D. CIRO G. S. VALDES LOZANO

A la memoria de mi Padre

ELIGIO VERASTEGUI ESTRADA (qepd)

A **ROSSY**, compañera de mi vida, con todo mi amor. Gracias por tu amor, esfuerzo, comprensión, dedicación y trabajo a favor de la superación de nuestra familia.

A **NANCY ABIGAIL** y a **JOSÉ ABRAHAM GUADALUPE**. Satisfacción y orgullo en nuestras vidas. Pido a DIOS NUESTRO SEÑOR los siga colmando de bendiciones.

AGRADECIMIENTOS

Durante mi estancia en esta Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León logré importantes avances en mi formación y capacitación profesional, gracias al apoyo desinteresado e incondicional de un sin numero de personas a quienes, debido a la imposibilidad de hacerlo personalmente, por este medio deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

Pero, sobre todas las cosas logre iniciar y consolidar verdaderos amigos A quienes les agradezco nos hallan permitido, a mi familia y a mí, iniciar y cultivar su valiosa amistad. También a estas personas agradezco su aportación profesional para que lograra mi objetivo.

Sin el afán de distinguir u omitir a persona alguna deseo hacer patente mi amistad y agradecimiento:

- Un especial agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agricolas y Pecuarias (INIFAP) y al Consejo Nacional de Ciencia y tecnología (CONACYT) por su apoyo económico para la realización de mis estudios.
- Al Dr. Rigoberto Vázquez Alvarado a quién agradezco su apoyo personal, orientación y dirección en este periodo de estudios. Mi familia y su servidor, hacemos patente nuestra amistad con su familia.
- Al Dr. Eduardo J. Treviño Garza y a su estimadísima familia, a quiénes consideramos nuestros amigos. A la vez reciban nuestro agradecimiento por compartir con nosotros sus experiencias.
- Al Dr. Emilio Olivares Sáenz por su entusiasta participación e interés mostrado a lo largo de mi estancia en la Facultad de Agronomía.
- Al Dr. Gerardo de Lira Reyes por sus valiosas sugerencias y aportaciones.
- Al Dr. Juan F. Pissani Zúñiga a quien agradezco su apoyo.
- A todos y cada uno de mis compañeros de esta Facultad.
- A mis compañeros de mi centro de trabajo INIFAP - General Terán y del INIFAP – CIRNE por su apoyo y sus valiosas aportaciones profesionales.
- Además deseo dejar patente mi agradecimiento al Dr. Treviño por poner a mi disposición desde el inicio de mis estudios doctorales toda la infraestructura de su laboratorio.

RESÚMEN AUTOBIOGRÁFICO

José Verástegui Chávez

Áreas de estudio:
Sistemas de Información Geográfica, Sensores Remotos y Estadística Multivariada.

Biografía

Datos personales:
Nacido el 6 de marzo de 1957 en Matehuala, S L.P. Casado con Rosa María Ramírez Sánchez Hijos Nancy Abigail y José Abraham Guadalupe.

FORMACION PROFESIONAL

Licenciatura. Ingeniero Agrónomo Fitotecnista. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Septiembre 1974 a enero 1979. Titulado con tesis, "Fertilización en dos variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris L.)* a dos densidades de población en General Terán, N L. 1978 "
Postgrado. Maestría en Ciencias con especialidad en el Aprovechamiento y Planificación de los Recursos Agua y Suelo. Divisón de Ciencias Agropecuarias y Marítimas Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Agosto 1983 a Febrero 1985 Tesis "Fechas de Siembra en Frijol y Maíz como reducción de la Lámina de Riego (Simulación y Campo), en Calera, Zac. Durante 1984.

Cursos Cortos. 15 Cursos cortos en las áreas de Uso y Manejo de Agua y Suelo, Modelaje de Sistemas Agropecuarios, Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos. **Modelaje de clima y cultivos**. The Agrometeorology of arid and Semiarid Zones. Ministry of Transport - The Ben Gurion University of Neveg. 1988 - 1989 Tel Aviv, Israel. **Modelos de simulación en la investigación de bovinos de doble propósito.** Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura - RISPAL. 1991. Turrialba, Costa Rica

Experiencia profesional

- **INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRICOLAS Y PECUARIAS (INIFAP).** Campo Experimental General Terán. Investigador Titular C. Areas de Investigación: Sensores Remotos, Sistemas de Información Geográfica, Ingeniería de Riego. Agosto 1991 a la fecha.
- **INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRICOLAS Y PECUARIAS (INIFAP).** Campo Experimental de Zacatecas Investigador Titular C Areas de Investigación. Conservación de agua y suelo e Ingeniería de Riego. Junio 1979 a julio 1991
- **UNIVERSIDAD AUTONOMA DE ZACATECAS**. Escuela de Agronomía. Profesor Titular C. Materias impartidas: Agroecología, Conservación de Suelos, Física de Suelos, Fotointerpretación y Cartografía, Suelos de la República Mexicana y Suelos Salino-Sódicos. Marzo 1985 a julio 1991.
- **INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY**. División de Ciencias Agropecuarias y Marítimas Campus Monterrey. Maestro auxiliar. 1984.

Otros
Organizador del curso "ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO DEL SUELO, SODICIDAD Y SALINIDAD", y del XX CONGRESO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO, organizados por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. En Zacatecas, México. 1987.
Candidato a Investigador en el Sistema Nacional de Investigadores de 1986 a 1992.
Director de cuatro tesis a nivel licenciatura.

INDICE

	Página
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xv
SUMMARY	xvi
1. INTRODUCCION	1
1.1 Objetivos.	2
1.2. Hipótesis de trabajo.	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.	4
2.1. Imagen de satélite.	7
2.2. Videografía.	9
2.3. Reflectancia espectral de la vegetación.	10
2.4. Restauración de imágenes.	13
2.5. Índices de vegetación.	16
2.6. Selección de bandas para la composición de imágenes en falso color.	17
2.6.1. Análisis de componentes principales (PCA).	18
2.6.2. Índice del factor óptimo (OIF).	22
2.7. Métodos de clasificación de imágenes digitales.	23
2.8. Cambio en uso de suelo.	24
2.9. Metodologías en cambio de uso de suelo.	26
2.10. Trabajos relacionados con el cambio de uso de suelo.	28
3 MATERIALES Y METODOS	32

3.1. Área de estudio. 32

3.2 Secuencia metodológica. 33

3.2.1 Preparación de la información digital. 34

3.2.1.1 Imágenes de satélite utilizadas. 35

3.2.1.2 Corrección geométrica de las imágenes. 37

3.2.2 Evaluación cuantitativa del uso de suelo. 39

3.2.2.1 Cambios en el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI). 39

3.2.2.2 Comparación múltiple del conjunto de imágenes de NDVI. 40

3.2.3 Evaluación cualitativa del uso de suelo. 41

3.2.3.1 Selección de bandas para la composición de imágenes de falso color. 41

3.2.3.2 Clasificación de las imágenes. 42

3.2.3.3 Estimación de cambios de uso de suelo. 44

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 45

4.1 Preparación de la información digital. 45

4.1.1 Corrección geométrica de las imágenes. 45

4.1.2 Descripción estadística de las imágenes. 47

4.1.3 Correlación entre las bandas. 48

4.2 Evaluación cuantitativa del uso de suelo. 48

4.2.1 Diferencia en el índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI). 50

4.2.2 Comparación múltiple del conjunto de imágenes de NDVI. 57

4.3 Evaluación cualitativa del uso de suelo. 61

4.3.1. Selección de bandas para la composición de imágenes en falso color. 62

4.3.1.1. Indice del factor óptimo (OIF). 62

4.3.1.2. Análisis de componentes principales (PCA). 63

4.3.1.3. Imágenes de falso color compuesto (FCC). 67

4.3.2 Clases temáticas evaluadas. 68

4.3.3 Firmas espectrales. 72

4.3.4 Uso de suelo en 1970. 73

4.3.5 Uso de suelo en 1996. 76

4.3.6 Cambio en uso de suelo de 1970 a 1996. 79

4.3.7 Crecimiento de las áreas urbanas. 84

5. CONCLUSIONES 85

6. LITERATURA CITADA 87

7. APENDICE 90

LISTA DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Tipo de plataforma, resolución, tamaño de las imágenes y ancho de las bandas espectrales para los diferentes satélites. 8

Cuadro 2. Fecha de adquisición de las imágenes, satélite y sensor para las tres imágenes de satélite. 35

Cuadro 3. Características de la imagen LANDSAT TM5, 027/43, Noviembre 04 de 1996. 36

Cuadro 4. Fecha de vuelo de las cartas uso de suelo de INEGI. 37

Cuadro 5. Clases de uso de suelo definidas para este trabajo. 43

Cuadro 6. Pares de puntos de control y cuadrado medio del error (RMS total), para el ajuste cuadrático de las imágenes de diferentes fechas. 46

Cuadro 7. Promedio y desviación estándar de los valores digitales (Dn) de cada banda, para las diferentes fechas. 47

Cuadro 8. Matriz de correlación entre las bandas de la imagen de 1986. 49

Cuadro 9. Matriz de correlación entre las bandas de la imagen de 1988. 49

Cuadro 10. Matriz de correlación entre las bandas de la imagen de 1996. 49

Cuadro 11. Promedio y desviación estándar para las diferencias de la variable NDVI comparando pares de fechas. 52

Cuadro 12. Valores del intercepto, pendiente y coeficiente de determinación para la regresión lineal entre imágenes de NDVI. 53

Cuadro 13. Parámetros estadísticos para las diferencias entre fechas, variable NDVI ajustada por regresión entre imágenes. 55

Cuadro 14 Varianza y varianza acumulada asociada a cada componente, Obtenida del análisis de componentes principales de las imágenes de NDVI de 1986, 1988 y 1996. 57

Cuadro 15 Matríz de error para la comparación de las imágenes de la diferencia de NDVI (columnas) y la imagen del segundo componente (hileras). 61

Cuadro 16. Índice del factor óptimo (OIF) para las combinaciones de banda con mayor varianza. 63

Cuadro 17 Varianza acumulada asociada a cada componente para las Imágenes de 1986, 1988 y 1996. Se excluyó la banda 6 (infrarrojo térmico). 64

Cuadro 18. Correlación de las bandas originales con el componente 1. Para las imágenes de 1986, 1988 y 1996. 65

Cuadro 19. Correlación de las bandas originales con el componente 2. Para las imágenes de 1986, 1988 y 1996. 66

Cuadro 20. Correlación de las bandas originales con el componente 3. Para las imágenes de 1986, 1988 y 1996. 67

Cuadro 21. Clases temáticas registradas para las dos fechas evaluadas. 71

Cuadro 22. Promedio de los valores digitales (Dn) en cada banda para cada Clase de uso de suelo. 73

Cuadro 23. Superficie (ha) para cada clase temática registrada en 1970. 74

Cuadro 24. Superficie (ha) para cada clase temática registrada para la fecha 1996 del área de estudio. 79

Cuadro 25. Porcentaje de cambio para 1996, en cada clase temática respecto a 1970. 81

Cuadro 26. Distribución del cambio de uso de suelo entre 1970 (columnas) y 1996 (hileras), para cada clase temática (hectáreas). 82

Cuadro 27. Distribución porcentual del cambio de uso de suelo, entre 1970 (columnas) y 1996 (hileras), para cada clase temática. 82

Cuadro 28. Superficie estimada y crecimiento relativo de 1970 a 1996 para las ciudades de Montemorelos y General Terán. 84

Cuadro 29. Pares de puntos de control y la raíz del cuadrado medio del error (RMS), obtenidos de la corrección geométrica para la imagen de 1986. 90

Cuadro 30. Valores del intercepto (b_0) y las pendientes b_i de la ecuación de ajuste cuadrática de la corrección geométrica de la imagen de 1986. 91

Cuadro 31. Pares de puntos de control y la raíz del cuadrado medio del error (RMS), obtenidos de la corrección geométrica para la imagen de 1988. 92

Cuadro 32 Valores del intercepto (b_0) y las pendientes b_i de la ecuación de ajuste cuadrática de la corrección geométrica de la imagen de 1988 94

Cuadro 33. Pares de puntos de control y la raíz del cuadrado medio del error (RMS), obtenidos de la corrección geométrica para la imagen de 1996. 95

Cuadro 34. Valores del intercepto (b_0) y las pendientes b_i de la ecuación de ajuste cuadrática de la corrección geométrica de la imagen de 1996. 96

Cuadro 35. Mínimo, máximo y desviación estándar para las bandas de la imagen de 1986. 96

Cuadro 36. Mínimo, máximo y desviación estándar para las bandas de la imagen de 1988. 96

Cuadro 37. Mínimo, máximo y desviación estándar para las bandas de la imagen de 1996. 96

Cuadro 38. Correlación de las bandas transformadas, por el análisis de componentes principales (PCA), con los cuatro primeros componentes. Se excluyó la banda 6 infrarrojo térmica. Imagen de 1986. 98

Cuadro 39. Correlación de las bandas transformadas, por el análisis de componentes principales (PCA), con los cuatro primeros componentes. Se excluyó la banda 6/infrarrojo térmica. Imagen de 1988. 98

Cuadro 40. Correlación de las bandas transformadas, por el análisis de componentes principales (PCA), con los cuatro primeros componentes. Se excluyó la banda 6 infrarrojo térmica. Imagen de 1996. 98

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Frecuencia y longitud de onda para las diferentes bandas del espectro electromagnético (Modificado de Chuvieco, 1996). 5

Figura 2. Representación esquemática del flujo de energía incidente y energía reflejada (Modificado de Chuvieco, 1996). 6

Figura 3. Factores que afectan la reflectancia de la hoja en las diferentes regiones espectrales (Tomado de Chuvieco, 1996). 11

Figura 4. Diagrama de la reflectancia en múltiples estratos de hojas. 13

Figura 5. Localización del área de estudio. 32

Figura 6. Imagen del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI), para 1986 (a), 1988 (b) y 1996 (c). 51

Figura 7. Imagen del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NVDI) para 1986 (a), la imagen corregida por regresión (b) y la imagen de las diferencias absolutas (c) entre la imagen corregida y el índice de vegetación de diferencias normalizadas. 54

Figura 8. Cambio en uso del suelo estimado mediante la diferencia en el Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI). 56

Figura 9. Componente 1 (a), 2 (b) y 3 (c), generados a partir de las Imágenes de NDVI para 1986, 1988 y 1996. Utilizando el análisis de componentes principales para determinar los cambios en el conjunto de NDVI. 59

Figura 10. Cambio en el uso del suelo estimado mediante el análisis de componentes principales. 60

Figura 11. Imágenes de falso color compuesto generadas con las bandas 1, 4 y 5 para 1986 (a), 1988 (b) y 1996 (c). 69

Figura 12. Imágenes de falso color compuesto generadas con las bandas 2, 3 y 4 para 1986 (a), 1988 (b) y 1996 (c). 70

Figura 13. Clases de suelo estimadas para 1970, en la zona citrícola de Nuevo León. 75

Figura 14. Distribución de las frecuencias de los valores digitales de la banda 4, para matorral espinoso (a) y suelo desnudo (b). 76

Figura 15. Clases de suelo estimadas para 1996, en la zona citrícola de Nuevo León. 80

RESUMEN

José Verástegui Chávez Fecha de graduación. **Septiembre del 2000.**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA

TITULO DEL ESTUDIO: Evaluación del cambio de uso de suelo en la región citricola de Nuevo León.

Candidato para el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas con Especialidad en Agua – Suelo.

Áreas de estudio: Cambio de uso de Suelo, Sistemas de Información Geográfica, Sensores Remoto.

Propósitos y Método de Estudio: La región de estudio se ubica al Noreste de México, donde la principal actividad agrícola es la producción de citricos. En este trabajo se estimó el cambio en uso de suelo entre 1970 y 1996 empleando imágenes del satélite LandSat TM. Las imágenes se georreferenciaron al sistema datum Norte Americano de 1927. Posteriormente se procedió a estimar los cambios ocurridos entre 1986 y 1996 usando la diferencia en el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) y por medio del análisis de componentes principales. Los cambios cualitativos se evaluaron comparando las superficies de cada clase temática entre 1970 y 1996. La imagen de 1996 se clasificó con el algoritmo de clasificación del conjunto básico de máxima probabilidad (MAXSET). La clasificación para 1970 se obtuvo digitalizando los mapas de Uso de Suelo editados por INEGI. En conjunto se manejaron nueve clases temáticas las cuales fueron comparadas en cuadro de doble entrada, para los diferentes años.

Contribuciones y Conclusiones: Los resultados de la evaluación del cambio de uso de suelo, estimado a partir de la diferencia de la variable NDVI, mostraron 434.3 ha con disminución en la cubierta vegetal entre 1986 y 1996. Al hacer la evaluación con el análisis de componentes principales, este mostró 430.0 ha con disminución en la cubierta vegetal. Los cambios que ocurrieron en estas áreas fueron en áreas que en 1986 estaban cubiertas con Matorrales y que en el transcurso del tiempo se fueron incorporando al proceso agrícola de la región. La evaluación de los cambios cualitativos, entre 1970 y 1996, manifestó la expansión de la frontera agrícola de 30,597.0 ha a 38,591.3 ha. Esta expansión ocupó superficies que en 1970 estaban cubiertas con vegetación natural. Por consecuencia, la información generada en este trabajo demuestra que en 26 años la deforestación del área de estudio tuvo como finalidad la incorporación de áreas de vegetación natural al proceso de producción agrícola y en menor medida al crecimiento de las manchas urbanas.

FIRMA DEL ASESOR PRINCIPAL: _____

SUMMARY

José Verástegui Chávez Graduation. **September 2000**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA

RESEARCH WORK TITLE: Evaluation of land use changes in the citrus region of Nuevo León state.

Candidate to obtain the Doctor in Agricultural Sciences Degree. Water and Soil Sciences.

Subjects of the Research Work: Land Use Change, Geographic Information Systems, Remote Sensing.

Pourpose and Method of study: The studied region is located to the Northeast of Mexico, where the main agricultural activity is the citrics production. In this work it was considered the change in land use between 1970 and 1996, using satellite images of the LandSat TM. The images were georreferenced according to the North American system datum of 1927. After this, it was estimated the changes that happened between 1986 and 1996, using the Index of Vegetation of Normalized Differences (NDVI) and by the principal components analysis. The qualitative changes, were evaluated comparing the surfaces of each thematic class, between 1970 and 1996. The image of 1996, was classified with the algorithm of classification of the maximum set basic probability classifier (MAXSET). The classification for 1970 was obtained digitizing the maps, of land use published by INEGI. On the whole, nine thematic classes were managed, which were compared with a cross table for the different years.

Contributions and Conclusions: Results of evaluation of change of land use, estimated from the difference of the variable NDVI, t showed 434.3 ha with a decrease in the vegetation cover between, 1986 and 1996. When principal components were used, this showed 430.0 ha were estimated with a decrease in the vegetation cover. The changes that happened in these areas, were in areas that in 1986 they were covered with brushwood and that in the course of the time they were incorporated to the agricultural process of the region. The evaluation of the qualitative changes, between 1970 and 1996, manifested the expansion of the agricultural frontier of 30,597.0 ha to 38,591.3 ha. This expansion occupied surfaces, that in 1970 they were covered with natural vegetation. For consequence, the information generated in this work, demonstrates that in 26 years the deforestation of the studied area had as purpose the incorporation of areas of natural vegetation, to the process of agricultural production and in smaller measure to the growth of the urban stains.

MAIN ADVISOR SIGNATURE: _____

1. INTRODUCCIÓN.

De la superficie total del estado de Nuevo León, el 74.0% son tierras de agostadero, el 7% se dedican a la agricultura, el 6.6% se clasifica como bosque, el 7.0% como pastos y el 5.4% esta ocupada por cuerpos de agua, asentamientos urbanos y tierras erosionadas (SARH, 1993).

En la clase designada como agricultura, el sistema de producción de cítricos ocupa un lugar importante no solo por la superficie sino también desde el punto de vista socioeconómico en los municipios de Allende, Cadereyta, General Terán, Hualahuises, Linares y Montemorelos. Como referencia, en 1994 existían 24,382 ha de cítricos en desarrollo y 15,049 ha en producción. Para el mismo año, la producción promedio fue de 7.0 t ha^{-1} en condiciones de riego mientras que en temporal fue de 3 9 t ha^{-1} (SARH, 1994).

La citricultura presenta una serie de problemas que enmarcan a esta actividad como una actividad incierta y en algunos casos poco rentable. Los problemas de la citricultura cubren desde aspectos de clima hasta problemas de comercialización y financiamiento. El principal problema que enfrenta la citricultura en Nuevo León es la ocurrencia de bajas temperaturas que dañan la producción y al follaje, llegando a matar al árbol, como ocurrió en 1983 cuando la temperatura ambiental descendió hasta -10°C por aproximadamente 60 horas y en 1989 con temperatura alrededor de -12°C por 72 horas. Otros problemas que se presentan son: el riesgo latente de enfermedades,

plagas, disminución en el volumen de agua disponible para riego y la sequía de los últimos años.

Las heladas afectan en forma directa el tipo de uso del suelo, debido principalmente a que una gran parte de las huertas dañadas no se rehabilitan, dedicándose a otra actividad dentro del mismo sector, o cambiaron de uso agrícola a uso urbano. En esta región los cambios en uso del suelo y su efecto en los procesos de deterioro del medio ambiente no se han evaluado.

Debido a las condiciones descritas anteriormente se planteo este trabajo de investigación con los objetivos e hipótesis de trabajo descritos enseguida:

1.1. Objetivos

Objetivo general:

- Estimar el cambio en uso del suelo en la región citrícola de Nuevo León, mediante imágenes de satélite.

Objetivos específicos:

- Evaluar cuantitativamente el cambio de uso de suelo, por medio del índice de vegetación de diferencias normalizadas.
- Realizar una clasificación cualitativa en el cambio de uso del suelo por medio de procedimientos de clasificación supervisada.

1.2. Hipótesis de trabajo.

Hipótesis General:

- Las técnicas de extracción de imágenes de satélite permiten la identificación de cambios de uso de suelo, por lo tanto, es posible identificar el efecto de la frontera agrícola sobre las comunidades vegetales naturales.

Hipótesis particular:

- Por medio de las bandas del infrarrojo cercano y rojo, se puede diferenciar la vegetación y el suelo, por lo tanto, una comparación cuantitativa puede realizarse a través del índice de vegetación de diferencias normalizadas.
- La identificación de la reflectancia de un objeto en la superficie del suelo, se establece como una firma espectral, por lo tanto, la agrupación de objetos de la misma firma espectral dará una clasificación cualitativa.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

La percepción remota o teledetección se define como la ciencia mediante la cuál se obtiene información de los objetos sin realizar contacto físico con ellos. Los sistemas de percepción remota se basan en la detección de las variaciones de la respuesta de los objetos a los campos electromagnético, a los campos de fuerza y a las ondas acústicas (Chuvieco, 1996).

De acuerdo a las teorías ondulatorias y cuántica, en la Figura 1 se presenta en forma esquemática el espectro electromagnético.

La fracción del espectro conocida como luz visible corresponde a la energía que el ojo humano puede detectar. Sin embargo, con el desarrollo de la ciencia y de la tecnología es posible detectar otras partes del espectro. Es conveniente señalar que la energía mas conocida que puede ser detectada por los sensores remotos corresponde a la luz visible y a una pequeña porción del infrarrojo. Sin embargo, con el desarrollo de la tecnología actualmente es posible usar en teledetección otras bandas del espectro electromagnético como son las microondas, la región ultravioleta y el radar (Chuvieco, 1996).

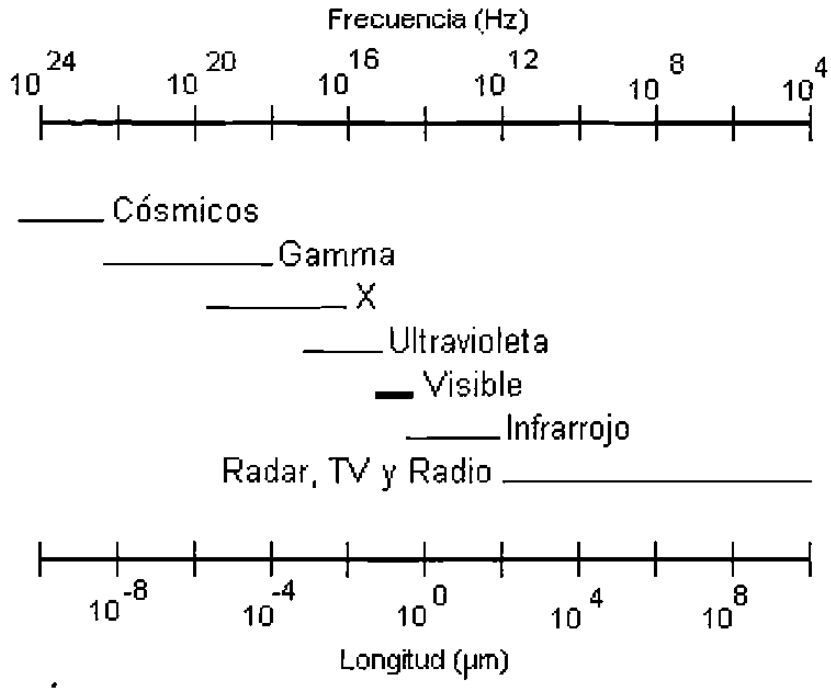


Figura 1. Frecuencia y longitud de onda para las diferentes bandas del espectro electromagnético. (Modificado de Chuvieco, 1996).

La principal fuente de energía electromagnética, sobre la superficie de la tierra, es el sol. La energía recibida en la superficie sigue el proceso descrito en la Figura 2. Donde una parte de la energía es absorbida por los objetos sobre la superficie, otra se trasmite a otros objetos y una parte importante se refleja.

La percepción remota se fundamenta en la detección de la energía reflejada por los cuerpos, ya que cada cuerpo tiene una reflexión característica que lo hace diferente a los demás. Actualmente se puede tener información de la energía reflejada en forma análoga (fotografía) y en forma digital (imagen), lo cual permite reconocer más rápido y con bases estadísticas las características espaciales y/o geométricas de los objetos observados (Chuvieco, 1996).

Una vez registrada la parte reflejada del espectro se siguen una serie de procedimientos con la finalidad de identificar el tipo de objetos sobre la superficie. Esta identificación se logra asociando la información del sensor con las características del terreno, pues cada objeto refleja en forma particular la energía. Esta reflexión exclusiva de los objetos se conocen como firma espectral. La firma espectral se define como el patrón de respuesta espectral o grado con el cuál la energía es reflejada en diferentes regiones del espectro (Swain, 1978y Chuvieco, 1996).

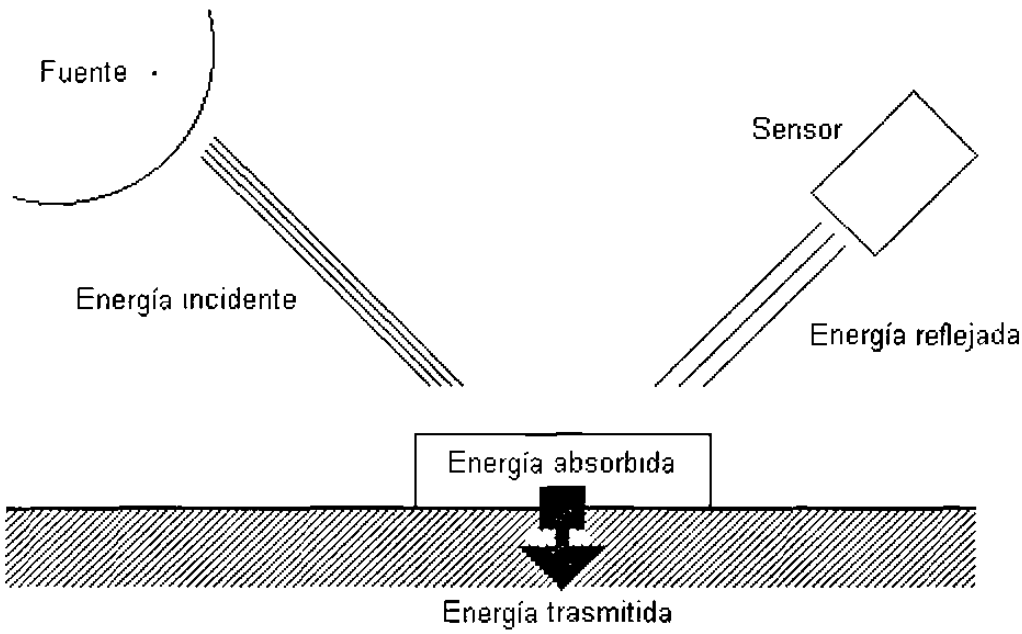


Figura 2. Representación esquemática del flujo de energía incidente y energía reflejada. (Modificado de Chuvieco, 1996).

Después que se identifica una firma espectral la información se procesa basándose en técnicas de agrupamiento o conglomerados, los cuales se clasifican y

agrupan, bajo procedimientos estadísticos. Todos los procedimientos descritos se basan en la teoría estadística, en reglas de decisión y en la probabilidad de error.

Los materiales mas comúnmente utilizados en nuestro país para evaluar superficies agrícolas, pecuarias y forestales son la fotografía aérea (luz visible e infrarroja), seguida de las imágenes de satélite, obtenidas por diferentes sensores (LANDSAT, Multi Spectral Scanner y Thematic Mapper; Systeme Pour L'Observation de la Terre SPOT; Advanced Very High Resolution Radiometer NOAA-AVHRR; y el European Remote Sensing Satellite, ERS-1).

2.1. Imagen de satélite.

Como se mencionó anteriormente, una fuente importante de información de la superficie terrestre, son las imágenes de satélite. Cada sensor toma las imágenes con características muy particulares como puede observarse en el Cuadro 1. Las imágenes más difundidas, en nuestro medio, son las imágenes de los satélites Landsat MSS (MultiSpectral Scanner) y Landsat TM (Thematic Mapper). Los sensores de este último detectan la información en las bandas azul, verde y rojo de la luz visible y en el área de los infrarrojos.

Cuadro 1. Tipo de plataforma, resolución, tamaño de las imágenes y ancho de las bandas espectrales para los diferentes satélites.

Plataforma	Resolución (m)	Tamaño de imagen (km)	Bandas espectrales (μm)
Landsat 1 y 2 MSS	57 X 59	185 X 185	0.5 - 0.6
			0.6 - 0 7
			0.7 - 0.8
			0.8 - 1.1
Landsat 3 MSS	57 X 59	185 X 185	0.5 - 0.6
	238 X 238*		0.6 - 0.7
			0.7 - 0.8
			0.8 - 1.1
			10.4 - 12.6
Landsat 4 y 5 TM	30 X 30	185 X 185	0.45 - 0.52
	120 X 120**		0.52 - 0.60
			0.63 - 0 69
			0 76 - 0.90
			1.55 - 1.75
			10.40 - 12.5
			2.08 - 2.35
Spot 1 y 2	20 X 20	60 X 60	0.50 - 0.59
	10 X 10***		0.61 - 0.69
			0.79 - 0.90
			0.51 - 0.73
NOAA-AVHRR	500 X 500	2400 X 2400	0.58 - 0.68
	1,000 X 1,000		0.73 - 1.10
			3.55 - 3.93
			10.3 - 11.3
			11.5 - 12.5
ERS-1	30 X 30	80 X 80	5.7 (cm)

* Para la quinta banda (10 4 - 12 6 μm)

** Para la sexta banda (10 4 - 12 50 μm)

*** Modo pancromático (0 51 - 0 73 μm)

En los sensores de los Landsat TM, para detectar la información reflejada en las bandas visible e infrarrojo cercano se usan detectores de silicón, para las bandas del infrarrojo medio, los detectores son de indium-antimonide y para el lejano infrarrojo son de mercurio-cadmiun-telurio.

Cada escena tiene un ancho de 185 km, cubriendo su órbita en 16 días. Una gran ventaja es que los datos radiométricos se digitalizan a 8 bits de precisión obteniéndose 256 valores radiométricos (número digital), mientras que en el satélite Landsat MSS el registro se hace a 6 bits, por lo que los valores radiométricos son hasta el 64. (Silva, 1978).

2.2 Videografía.

En los últimos años se ha desarrollado una técnica conocida como Videografía. Esta técnica aplica con las mismas bases de los sensores remotos, solo que la imagen se registra en forma continua. Los primeros sistemas de videografía usados como herramienta en sensores remotos se hizo a finales de la década de los 60's y a principios de los 70's (Robinove and Skibitzke, 1967; Mozer and Seige, citados por Everitt et. al., 1991).

La videografía se ha aplicado en una amplia variedad de situaciones que van desde la valoración ecológica en el manejo de recursos (Everitt y Nixon, 1985), diferenciación de especies y condiciones de suelo (Everitt et. al., 1987), detección de

suelos salinos (Everitt et. al., 1988), control de incendios (Everitt et. al., 1989), hasta la detección de enfermedades (Everitt et. al., 1994; Hickman et. al., 1991)

El sistema de videografía registra la información de la reflexión superficial en cámaras de vídeo que por lo general se montan sobre un avión o helicóptero. La combinación de sistema y plataforma pone en ventaja a este tipo de registro respecto a las imágenes de los satélites. La ventaja radica en que puede modificarse la periodicidad de las tomas en función de las necesidades propias del registro y a que la resolución de los registros es menor , por consecuencia es posible observar objetos de menores dimensiones. Para tener la información de la misma superfície los registros de las imágenes se sincronizan entre si, lo cual hace posible hacer la diferentes combinaciones de bandas. En este sistema el registro de las imágenes se realiza en forma análoga y en forma digital (Everitt et. al., 1994).

2.3. Reflectancia espectral de la vegetación.

En la vegetación "verde" existen tres grupos de pigmentos principales: clorofila (verde), carotenos y xantófila (amarillo) y la antocianina (rojo). Es de esperarse que existan diferentes niveles de absorción y reflectancia para cada pigmento, en cada longitud de onda. En la Figura 3, se presenta la respuesta espectral promedio de la vegetación verde a los diferentes factores de reflectancia de la hoja.

En la parte visible del espectro (0.40 a 0.70 μm) la respuesta es dominada por los pigmentos de la vegetación. En el azul (0 45 μm) y en el rojo (0.65μm) disminuye la reflectancia debido a que la clorofila absorbe más energía, por consecuencia el color verde es el que domina en la vegetación. Cuando la cantidad de clorofila disminuye (p. e. cultivo enfermo o cultivo en estado maduro), aumenta la reflectancia en el azul y el rojo dando una coloración amarillenta-rojiza en la banda visible del espectro. Al entrar una planta a su madures disminuye la clorofila manteniendo los niveles de carotenos y xantófila observándose la coloración amarillenta caracteristica de ésta etapa. En algunos árboles se produce antocianinas en grandes cantidades por lo que las hojas se ven color rojo.

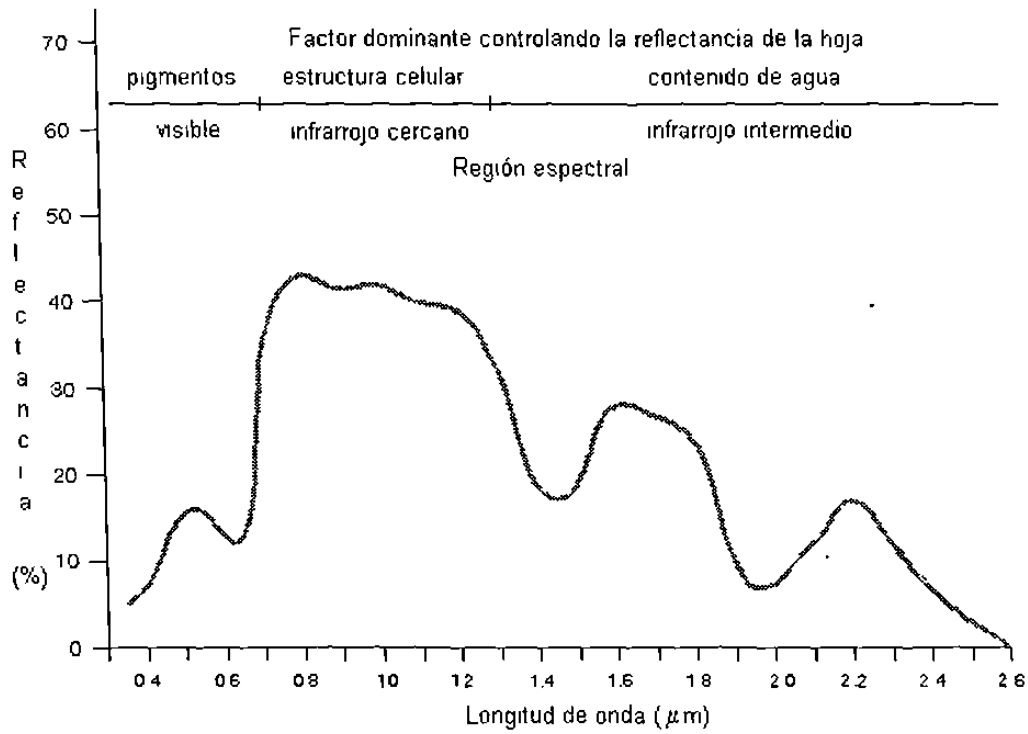


Figura 3. Factores de reflectancia en las diferentes regiones espectrales. (Tomado de Chuvieco, 1996).

En la misma Figura 3, se observa un aumento en la reflectancia al pasar del visible al infrarrojo cercano (aproximadamente 0.7 μm). En esta región la reflectancia y la transmisión son muy altas (50%) mientras que la absorción es muy baja.

En la parte del infrarrojo medio la respuesta espectral de la vegetación es dominada por las bandas de absorción de agua (1.4, 1.9 y 2.7 μm). Por lo que, el grado de absorción de agua por la vegetación es una función del contenido de agua de la hoja y del grosor de la misma. La diferencia de la reflectancia respecto al contenido de agua de la vegetación es significante solo cuando el contenido de agua es mayor al 54%. Además la estructura interna de las hojas domina la reflectancia, por lo que es posible diferenciar las especies vegetales en la región del infrarrojo cercano. (Chuvieco, 1996).

Por otra parte, existe reflectancia aditiva debida a los diferentes estratos de los cuales se compone la planta (Figura 4). Esta reflectancia aditiva se explica si se considera que la mitad de la energía (I) en el primer estrato pasará al segundo estrato como energía trasmitida y la otra mitad se reflejará. Si este proceso se repite en los dos primeros estratos de hojas del total de la energía incidente (I) se reflejara aproximadamente 5/8 de esa energía.

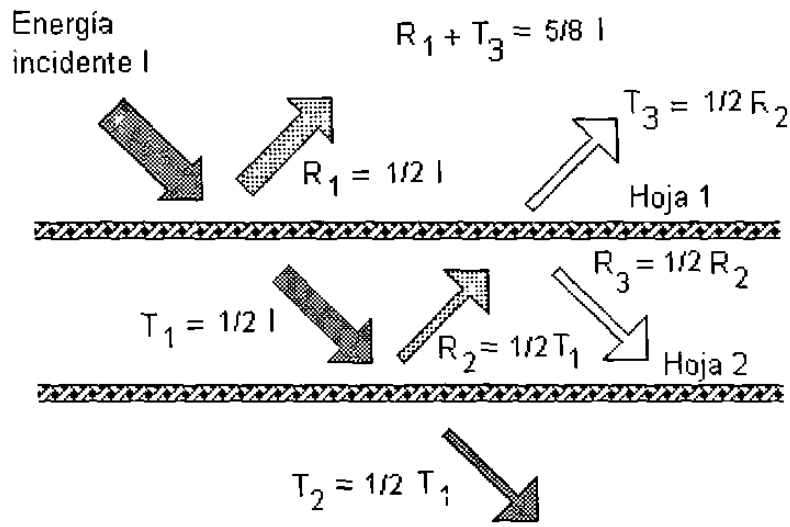


Figura 4. Diagrama de la reflectancia de múltiples estratos de hojas.

2.4 Restauración de imágenes.

Las imágenes de satélite presentan dos tipos de distorsiones clasificadas como radiométricas y geométricas. Los procesos mediante los cuales se corrigen estos errores se les conocen como "restauración de imágenes" (Deusen, 1994).

Las distorsiones radiométricas se deben a la presencia de información fuera de lugar en la imagen y ocurren debidas a diferentes factores entre los que destacan los efectos atmosféricos, efectos topográficos, problemas mecánicos en los sensores y en la sensibilidad intrínseca en los sensores. Esta información se presenta como manchas bien definidas y fuera del contexto total de la información registrada. (Eastman, 1997)

Las correcciones geométricas consisten en dos partes. En una se define la resolución de la imagen y en la otra se registra la imagen a una proyección asociada a un *datum*. En los Sistemas de Información Geográfica (GIS) las correcciones se hacen simultáneamente incluyendo la resolución y el registro de la imagen a un sistema de coordenadas. (Phillips y Swain, 1978).

La representación exacta de la superficie terrestre en un plano bidimensional presenta algunos problemas inherentes a la forma e irregularidad en la superficie. La forma de la superficie de la tierra (*geoide)* se asemeja a un elipsoide revolucionando sobre su eje menor. La existencia de diferentes elipsoides de referencia, se debe a que no todos ajustan para toda la superficie de la tierra. Una vez que se define el elipsoide se define un *datum*. El datum define al elipsoide, la localización inicial, la dirección de referencia al norte y la distancia entre el geoide y el elipsoide Para representar la imagen tridimensional de la superficie terrestre en un plano, se transforman las coordenadas geodésicas a un plano de coordenadas. Este proceso se conoce como "proyección". (ESRI, 1991; IERS, 1998).

Los *datums* más recientes y de uso mundial; son el World Geodetic System de 1984 (WGS84) el cual se ajusta y es aplicable para todo el globo terráqueo. Este sistema fue desarrollado para estimar las órbitas de los satélites de navegación (posicionamiento global GPS's). El WGS84 está definido dinámicamente coincidiendo el centro geométrico del elipsoide con el centro de la masa terrestre y para las estimaciones involucra tres dimensiones incluyendo la altitud, latitud y longitud (Dept. of Defense, 1994; INEGI, 1995).

Las técnicas más precisas desarrolladas hasta el momento se basan en mediciones de rayos láser tanto terrestres como de satélites. El International Earth Rotation Institute Service (IERS) localizado en Francia, desarrolló el sistema ITRF92 (International Terrstrial Reference Frame) basándose en diferentes soluciones tridimensionales. Este sistema es dinámico y varia con el tiempo a los desplazamientos del centro de la masa terrestre (IERS, 1998; INEGI, 1996).

La información geográfica de México, se ha desarrollado oficialmente usando el *datum* Norteamericano de 1927 (NAD27) basado en el elipsoide Clarke de 1866. Actualmente debido a que este es incompatible con la tecnología de medición basada en el sistema de posicionamiento global (GPS) e inadecuado para las condiciones del país la tendencia es el uso del sistema ITFR92 época 1988.0. (INEGI, 1995; INEGI, 1996).

Para realizar el ajuste de la imagen a un sistema de coordenadas, en términos generales, los procesos usan un ajuste de ecuaciones polinomiales para hacer la transformación de las posiciones originales al nuevo sistema de coordenadas. A las nuevas posiciones les asignan valores por remuestreo de los valores iniciales. Las opciones para el remuestreo son dos: la opción del "vecino cercano" donde no se alteran los valores originales, solo cambian de posición y la opción donde los nuevos valores se estiman por interpolación (Eastman, 1992; ESRI, 1991).

2.5 Índices de vegetación.

Los Índices de Vegetación (VI) son modelos diseñados para resaltar los atributos "vegetativos" de la imagen. En la estimación se usa la información contenida en la banda del rojo visible (banda 3) y la banda del infrarrojo cercano (banda 4). Se usan estas bandas debido a que en el rojo visible la reflectancia de la vegetación es baja mientras que en el infrarrojo cercano su reflectancia es alta (Huete, 1987; Tucker, 1979).

Los índices de vegetación se dividen en: Los basados en la pendiente, donde el índice se obtiene por medio de división de los valores de las bandas roja e infrarroja; y los basado en la distancia, donde se hace necesario obtener una "línea de suelo" la cual se obtiene al aplicar la regresión simple entre los valores de las dos bandas y los basados en transformaciones ortogonales (Huete, et. al., 1994). En este último grupo se encuentran el análisis de componentes principales donde el segundo componente destacan las características de vegetación debido a que la banda infrarroja aporta información negativa mientras que las visibles son positivas.

Dentro del grupo de los índices basados en la pendiente se encuentra el índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI) desarrollado por Rouse et. al. (citado por Eastman, 1997). Este índice es el más difundido para interpretar las características de la vegetación sobre la superficie del suelo. Para su estimación se usa la ecuación 1.

NDVI = (banda infrarroja - banda roja) / (banda infrarroja + banda roja) (1)

2.6. Selección de bandas para la composición de imágenes en falso color.

Combinando tres bandas de las imágenes, es posible resaltar los atributos superficiales a través de una imagen de Falso Color Compuesto (FCC), por lo que es conveniente determinar, esta combinación de bandas para generar una imagen de falso color compuesto. La manera tradicional de hacer la combinación es usando las bandas verde, rojo e infrarrojo cercano (bandas 2, 3 y 4 de Landsat TM) para generar la imagen de falso color compuesto. A partir de la imagen de falso color compuesto es posible determinar las características superficiales de la escena en estudio. Por lo que entre mayor variabilidad, mejor se verán las diferencias sobre la superficie terrestre.

Las imágenes de falso color compuesto, se pueden analizar visualmente o con técnicas digitales. Las técnicas digitales permiten determinar la variabilidad de la imagen por lo que es posible que la combinacion estándar de las bandas 2, 3 y 4 no siempre tenga la máxima variabilidad de la escena.

Es de esperarse que la información, de al menos un par de bandas, de una misma escena se encuentren correlacionadas, en tal caso las imágenes tienen la misma información desde el punto de vista de la fotointerpretación digital. Por lo que es necesario determinar cuales bandas se encuentran correlacionadas, para que sean desechadas del análisis posterior.

Dentro de las técnicas para determinar la máxima variabilidad de una escena se encuentra el Análisis de componentes principales (PCA), el análisis de los diagramas de dispersión, la diferenciación de primer orden y el Índice de Factor Óptimo (OIF).

2.6.1. Análisis de componentes principales (PCA). El Análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica de análisis dentro de la estadística multivariada. El uso del Análisis de Componentes Principales consiste en considerar a cada banda como una variable de análisis. El principal objetivo del Análisis de Componentes Principales es reducir las variables en un nuevo conjunto de variables, más pequeño, sin perder parte de la información original. Las principales técnicas del análisis multivariado se pueden dividir en: a) las que detectan la interdependecia entre variables e individuos y b) las que detectan la dependencia entre variables. En el primer grupo se encuentran el Análisis de Factores, la Correlación Canónica y el análisis de Cluster. Mientras que en el segundo grupo se incluyen a la Regresión Múltiple, al Análisis de Contingencia y al Análisis Discriminante.

El Análisis de Factores intenta identificar las variables y la estructura del conjunto de variables observadas. Por lo que, se usa frecuentemente en la reducción de variables y por consecuencia de datos y también para identificar la estructura de las relaciones entre las variables. Entonces, con la técnica de Análisis de Factores es posible reducir el volumen de información y al mismo tiempo clasificar la información.

Un caso especial del Análisis de Factores es el Análisis de Componentes Principales o transformación Karhunen-Loeve, donde el propósito es derivar un

pequeño número de combinaciones lineales o componentes principales, de un grupo de variables. Este grupo reducido de combinaciones lineales debe tener como característica principal, que debe conservar la información contenida de las variables originales. Las nuevas variables (componentes) tienen dos aspectos importantes: no debe existir correlación entre ellos y deben representar la máxima variabilidad.

El Análisis de Componentes Principales se basa en la transformación lineal de las observaciones originales. Esta transformación lineal se conoce como la generación de los vectores y valores propios (eigenvalues y eigenvectors). Puesto que la información multivariada se puede escribir como una matriz donde las columnas son variables y las hileras son los individuos. Sea B una matriz cuadrada de dimensión (p x p); es posible encontrar un escalar (λ) y un vector X de dimensiones (p x 1) tal que:

$$BX = \lambda X \qquad (2)$$

Lo que implica

$$BX - \lambda X = 0 = (B - \lambda I)\, X = 0 \qquad (3)$$

cuyo resultado son dos raíces con valores para λ.

La suma algebraica de los valores propios (eigenvalues) es igual a la suma de los valores de la diagonal principal de la matriz original. Esta propiedad es importante ya que cuando los valores propios se calculan a partir de la matriz de covarianza, la suma de los valores propios es igual a la suma de las varianzas de las variables incluidas en la matriz, en otras palabras es la variación total.

Si el mismo procedimiento se aplica al elemento 1 del vector X es posible formar un vector con los valores de X(1) y X(2). Este vector se conoce como vector propio (eigenvector).

Dado que el Análisis de Componentes Principales, pretende generar un nuevo conjunto de combinaciones lineales o componentes principales, de tal manera que no estén correlacionados entres si y que cada componente conlleva la máxima variabilidad residual, esto implica encontrar (p x p) constantes tales que

$$Y(k) = \sum_{J=1}^{P} l(jk)\, X(j), \qquad k = 1,2,3,\ldots,p \qquad (4)$$

Donde l(jk) es cada una de las constantes.

En cada nuevo valor Y(k), intervienen todos los valores de las variables originales X(j). En la ecuación 4, el valor de l(jk) determina el grado con que contribuye la información original al componente generado. El número de componentes depende de cada situación particular. Como un criterio para determinar el numero de factores es seleccionar solo los factores con valores propios mayores a 1, o en un gráfico colocar el número de factor y el valor correspondiente al valor propio, cuando la curva se vuelve asintótica es el número que corresponde a los factores.

La rotación es la aplicación de una transformación lineal no singular a componentes para aumentar la interpretación. En términos generales las variables

tienen algún grado de similaridad, el cual puede expresarse cuantitativamente en una matriz usando una medida de similaridad que puede ser la correlación de Pearson.

Esta matriz de similaridad puede ser considerada como un conjunto de vectores representando las relaciones de cada variable con las otras variables. Por lo que, la matriz de similaridad es una transformación de la varianza en los datos originales, cada hilera es un vector representando la posición de cada variable en el espacio relativo n-dimensiones. Además, las variables ortogonales tendrán su correspondiente entrada en el vector de similaridad igual a cero. Una vez hecha la transformación, la posición de los vectores cambia.

La estructura fundamental de los datos puede extraerse con procedimientos matemáticos, que producen un nuevo conjunto de dimensiones alineado con la estructura de los datos. Cada nueva dimensión (vector propio) es ortogonal y proporciona una parte de la varianza total que esta dada por el valor propio.

Los valores propios, dan la explicación de la varianza a partir de los vectores propios. Si la matriz de similaridad es una matriz de correlaciones, entonces cada variable esta estandarizada a una media = 0 y a una varianza = 1. Cada vector propio se conoce como Componente Principal, en el caso de que dos variables tengan perfecta correlación, estas estarán alineadas en un vector propio y el valor propio será el máximo y los otros valores propios serán igual a cero.

A este punto se han identificado las dimensiones ortogonales (vectores propios y componentes), los cuales están alineados con la orientación de la estructura entre variables. El siguiente paso es expresar como cada variable esta relacionada a cada

uno de los nuevos componentes (loading). Matemáticamente se define como la correlación entre la variable y vector propio.

La varianza se encuentra distribuida en los componentes ortogonales, sin embargo en esta distribución pocos componentes son significantes. Los de menor significancia pueden ser removidos y así aumentar la posición de los primeros, rotando los vectores propios (Davis, 1986; Richards, 1993; Chuvieco, 1996).

2.6.2. Índice del Factor Óptimo (OIF). El Índice de Factor Óptimo fue desarrollado para estimar la combinación de bandas con mayor variabilidad para resaltar las características de estas, se basa en la varianza y en la correlación de cada banda. El índice del Factor Óptimo se obtiene con la ecuación 5 (Dwivedi and Rao, 1992).

$$OIF = \sum_{j=1}^{3} Sd_i / \sum_{j=1}^{3} | CC_j | \qquad (5)$$

donde:

Sd_i = Desviación estándar de la banda y

$|CCj|$ = Valor absoluto de la correlación entre dos de las tres bandas.

Se considera que la combinación de tres bandas con los más altos valores de OIF presenta la mayor variabilidad por lo que es posible observar mejor las diferencias en las imágenes de falso color compuesto.

2.7 Métodos de clasificación de imágenes digitales.

La clasificación de imágenes digitales es el proceso mediante el cual se interpreta la información contenida en un medio electrónico con la ayuda de algoritmos de clasificación. Existen dos grupos de las diferentes técnicas de clasificación. En el primer grupo conocido como Clasificación No Supervisada, los atributos sobre la superficie terrestre se agrupan mediante técnicas que se basan en los diferentes patrones de reflectancia asumiendo que estos representan diferentes tipos de atributos terrestres. Mientras que en el segundo grupo, la Clasificación Supervisada, es necesario proveer información sobre la descripción estadística de cada atributo. Entonces bajo un procedimiento se agrupa el resto de la imagen obteniéndose así las diferentes clases de cubiertas vegetales sobre la superficie terrestre. Por lo que la clasificación se vuelve un proceso de toma de decisión basado en conocimiento previo.

Los procedimientos de clasificación supervisada se pueden agrupar en dos: los de clasificación rígida y los de clasificación flexible. Los primeros se caracterizan porque asignan inequívocamente toda la información de la imagen a una de las clases definidas. Mientras que el segundo grupo difiere del primero en que la clasificación no es en un solo sentido sino que asigna o expresa el grado de similaridad de la clasificación de la imagen. Por lo que la clasificación presenta un grado de incertidumbre basado en la teoría de la probabilidad Bayesiana (Chuvieco, 1996; Eastman, 1997).

Dentro de estos procedimientos se encuentra el designado como Maximum Set Basic Probability Classiffier (MAXSET). La clasificación se basa en la información contenida en las firmas espectrales. Este clasificador asigna las áreas a cada clase basándose en el grado de pertenencia a partir de las clases jerárquicas de Dempster-Shafer, en las que se describen todas las clases de clasificación y sus posibles combinaciones. En principio es un clasificador del tipo Supervisado pues se basa en la información de los sitios de entrenamiento para posteriormente convertirse en un clasificador No Supervisado al crear nuevas clases basadas en la combinación de las clases únicas y así asigna el resto de la información. Entonces, con tres clases de uso de suelo A, B y C, MAXSET evaluará el grado de membresia de la imagen en las siguientes clases: [A], [B], [C], [A,B], [A,C], [B,C] y [A,B,C]. (Eastman, 1997).

La importancia de las nuevas clases es que representan combinaciones estadísticamente difíciles de distinguir de las clases basicas. Esto se puede deber a una confusión entre la definición de clases o a que realmente pertenecen a otro conjunto de clases.

2.8. Cambio en uso del suelo.

Considerando al suelo como un ente biológico las respuestas espectrales de las características superficiales no permanecen estáticas, cambian con la localización geográfica y con el tiempo. Estos cambios pueden ser debidos a condiciones naturales

o a causas humanas. Las técnicas para monitorear los cambios temporales se basan en obtener información sobre la misma área geográfica en diferente tiempo para determinar donde y como los cambios suceden (Hoffer, 1978)

El cambio en uso del suelo influye en la vocación de la tierra, por lo que en algunos casos, el uso del suelo no es el correcto y por consecuencia, se induce el proceso de deterioro del medio ambiente, acelerando el fenómeno de desertificación. Este proceso trae por consecuencia una baja en la productividad del sector agrícola, pecuario y forestal debido a que se alteran los mecanismos homeostáticos del ecosistema. Aunque es difícil determinar que ocurre primero, si la alteración de los mecanismos homeostáticos o el proceso de desertificación. Los efectos se reflejan en la alteración de la intensidad de los procesos naturales, como son la erosión hídrica, erosión eólica, el contenido de materia orgánica, nutrimento en el suelo y problemas de contaminación al suelo como salinidad y sodicidad (De La Torre et. al., 1983). Aunque la inercia del proceso de desertificación en caso extremo es natural, el cambio en el uso del suelo debido al aumento poblacional, y por consecuencia al crecimiento de los asentamiento humanos y al aumento en la necesidad de producir alimentos, afecta en forma directa el cambio de vocación de la tierra debido a un patrón de producción extensivo de amplio uso en el sector primario en el país.

Los conceptos de cambio y serie de tiempo se encuentran relacionados. El cambio se refiere a la diferencia en las características superficiales entre dos fechas, mientras que serie de tiempo se relaciona al análisis del cambio ocurrido en una secuencia de imágenes. Para el análisis de cambio temporal se usan técnicas basadas

en las comparaciones apareadas y en tanto que el análisis de series de tiempo está basado en comparaciones múltiples (Eastman et. al., 1995).

2.9 Metodologías en cambio de uso.

Las técnicas de análisis de cambio en uso del suelo se agrupan en dos categorias: La primera categoría se refieren a comparaciones entre pares de imágenes, mientras que en la segunda se analizan las tendencias y/o anomalías de imágenes múltiples (series de tiempo). Dentro de las comparaciones de pares de imágenes las técnicas se dividen a su vez en técnicas desarrolladas para manejar la información cuantitativa en las imágenes y técnicas desarrolladas para imágenes cualitativas. Dentro del primer grupo se encuentra cuatro diferentes técnicas.

La primera se conoce como Diferenciación de imágenes y consiste básicamente en "restar" las imágenes del mismo lugar pero de diferente tiempo. Con la diferencia de las imágenes, asumiendo una distribución normal, se determina el umbral estadistico para distinguir los cambios de la variabilidad natural. Esta técnica analiza la diferencia absoluta entre las imágenes.

La segunda, se conoce como División de imágenes y se basa en la diferencia relativa entre las imágenes.

La tercer técnica se conoce como Diferencia de la regresión, en esta técnica se realiza una regresión entre las imágenes tomándose como variable independiente a la

más antigua y como dependiente a la imagen más reciente. La pendiente y el intercepto de la regresión expresan el ajuste requerido en la primer imagen para poder ser comparada con la segunda.

Por último, se encuentra el Análisis de cambio de vector el cual puede usarse en comparaciones apareadas o comparaciones múltiples. En este caso, la distancia Euclidiana representa la magnitud de cambio del vector. Para estimar la dirección de cambio se estima la arcotangente formada con las dos imágenes.

En el caso de datos cualitativos en pares de imágenes se maneja una matriz de error donde las frecuencias en la diagonal indican no cambio, mientras que las que se encuentran fuera de la diagonal indican cambio entre las imágenes. Para estimar la concordancia entre las imágenes, se manejan los estadísticos Chi-cuadrada, coeficiente de correlación de Cramer e índice de concordancia de Kappa (Eastman, et. al 1995; Eastman, 1997).

Cuando se realizan las comparaciones múltiples entre imágenes, la técnica mas importante se conoce como Análisis de Series de Tiempo. Se basa en un análisis de componentes principales estandarizados donde el resultado son imágenes no correlacionadas que expresan tendencias y periodicidad de las características superficiales. El análisis de la información se hace con las imágenes no correlacionadas y el primer componente indica el patrón típico del área. Otra técnica es el perfil temporal donde se examina el cambio de localidades específicas respecto a tiempo. Una técnica muy parecida a la usada cuando se comparan pares de imágenes es la diferencia de imágenes la cual consiste en producir una imagen característica a

través de tiempo y en hacer las comparaciones de las otras imágenes respecto a la imagen característica. La imagen típica puede ser el promedio de las imágenes involucradas o el primer componente de una análisis de componentes principales. Por último, está la técnica conocida como análisis de cambio vectorial. Es muy similar a la usada en comparaciones apareadas de imágenes con la diferencia que en este caso se determina la diferencia en series de imágenes. (Eastman et. al., 1995).

2.10 Trabajos relacionados en cambio en uso del suelo.

Price et. al., en 1992, al integrar los sensores remotos a un sistema de información geográfica para detectar cambios de vegetación en un ecosistema semiárido, lo hicieron realizando correcciones geométricas y radiométricas de las imágenes; para la restauración radiométrica usaron el método del histograma, mientras que para las correcciones geométricas, usaron la técnica de la corrección con la media y la desviación estándar. Los mapas de salida fueron rectificados a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), como emplearon imágenes MSS y TM estas se remuestrearon, para que todas tuvieran 30 X 30m en los pixeles. Posteriormente realizaron una clasificación no supervisada de las imágenes corregidas y no corregidas, empleando un algoritmo de agrupamiento no clasificado y un clasificador de mínima distancia a la media. La detección del cambio de vegetación lo hicieron con lo que hoy se conoce como Diferenciación de imágenes.

Treviño-Garza en 1992, con la finalidad de integrar la información de los sensores remotos y los sistemas de información geográfica estudió una parte de la sierra madre oriental localizada en el municipio de Iturbide N.L. Trabajó con dos series de fotografías aéreas tomadas en 1975 y 1986, y seis imágenes de los satélites Landsat y Spot. Las imágenes Landsat MSS fueron de 1973, 1980 y 1980, Landsat TM para 1988 y las imágenes Spot, fueron de 1986 y 1988. Además, generó los mapas digitales de los atributos terrestres del área. Las fotografías aéreas se fotointerpretaron y se digitalizaron los diferentes tipos de vegetación. A las imágenes de satélite se les hicieron correcciones radiométricas y geométricas para posteriormente clasificarlas con los métodos supervisado y un método híbrido que es una variación del método supervisado. Para estimar el cambio en uso de suelo, usó las imágenes de 1973, 1980 y 1986. Al comparar los resultados de las tres imágenes determinó que se incrementó el área dedicada a la agricultura y al pastizal, el matorral disminuyó en forma considerable mientras que los bosques disminuyeron muy poco. Consideró que las fechas de las tomas influyeron en sus resultados debido a las condiciones climáticas.

Fearnside en 1993, estimó el cambio en áreas forestales de la región Amazónica usando imágenes Landsat de 1978, 1988, 1989, 1990 y 1991. Determinó una velocidad de deforestación de 22,000 km^2 $año^{-1}$ para el periodo 1978-1988, en el período 1988-1989 fue de 19,000 km^2 $año^{-1}$, 14,000 km^2 $año^{-1}$ para el período 1989-1990 y de 11 000 km^2 $año^{-1}$ para el periodo 1990-1991. La reducción en la tasa de deforestación la atribuye a la recesión económica mas que a las políticas

gubernamentales. El número de propiedades en cada clase espectral explicó el 74% de la variación de la velocidad de deforestación.

Reynolds en 1993, estudió los cambios en uso del suelo para determinar la presión de los asentamientos urbanos sobre el área agrícola. El objetivo de ese estudio fue: estimar el cambio de uso del suelo en relación con el crecimiento poblacional. El estudio se realizó para el periodo 1973 - 1984. Para estimar las clases de uso de suelo, se uso fotografía aérea para el año 1973 mientras que para 1984 se emplearon imágenes de satélite. En ese trabajo se propuso un coeficiente de uso urbano el cual se precisó como la división entre las diferencias de superficie y población. Este coeficiente se calculó para todo el estado de Florida y se determinó que los valores más altos, del índice, se dieron en las regiones de alta concentración poblacional. Se usó el mismo índice con las proyecciones poblacionales censales para estimar la superficie para las clases de suelo en el futuro.

Correa en 1996, estudió el cambio del uso de suelo en Linares y Hualahuises N.L., usó dos imágenes del satélite Landsat de diferente fecha. En la primer fecha, 1973, fue una imagen MultiSpectral Scanner; para la segunda, 1994, la imagen fue Thematic Mapper. Las imágenes se corrigieron geométricamente y se clasificaron con el método de máxima verosimilitud. Además usó fotografía áerea y la información cartográfica editada por INEGI. Los cambios que observó fueron: la superficie dedicada a la agricultura de temporal disminuyó al igual que las áreas agricolas de riego. Esta disminución la atribuye al abandono de tierras y al cambio de las áreas agrícolas a

áreas de pastizal La disminución más severa se localizó en el área de matorrales debido a desmonte, sobrepastoreo y extracción selectiva de leña.

En otro trabajo (Treviño et. al., 1996), determinaron seis clases temáticas en imágenes Landsat MSS de 1973, 1980, 1986 y TM de 1988, 1992 y 1994. Realizaron una clasificación no supervisada basada en la técnica de "cluster", la agrupación la hicieron en las dos primeras imágenes generadas de un análisis de componentes principales. Para estimar el cambio en uso de suelo se basaron en matrices de error. Determinaron que en el periodo de 1973 a 1994, en el 60% de la superficie estudiada al menos una vez se modificó la cubierta vegetal. También observaron que el incremento de la superficie abierta a la agricultura se relacionó con la construcción de caminos. La superficie que no sufrió cambios en su cubierta vegetal (40% del total) se encuentra cubierta con matorral el cual sufre degradación debido a la extracción de leña y a que el pastoreo de ganado menor causa efectos irreversibles en la estructura y en la composición de especies vegetales.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Área de estudio.

El presente trabajo se realizó en la región citrícola de Nuevo León (ver Figura 5). Esta área se localiza al Noreste de México, en la parte central del estado de Nuevo León. Políticamente, el área de estudio, se encuentra dentro de los límites de los municipios de Montemorelos y General Terán. Las principales actividades económicas corresponden al sector primario, resaltando las agrícolas y en menor proporción las ganaderas.

Figura 5. Localización del área de estudio.

El área agrícola se dedica a la producción de cítricos y se encuentra en la provincia fisiográfica conocida como "Llanura Costera del Golfo Norte" Es conveniente señalar que el cultivo de cítricos se extiende por toda la provincia llegando a ser un cultivo importante hacia el sureste de esta provincia, incluyendo parte del estado de Tamaulipas

El clima que predomina es el semicálido subhumedo con lluvias en el verano. La temperatura media anual es mayor a 18 °C siendo el mes más caliente agosto y el más frío enero. Durante el invierno se presentan temperaturas inferiores a 0 °C afectando de manera considerable a la actividad agrícola. La precipitación oscila entre los 600 y 1000 mm anuales. La máxima lluvia se presenta en septiembre mientras que en el invierno se presentan los meses más secos.

La vegetación dominante es de los tipos matorral submontano y matorral espinoso tamaulipeco, ambos con elevados índices de densidad en su distribución. El suelo predominante es el vertisol que se caracterizan por su alto contenido de arcilla y que por lo general se presenta en climas templado y cálido. Son suelos poco susceptibles a los procesos erosivos. La unidad que predomina es el Vertisol crómico (color pardo a rojizo, formados a partir de rocas calizas) y el Vertisol pélico (color oscuro). Existen diferentes asociaciones con otras unidades dependiendo de las diversas topoformas que se encuentran dentro de la provincia fisiográfica (SPP, 1981).

3.2. Secuencia metodológica.

La secuencia de procedimientos que se utilizaron en el presente trabajo, para cubrir los objetivos propuestos, consistió en las siguientes tres etapas: en la primera se preparó la información digital incluyendo las correcciones pertinentes a las imágenes.

Además, se adquirió el material geográfico y las fotografías aéreas. En la segunda fase se evaluó el cambio de uso de suelo empleando la información cuantitativa de las imagenes de satélite, mediante comparaciones del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI). En la última etapa se realizó una clasificación cualitativa de las imágenes y se comparó el uso de las diferentes clases temáticas de uso de suelo incluyendo la información digital generada para 1970. En esta etapa la información se corroboro con la fotointerpretación de las fotografías aéreas y con información visual obtenida con los recorridos de campo.

3.2.1. Preparación de la información digital.

En esta primer fase se utilizó la información digital de las imágenes de satélite tomadas en 1986, 1988 y 1996. Estas imágenes se refirieron al datum NAD27, además se eliminaron de las siete bandas correspondientes a cada imagen los errores debidos a la localización en la que estaban registradas y se les asignó una resolución espacial de 28.5 m .

Dentro de esta misma etapa se digitalizaron las cartas de uso de suelo editadas por INEGI con la finalidad de tener información cualitativa del uso de suelo para 1970. La información digital de las cartas de uso de suelo también se relacionaron al datum NAD27 mediante correcciones geométricas y se les asignó la misma resolución espacial que a las imágenes de satélite.

Para la evaluación cuantitativa de los cambios de uso de suelo se empleo la información digital de las imágenes de satélite de 1986, 1988 y 1996. Para la evaluación cualitativa del uso del suelo se uso la información de las tres imágenes mencionadas anteriormente y además se analizó la información de los mapas digitalizados.

3.2.1.1. Imágenes de satélite utilizadas. Para este trabajo se utilizaron tres imágenes del satélite LANDSAT TM, correspondientes a la órbita 27/43 del sistema de referencia mundial (WRS, World Reference System). La fecha de adquisición de las imágenes, la plataforma y el tipo de sensor correspondiente a cada imagen se presenta en el Cuadro 2. Las imágenes respectivas a las fechas 1988 y 1986 fueron tomadas en la misma época del año (otoño), mientras que la correspondiente a 1986 fue tomada en diferente época (invierno). Esto hace que las diferencias debidas a la época del año no existan entre las imágenes de 1988 y 1996. Es de esperarse diferencias atribuibles a la época del año con la imagen de 1986. Sin embargo, se asume que estas son mínimas dado que son épocas muy similares entre sí.

Cuadro 2. Fecha de adquisición de las imágenes, satélite y sensor para las tres imágenes de satélite.

Fecha de la imagen	Satélite	Sensor
Enero 25, 1986	LANDSAT 5	TM 10
Noviembre 06, 1988	LANDSAT 5	TM 10
Noviembre 04, 1996	LANDSAT 5	TM 10

Estas imágenes presentaron diferencias en la resolución, orientación, proyección y localización geodésica. Solo para la imagen de 1996 se tuvo acceso a información descriptiva proporcionada con la imagen original. Por lo que, se tomo esta imagen como referencia para las otras dos fechas dado que se contaba con su información descriptiva y además es la más reciente. La esquina superior izquierda de estas imágenes cubre el área citrícola de Nuevo León. En el Cuadro 3, se presentan las principales características para la imagen de 1996.

La copia de las imágenes se adquirió en formato digital en un cassette de 8mm. Esta información se leyó en una unidad de lectura de la estación de trabajo SUN

SPARC™ 1040 del laboratorio de Sensores Remotos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En principio estas imágenes se tuvieron en el programa ERDAS IMAGINE™, Versión 8.0. Posteriormente se importaron al Sistema de Información Geográfica IDRISI™ versión 2.0 para Windows™, con el módulo File / import-export. Es conveniente señalar que todo el proceso restante se hizo en IDRISI™

Cuadro 3. Características de la imagen LANDSAT TM5, 027/43, Noviembre 04 de 1996.

CARACTERÍSTICA	VALOR y/o DESCRIPCIÓN
Instrumento.	TM10
Proyección	Space Oblique Mercator (SOM)
Elipsoide terrestre	Internacional de 1909
Semieje mayor	6378388.000000 m.
Semieje menor	6356911.946130 m.
Resolución del pixel	28.5m (un arco segundo)
Líneas	5965
Columnas	6967
Localización Geodésica:	
Superior izquierda	100° 04' 37.4646"W 025° 25' 55.2801"N
Superior derecha	098° 07' 50.8307"W 025° 08' 54.0869"N
Inferior izquierda	100° 19' 46.5110"W 023° 54' 54.5112"N
Inferior derecha	098° 24' 21.3481"W 023° 38' 05.5910"N
Centro	099° 14' 08.9882"W 024° 32' 08.9663"N

Como se mencionó anteriormente, también se utilizaron los mapas de Uso de Suelo editados por INEGI (Cuadro 4), para tener la información correspondiente al uso de suelo de 1970. Estos mapas se digitalizaron, en un digitalizador de cama plana,

generándose imágenes en formato BMP las cuales se importaron a IDRISI™, con el modulo File / import-export. Dadas la restricción de tamaño debida al digitalizador de cama plana se generaron 8 imágenes para cubrir una carta escala 1:50,000 Posteriormente se digitalizaron en pantalla los diferentes usos de suelo consignados en las cartas Estos vectores se refirieron al datum NAD27 y se generaron sus correspondientes imágenes raster Las imágenes tipo raster de cada categoría correspondiente a un tipo de uso de suelo se agruparon para tener en una sola imagen la información correspondiente a los diferentes tipos de suelo y que además cubriera el área de estudio.

En el Cuadro 4, se observa que existen diferencias entre las fechas en que se tomaron las fotografías aéreas para generar estos mapas.

Cuadro 4. Fecha de vuelo de las cartas Uso de Suelo de INEGI.

Identificación	Nombre	Fecha de vuelo
G14C37	General Terán	1975
G14C38	La Unión	1972
G14C47	Montemorelos	1971
G14C48	San José de las Flores	1971

3.2.1.2. Corrección geométrica de las imágenes. En primer termino, la imagen de 1996 se registró al *datum* NorteAméricano de 1927 (NAD27). El proceso para la obtención de los pares correspondientes a los puntos de control consistió en determinar la posición (X, Y), tanto en la imagen como en la carta, de los atributos reconocibles. Los puntos de control del terreno (GCP) se obtuvieron de las cartas

topográficas G14C37 (General Terán), G14C47 (Montemorelos), G14C57 (Hualahuises), G14C38 (La Unión), G14C48 (San José las Flores) y G14C58 (Linares). Estas son editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en escala 1:50,000.

De esta forma se registraron dos pares de valores de la referencia geográfica (x, y), uno referenciado al Datum NAD27 (cartas) y el otro sin referencia geográfica (imagen original). Posteriormente, con los pares de valores de los GCP se hizo un ajuste de tipo cuadrático para registrar las posiciones de las imágenes a los valores del *datum* Norte Americano de 1927 (NAD27), tomando como base el elipsoide de Clarke de 1866. Los modelos que describen el ajuste entre los pares de datos son de la forma siguiente:

$$X' = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 X^2 + \beta_4 Y^2 + \beta_5 XY \quad (6)$$

$$y' = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 X^2 + \beta_4 Y^2 + \beta_5 XY \quad (7)$$

Donde:

X' y Y' son el valor de la nueva posición.

β_0 es el intercepto

$\beta_1 X$ es el coeficiente de la antigua posición de X.

$\beta_2 Y$ es el coeficiente de la antigua posición de Y.

$\beta_3 X^2$ es el coeficiente para el cuadrado de la antigua posición de X.

$\beta_4 Y^2$ es el coeficiente para el cuadrado de la antigua posición de X.

$\beta_5 XY$ es el coeficiente para la interacción de la antigua posición X y Y.

El remuestreo de los nuevos valores se hizo con el método del Vecino cercano (Nearest neighbor). Es decir, el valor del atributo asignado a la nueva posición de la

imagen fue el valor más cercano. La proyección que se usó fue la Transversal de Mercator. El mismo proceso se hizo para las imágenes de 1986 y 1988.

Para la selección de los puntos de control, en todos los casos, se consideró como primer criterio, que el valor del Cuadrado Medio del Error Total (RMS) fuera menor a 15.49m. con lo cual se asegura un error menor o igual al 10%. El segundo criterio fue que cada punto de control tuviera un RMS menor o igual a 2/3 la resolución. En este caso la resolución fue de 28.5m por lo que el RMS individual debía ser menor o igual a 19.0 m.

En cada fecha las seis bandas se registraron y se ajustaron geométricamente con el procedimiento descrito anteriormente. Con esto se aseguró que la información de los atributos terrestres tuvieran la misma posición a través de tiempo con mínima distorsión.

3.2.2 Evaluación cuantitativa del uso de suelo.

Con la información generada en esta fase metodológica se pretendió cubrir el primer objetivo específico. Esta etapa consistió en evaluar las diferencias del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) entre pares de fechas y en hacer una comparación múltiple del conjunto de imágenes de NDVI de 1986, 1988 y 1996.

3.2.2.1. Cambios en el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI).

En primer termino se generaron las imágenes del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) usando la banda roja (banda 3) y la banda infrarroja (banda 4) para las tres imágenes de satélite.

Se corrieron dos procedimientos para estimar las diferencias en el NDVI. El primero consistió en estimar las diferencias de los valores entre los pares de fechas

seleccionadas. A la imagen de las diferencias se les estimó el promedio y la desviación estándar. Con estos valores y considerando una probabilidad del 99% se estimaron los valores de los umbrales mínimos y máximos para determinar las regiones con cambios positivos y cambios negativos. Los umbrales se estimaron considerando que el 99.0% de la densidad de los NDVI no presenta cambio. El 1.0% restante se consideró como cambio, 0.5% en cada lado de la curva de la distribución normal de las frecuencias de los valores de NDVI. El valor de los umbrales o densidad de NDVI con cambio se determinó como 2.570 veces la desviación estándar a partir del promedio de la imagen de las diferencias de NDVI entre pares de fechas.

Como el promedio de las diferencias estadísticamente fue diferente a cero se realizó un segundo procedimiento. Consistió en estimar, por regresión lineal entre los pares de imágenes, una nueva imagen para el tiempo i+1. Esta nueva imagen se comparó con la imagen del tiempo i. El procedimiento para estimar los cambios positivos y negativos fue idéntico al descrito en el párrafo anterior.

En los dos procedimientos descritos anteriormente se obtuvo una imagen donde se señalan las superficies con cambio negativo y otra donde se presentan los cambios positivos de NDVI. Finalmente se obtuvo una imagen donde se presentan las superficies que resultaron con el mismo cambio en los dos procedimientos.

3.2.2.2. Comparación múltiple del conjunto de imágenes de NDVI. Con las imágenes del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI), generadas a partir de las bandas roja e infrarroja, se hizo una comparación múltiple entre ellas. La comparación consistió en aplicar el procedimiento del análisis de componentes principales (PCA) al conjunto de las tres imágenes de NDVI de las fechas 1986, 1988 y 1996. En este caso se consideró conveniente dar el mismo peso a las tres variables por lo que se usaron los valores estandarizados para cada imagen de NDVI. La

interpretación de las imágenes correspondientes a los tres componentes generados se hizo en forma visual. La descripción de los resultados del PCA se hizo considerando que el primer componente conlleva la información relacionada a la variación típica del área y que el resto de los componentes se asocian al cambio en uso de suelo

3.2.3 Evaluación cualitativa en uso de suelo.

Para completar el segundo objetivo específico se hizo una evaluación cualitativa del cambio en uso de suelo. En primer termino se seleccionó la combinación de bandas para generar las imágenes de falso color compuesto (FCC) para basar en estas la interpretación digital de las imágenes de satélite.

La imagen de 1996 se clasificó usando un clasificador tipo rígido pero que en sus estimaciones al momento de haber alguna duda sobre la pertenencia de un área a una clase especifica considera a esta área como perteneciente a una clase nueva. La clasificación se realizó a partir de sitios de entrenamiento y empleando fotointerpretación de fotografías aéreas editadas por INEGI. Para determinar los cambios cualitativos en el uso de suelo se procedió a realizar una comparación booleana y mediante una matriz de errores se determinó las relaciones de cambio de uso de suelo entre las clases temáticas.

3.2.3.1. Selección de bandas para la composición de imágenes de falso color. Se descartó la banda con la información térmica (banda 6) debido a que se considero que la información de esta banda disminuiría la precisión de los resultados debido que las imágenes fueron tomadas en diferente época del año y por consecuencia esta banda registra diferentes valores de temperatura.

Con la finalidad de estimar la variabilidad y correlación entre las imágenes se hizo un Análisis de Componentes Principales, empleando los valores digitales (Dn) de

las seis bandas. Con esta información se determinó el grado de correlación entre las bandas y la imagen generada para cada componente y además fue posible resaltar los atributos del área, con las imágenes de los componentes. El procedimiento se hizo con los datos originales, sin estandarizar y calculando las covarianzas directamente.

También se calculó el índice de Factor óptimo (OIF) para cada posible combinación de tres bandas Para estimar el OIF se usaron los valores de la correlación y su desviación estándar, tal y como se mostró en la ecuación 4. La máxima variabilidad se asocia a los valores mas alto de OIF, por lo que esa combinación hace posible resaltar las características superficiales del terreno (Dwivedi and Rao, 1992).

3.2.3.2. Clasificación de las imágenes. Primero se establecieron los tipos de uso de suelo a considerar en la clasificación de las imágenes de las diferentes fechas. La definición del número y tipo de clases se hizo tomando en cuenta la información existente en los mapas de Uso de suelo, las fotografías aéreas, en las imágenes de falso color compuesto y con la información de los recorridos de campo. Estas clases de uso de suelo se presentan en el Cuadro 5.

Dada la heterogeneidad en los valores radiométricos de los campos de entrenamiento de la clase Agricultura, hubo necesidad de estimar la superficie ocupada por esta clase mediante la observación de las imágenes de falso color compuesto y fotointerpretando la información contenida en fotografías aéreas tomadas por INEGI el día 23 de julio de 1995. Las fotografias son las 13, 14 y 15 de la línea de vuelo 158 y las fotos 12, 13 y 14 de la línea de vuelo 160. La fotointerpretación se hizo con un par de lentes estereoscópicos. La información de los límites de estas clases se trasladó a la imagen de falso color compuesto donde el trazo original de los límites se corrigió.

Cuadro 5. Clases de Uso de Suelo definidas para este trabajo.

Clase	Descripción
Agricultura	Incluye las diversas combinaciones de cultivo anual cultivo perenne, sistema bajo riego y sistema de temporal
Áreas Urbanas	Manchas urbanas de Montemorelos y General Terán
Asociación Matorral - Pasto	Matorrales Asociados con Pastos.
Matorral espinoso	Predominan Huizache Chaparro Prieto y algo de mezquite.
Matorral Subinerme	Las plantas espinosas no predominan en este grupo
Mezquital	Asociaciones vegetales dominadas por mezquite.
Pastizal	Predomina el pasto en asociación con otra vegetación.
Suelo desnudo	Sin vegetación en áreas de cultivo y en áreas sin desmontar y áreas con erosión
Vegetación de Galería	Vegetación asociada a los ríos.

Para determinar la clase Áreas Urbanas, localizadas dentro del área de estudio, se digitalizaron los polígonos correspondientes a las ciudades de Montemorelos y General Terán. Estos polígonos se digitalizaron desde las imágenes de falso color compuesto (FCC) de cada fecha excepto en la primera fecha que se obtuvieron de los archivos digitales generados con la información de los mapas editados por INEGI. Los polígonos se convirtieron a imagen raster para determinar el área ocupada por cada ciudad y así analizar el comportamiento de esta superficie a través de tiempo.

En todas las clases se localizaron e identificaron, en las imágenes, áreas de entrenamiento características y representativas de cada clase temática establecida con anterioridad. Con la información de las áreas de entrenamiento se generaron las firmas espectrales correspondientes a cada clase temática. Estas se analizaron para determinar la congruencia entre las áreas de entrenamiento y las clases temáticas seleccionadas y la homogeneidad de las áreas de entrenamiento.

Dadas las características tan especiales en el uso de suelo y la gran diversidad de sistemas de producción y diferentes tipos de cubiertas vegetales, se utilizó un

procedimiento de clasificación del tipo rígido con comportamiento flexible. Este se basa en clasificar las imágenes a partir de la firma espectral de las clases determinadas previamente. Para asignar el área a una determinada clase evalua el grado de incertidumbre y en su caso asigna esta área a una nueva clase temática. Este método de clasificación de imágenes digitales se conoce como Conjunto Básico de Máxima Probabilidad (CBMP) (Eastman, 1997). Como la imagen generada por el algoritmo CBMP contiene información respecto a las áreas correspondientes a cada clase e información de las superficies clasificadas en las nuevas clases en función de la incertidumbre en la clasificación, se procedió a separar esta información. La imagen definitiva de cambio en uso de suelo se considero solo la superficie clasificada con alta certidumbre, descartándose el resto de la superficie.

3.2.3.3. Estimación del cambio de uso de suelo. Una vez clasificadas las imágenes sé procedió a retirar en las imágenes aquellas áreas que con el método de clasificación utilizado no fueron asignadas a las determinadas con anterioridad a la clasificación.

Posteriormente se inició la comparación de la información cualitativa obtenida de la clasificación de las imágenes mediante comparaciones booleanas de unos y ceros. Estas comparaciones se hicieron para cada posible combinación de los grupos temáticos en pares de fechas comparadas. Una vez generado el mapa con el comando CrossTab de IDRISI™ se analizó el cuadro de doble entrada donde se consignaron las superficies para cada posible combinación de cambio o no cambio en el uso del suelo. Donde las columnas corresponderá a la información de 1970 y en hileras a 1996 y en dicha salida de cuadro de doble entrada la diagonal principal corresponde a la superficie que no tuvo cambio entre las dos fechas, la información fuera de esta diagonal se refieren a superficie que cambió entre 1970 y 1996.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Preparación de la información digital.

En las siguientes tres secciones se presenta la información relacionada a los ajustes geométricos, los recortes y los parámetros estadísticos estimados para seis de las siete bandas correspondientes a las imágenes de 1986, 1988 y 1996.

4.1.1. Corrección geométrica de las imágenes.

En los Cuadros 29, 31 y 33 del Apéndice se muestran los pares de los puntos de control de las imágenes correspondientes a 1986, 1988 y 1996, respectivamente. También se presenta el valor estimado para la raíz del cuadrado medio del error de cada par de puntos de control.

En el Cuadro 6 se concentró la información respecto al número de pares de puntos de control medidos, el número de pares de control aceptados y el valor obtenido de la raíz del cuadrado medio del error del conjunto total de los pares de puntos de control aceptados en la corrección geométrica de las imágenes (RMS Total) de 1986, 1988 y 1996.

El valor de la raíz del cuadrado medio del error permitido, fue sobre la base de la escala de los mapas de uso de suelo, utilizados para estimar los pares de puntos de control. Estos mapas tienen la escala 1:50,000 y de acuerdo al estándar establecido el

error en campo no debe ser mayor a 1/50 de pulgada (USGS, 1999). Es decir, menor a 25.8 m, mientras que el error permitido debe ser menor a un 10% de probabilidad de ocurrencia que en nuestro caso fue 15.5 m.

Cuadro 6. Pares de puntos de control y cuadrado medio del error total (RMS total), para el ajuste cuadrático de las imágenes de diferentes fechas.

Fecha	Pares de Control estimados	Pares de Control seleccionados	RMS total (m)
1986	45	37	1.38
1988	54	49	2.20
1996	63	24	10.51

Se observa que el número de pares de control satisface los valores mínimos (12) para un ajuste de tipo cuadrático y que la raíz del cuadrado medio del error del conjunto de datos para las fechas 1986, 1988 y 1996 fue menor al RMS permitido (15.5 m).

Además, se cumplió con el criterio de que para cada par de puntos de control, el RMS individual fuera menor a los 19.0 m o 2/3 de la resolución de las imágenes.

Los valores de los coeficientes de las ecuaciones de ajuste mediante los cuales se corrigieron los errores geométricos de las imágenes se presentan en los Cuadros 30, 32 y 34 del Apéndice. Con estos estimadores se determinó la posición definitiva de las imágenes.

Una vez terminado el procedimiento de ajuste geométrico, cada banda de las diferentes fechas quedó con una resolución de 28.5 m y registrada al datum NAD27. El área de trabajo se limitó, recortando las imágenes a las siguientes coordenadas en la

proyección Universal Transversa de Mercator (UTM): 411,568.5 W, 443,317.5 W, 2'782,256.0 N y 2'803,431.5 N. Resultando las imágenes, de cada banda, con 1114 columnas y 743 hileras.

4.1.2. Descripción estadística de las imágenes.

En el Cuadro 7 se presenta el promedio y la desviación estándar de los Valores Digitales (Dn) ó Valores radiométricos estimado para el área de estudio. El valor se calculó para cada banda en las diferentes fechas de las imágenes de satélite. En este Cuadro se observa, en términos generales, una disminución del Valor Digital al pasar de la banda 1 a la banda 2 y un ligero aumento en la banda 3 respecto al valor de la banda 2. Llegando a un máximo en los valores de la banda 5 muy similar al valor de la banda 1, para posteriormente disminuir en la banda 7.

Cuadro 7. Promedio y desviación estándar de los valores digitales (Dn) de cada banda, para las diferentes fechas.

Banda	1986		1988		1996	
	Promedio	D. estándar	Promedio	D. estándar	Promedio	D. estándar
1	83.6	6.85	79.8	10.78	60.0	6.74
2	32.4	4.55	32.2	6.24	25.0	4.68
3	39.1	8.35	37.1	11.20	25.0	7.61
4	43.5	7.91	59.9	11.29	57.3	11.85
5	83.3	19.21	87.3	22.94	71.8	18 78
7	41.7	13.47	42.4	16.60	29.9	13.04

Se puede apreciar que la desviación estándar más alta se presenta en la banda del infrarrojo cercano o banda 5

4.1.3. Correlación entre las bandas.

En los Cuadros 8, 9 y 10 se encuentran los valores de los coeficientes de correlación lineal entre las seis bandas seleccionadas para las imágenes de 1986, 1988 y 1996 respectivamente. Se tomó como criterio que aquellos valores del coeficiente de correlación menores a 0.75 denotan baja correlación entre las bandas. Por lo que, sólo la banda 4 (infrarrojo cercano) no tiene correlación con el resto de las bandas en las tres imágenes.

De la información contenida en los Cuadros 8, 9 y 10 se infiere que el resto de las bandas (1, 2, 3, 5, y 7), por el hecho de estar correlacionadas, de alguna u otra forma representan la misma información. Sin que se pueda esperar desde el punto de vista estadístico, grandes diferencias en la información aportada por las bandas.

4.2 Evaluación cuantitativa del uso de suelo.

En las dos secciones siguientes se presenta la información relativa a la evaluación de cambio del uso de suelo empleando información cuantitativa. Esta información se basó en el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI). Se emplearon las técnicas de diferencias entre imágenes y el análisis de componentes principales.

Cuadro 8. Matriz de correlación entre las bandas de la imagen 1986.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Banda 1	1.000					
Banda 2	0.872	1.000				
Banda 3	0.867	0.961	1.000			
Banda 4	0.384	0.513	0.425	1.000		
Banda 5	0.757	0.799	0.874	0.316	1.000	
Banda 7	0.751	0.773	0.850	0 168	0.959	1.000

Cuadro 9. Matriz de correlación entre las bandas de la imagen 1988.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Banda 1	1.000					
Banda 2	0.955	1.000				
Banda 3	0.948	0.964	1.000			
Banda 4	0.053	0.162	0.029	1.000		
Banda 5	0.751	0.780	0.855	-0.021	1.000	
Banda 7	0.787	0.785	0.872	-0.187	0.950	1.000

Cuadro 10. Matriz de correlación entre las bandas de la imagen 1996.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Banda 1	1.000					
Banda 2	0.954	1.000				
Banda 3	0.953	0.960	1.000			
Banda 4	-0.052	0.090	-0.097	1.000		
Banda 5	0.806	0.822	0 866	-0.015	1.000	
Banda 7	0.824	0.800	0.887	-0.025	0.951	1 000

4.2.1 Diferencia en el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI).

En la Figura 6 se presentan las imágenes obtenidas del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI). En las imágenes de las tres fechas y dentro de cada imagen, se aprecian los diferentes tipos de vegetación que se encuentran en el área estudiada.

Dentro de las tres imágenes las diferencias en las coloraciones se asocian a las diferencias en reflectividad de las bandas roja e infrarroja. Valores altos asociados a las diferentes tonalidades de verdes corresponden a superficies de vegetación sana y de alta densidad. Mientras que, los valores bajos, amarillos y cafés, incluyen áreas de baja densidad de vegetación y suelos desnudos (Chuvieco, 1996).

Las imágenes de NDVI para 1988 y 1996 tuvieron valores promedios muy similares entre sí (1.38 y 1.36 respectivamente), pero diferentes a la fecha de 1986 (0.054). Esto significa que la diferencia en fechas de la toma influyó para que los valores de NDVI sean diferentes.

En las tres imágenes se observan los trazos geométricos de las superficies dedicadas a la agricultura. En las imágenes de 1988 y 1996, sobresalen las áreas urbanas de los dos centros de población más importantes.

En las tres fechas se observa de color café la presa "La Luz". Y resaltan en tonalidades claras hacia la parte inferior derecha de las imágenes, las diminuciones en la cubierta vegetal asociadas a procesos de erosión.

Los parámetros estadísticos de las diferencias en el valor del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), entre imágenes de diferentes fechas, se despliegan en el Cuadro 11, en donde se observa que los promedios de las diferencias entre los pares de fechas, al compararse estadísticamente fueron diferentes a cero. Esto significa que existe un cambio global de la imagen, en los valores de

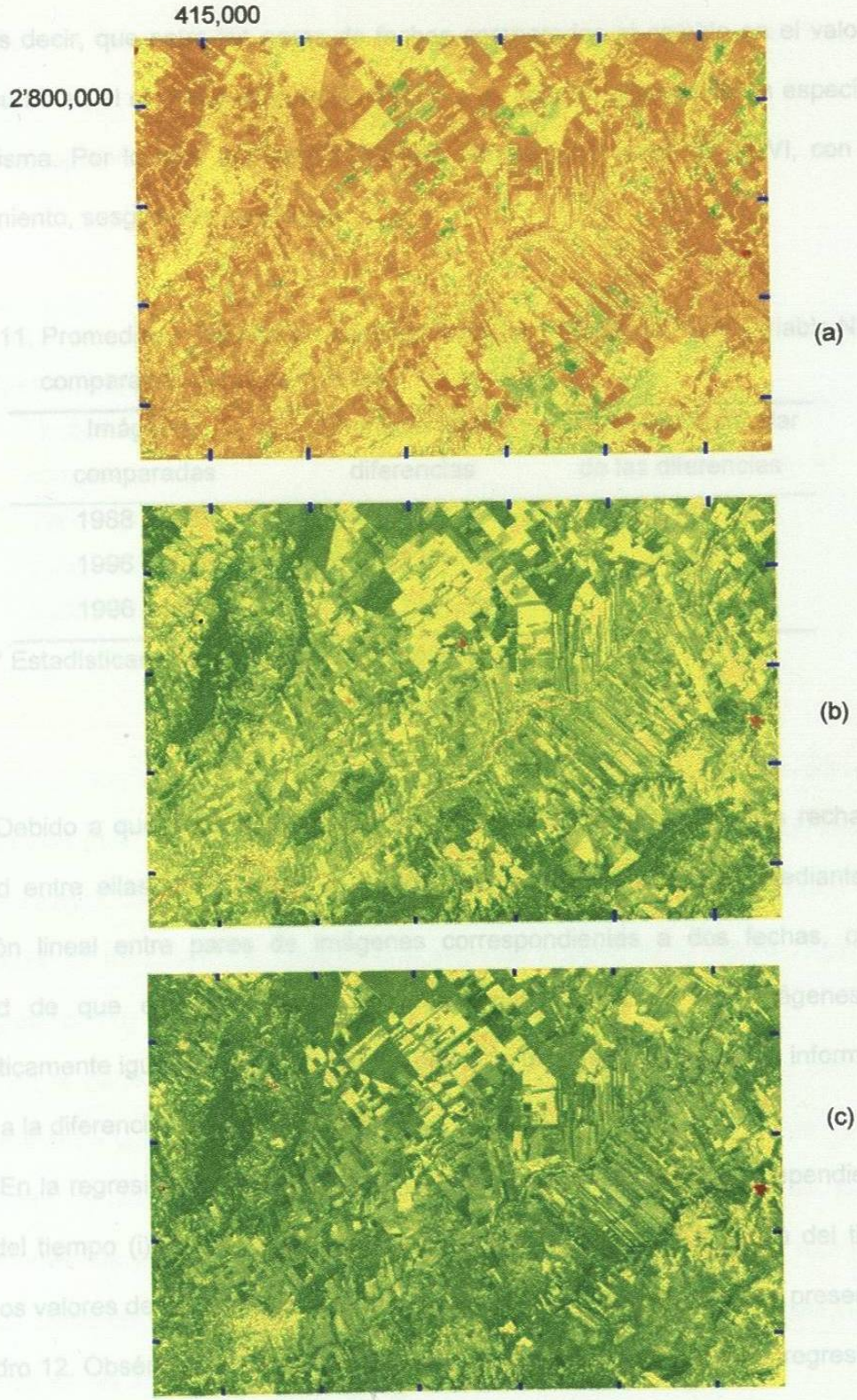


Figura 6. Imagen del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), para 1986 (a), 1988 (b) y 1996 (c) respectivamente.

145342

NDVI. Es decir, que entre los pares de fechas comparados el cambio en el valor del NDVI ocurrió en el conjunto total de la imagen y no solo en algunas áreas específicas de la misma. Por lo que, una estimación del cambio en el valor de NDVI, con este procedimiento, sesgará los resultados.

Cuadro 11. Promedio y Desviación estándar para las diferencias de la variable NDVI comparando pares de fechas.

Imágenes comparadas	Promedio de las diferencias	Desviación Estándar de las diferencias
1988 - 1986	0.189*	0.140
1996 - 1986	0.331*	0.160
1996 - 1988	0.141*	0.160

* Estadísticamente se rechazó la hipótesis $\mu = 0$

Debido a que la prueba estadística de la diferencia de las medias rechazó la igualdad entre ellas, se procedió a realizar ajustes en las imágenes mediante una regresión lineal entre pares de imágenes correspondientes a dos fechas, con la finalidad de que el promedio de las diferencias totales de las imágenes sea estadísticamente igual a cero. Con esto se descarta un posible sesgo en la información debido a la diferencia total de las imágenes.

En la regresión lineal entre fechas se consideró como variable Independiente a fecha del tiempo (i), mientras que como variable dependiente a la fecha del tiempo (i+1). Los valores de los estimadores de la regresión entre las imágenes se presenta en el Cuadro 12. Obsérvese como el Coeficiente de Determinación (R^2) de la regresión de las imágenes correspondientes a las comparaciones entre fechas tienen valores relativamente altos.

Con los valores del intercepto y de la pendiente se generó una nueva imagen. Esta nueva imagen fue considerada la imagen esperada en el tiempo (i+1) Es decir, tal y como se esperaría la imagen sin que existiera un cambio total del área.

Cuadro 12. Valores del Intercepto, Pendiente y Coeficiente de Determinación para la regresión lineal entre imágenes de NDVI.

Imágenes comparadas	Intercepto	Pendiente	Coef de Determinación R^2
1988 - 1986	0.197959	0.855805	0.550
1996 – 1986	0.362923	0.460053	0.312
1996 - 1988	0.270318	0.482161	0.510

En la Figura 7 se observa la imagen del Índice de vegetación de diferencias normalizadas para 1996, la imagen corregida por regresión y las diferencias absolutas entre la imagen corregida por regresión y la imagen del Índice de vegetación de las diferencias normalizadas. Se observa a la segunda imagen de la Figura 7, generada por regresión, muy similar a la imagen del NDVI de 1986.

En la parte inferior de la Figura 7 se presenta la imagen de las diferencias absolutas entre la imagen corregida por regresión y la imagen del NDVI de 1986. En tonalidades de blanco están los valores más altos de la diferencia absoluta, mientras que en amarillos y verdes son diferencias negativas y las áreas de color rojo tienden ser más cercanas a cero, lo cual quiere decir que los cambios de uso de suelo se deben dar en las áreas de los extremos negativos y positivos.

En el Cuadro 13, se presenta la información correspondiente a la diferencia entre las imágenes del tiempo i y la nueva imagen generada por regresión para el

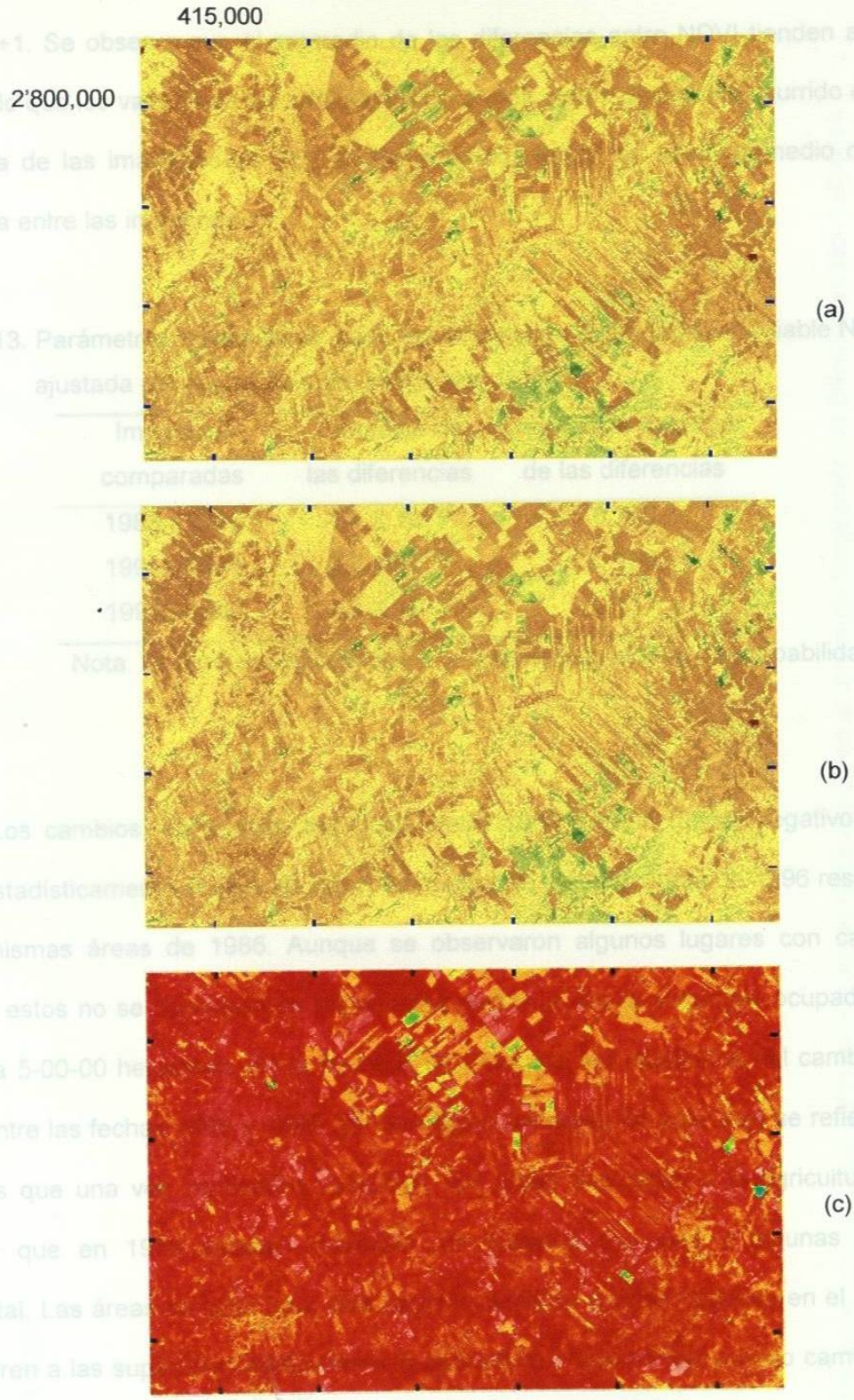


Figura 7. Imagen del Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) para 1986 (a), la imagen corregida por regresión (b) y la imagen de las diferencias absolutas (c) entre la imagen corregida y el índice de vegetación de diferencias normalizadas.

tiempo i+1 Se observa que el promedio de las diferencias entre NDVI tienden a ser cero por lo que los valores de los umbrales para decidir el tipo de cambio ocurrido en la diferencia de las imágenes es muy similar a ambos lados del valor promedio de la diferencia entre las imágenes.

Cuadro 13. Parámetros estadísticos para las diferencias entre fechas, variable NDVI ajustada por regresión entre imágenes.

Imágenes comparadas	Promedio de las diferencias	Desviación Estándar de las diferencias
1988 - 1986	4.4×10^{-07}	0.140
1996 - 1986	9.3×10^{08}	0.150
1996 - 1988	1.9×10^{-07}	0.137

Nota. La hipótesis estadística $\mu = 0$ se acepto al 99% de probabilidad

Los cambios, en el valor del NDVI, entre 1986 y 1996 fueron negativos. Es decir, estadísticamente el valor de NDVI fue menor en algunas áreas de 1996 respecto a las mismas áreas de 1986. Aunque se observaron algunos lugares con cambio positivo estos no se consideraron importantes debido a que la superficie ocupada era menor a 5-00-00 hectáreas. En la figura 8, se muestran los resultados del cambio en NDVI entre las fechas 1986 y 1996. En esta figura las áreas de color rojo se refieren a cambios que una vez verificados coinciden con áreas dedicadas a la agricultura en 1996 y que en 1970 estaban cubiertas por Matorral espinoso y algunas áreas Mezquital. Las áreas de color azul, que también denotan cambio negativo en el NDVI, se refieren a las superficies dedicadas a la agricultura y que no han sufrido cambio en su uso desde 1970, pero que cuando se tomó la imagen de 1996 el suelo se encontraba sin vegetación. Por esto en el análisis se detectan con disminución en el

Figura 8. Cambio en el uso del suelo estimado mediante la diferencia en el Indice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI).

NDVI, por lo tanto se consideran cambio negativo. La superficie en la que disminuyó el valor del NDVI de 1986 a 1996 se estimó en 434.3 ha, con este procedimiento

4.2.2. Comparación múltiple del conjunto de imágenes de NDVI.

Como se explicó en la sección de Materiales y Métodos la comparación múltiple de las imágenes del Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) se realizó empleando la técnica de Análisis de Componentes Principales.

En el Cuadro 14 se presenta la varianza asociada a cada componente, se observa que el componente 1 explica el 62.70% de la varianza del conjunto de las tres imágenes de NDVI. Mientras que el componente 2 y el componente 3 explican el 23.42 y el 13.88% de esa misma varianza.

Cuadro 14. Varianza y varianza acumulada asociada a cada componente, obtenida del análisis de componentes principales de las imágenes de NDVI de 1986, 1988 y 1996.

	Varianza %	Varianza acumulada %
Componente 1	62.70	62.70
Componente 2	23.42	86.12
Componente 3	13.88	100.00

Porque el componente 1 explica más la varianza del conjunto de la información original de las bandas, este representa el patrón típico de vegetación contenida en las tres imágenes de NDVI. Por lo que, el segundo componente será el primer componente de cambio ya que este es ortogonal al primero y es el segundo en términos de varianza explicada. Por consecuencia el tercer componente representa el segundo componente

asociado al cambio de vegetación en el área de estudio y así sucesivamente (Eastman, 1995).

En la Figura 9 se presentan las imágenes correspondientes a los componentes 1, 2 y 3. En la parte superior de la imagen, el componente 1, representa el patrón tipico de la vegetación del área. Se puede observar las manchas color café correspondientes a las áreas urbanas, en colores verdes se encuentran las áreas de vegetación nativa y en tonalidades café-amarillo las áreas correspondientes a superficies de baja densidad en la cubierta vegetal como lo son las áreas dedicadas a la agricultura. En la misma imagen en tonalidades de rojo se observa la presa "La Luz".

En la segunda imagen de la misma figura se presenta el segundo componente. Este componente, como se explico en párrafos anteriores, representa la primera imagen de cambio en el área de estudio. Se miran áreas en tonalidades verdes que contrastan con el resto de la imagen las cuales reflejan los cambios en uso de suelo del conjunto total de las tres imágenes de NDVI.

En el tercer componente se distingue muy bien el trazo del río Pilón, este denota un cambio en el conjunto de las imágenes de NDVI atribuible, como puede observarse en la figura 6, a la información contenida en la imagen de NDVI de 1988.

Para nuestro estudio es de interés estudiar el segundo componente el cual resalta los cambios en uso de suelo en el área de estudio. Para esto se generó la imagen de la Figura 10. En esa figura en color rojo se resaltan las áreas que presentaron cambio según el análisis de componentes principales. Con este procedimiento la superficie que se estimó con disminución en el valor d NDVI fue de 430.0 muy similar a las 434.3 ha estimadas con el procedimiento anteriormente descrito.

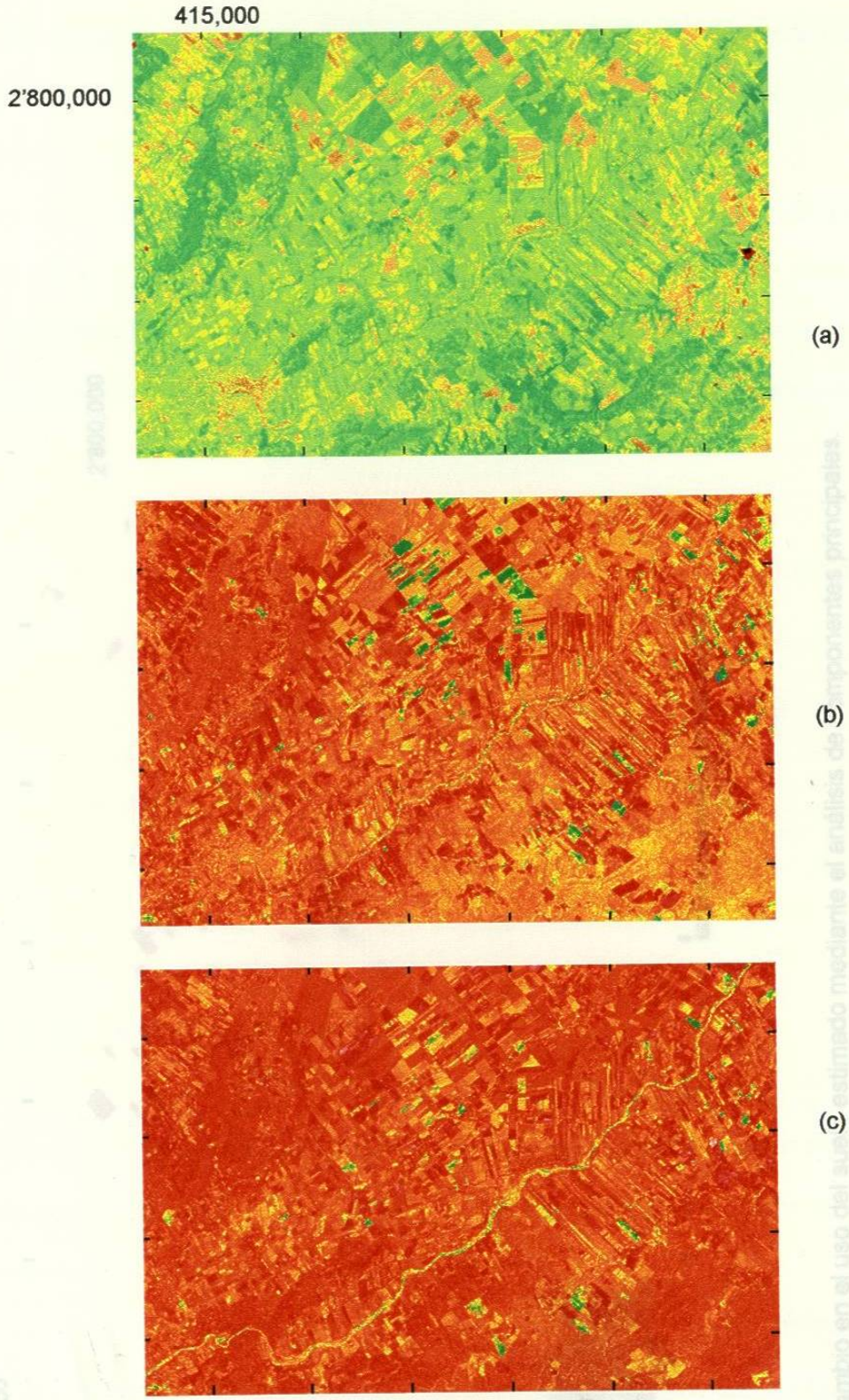


Figura 9. Componente 1(a), 2 (b) y 3 (c), generados a partir de las imágenes de NDVI para 1986, 1988 y 1996. Utilizando el análisis de componentes principales para determinar los cambios en el conjunto de NDVI.

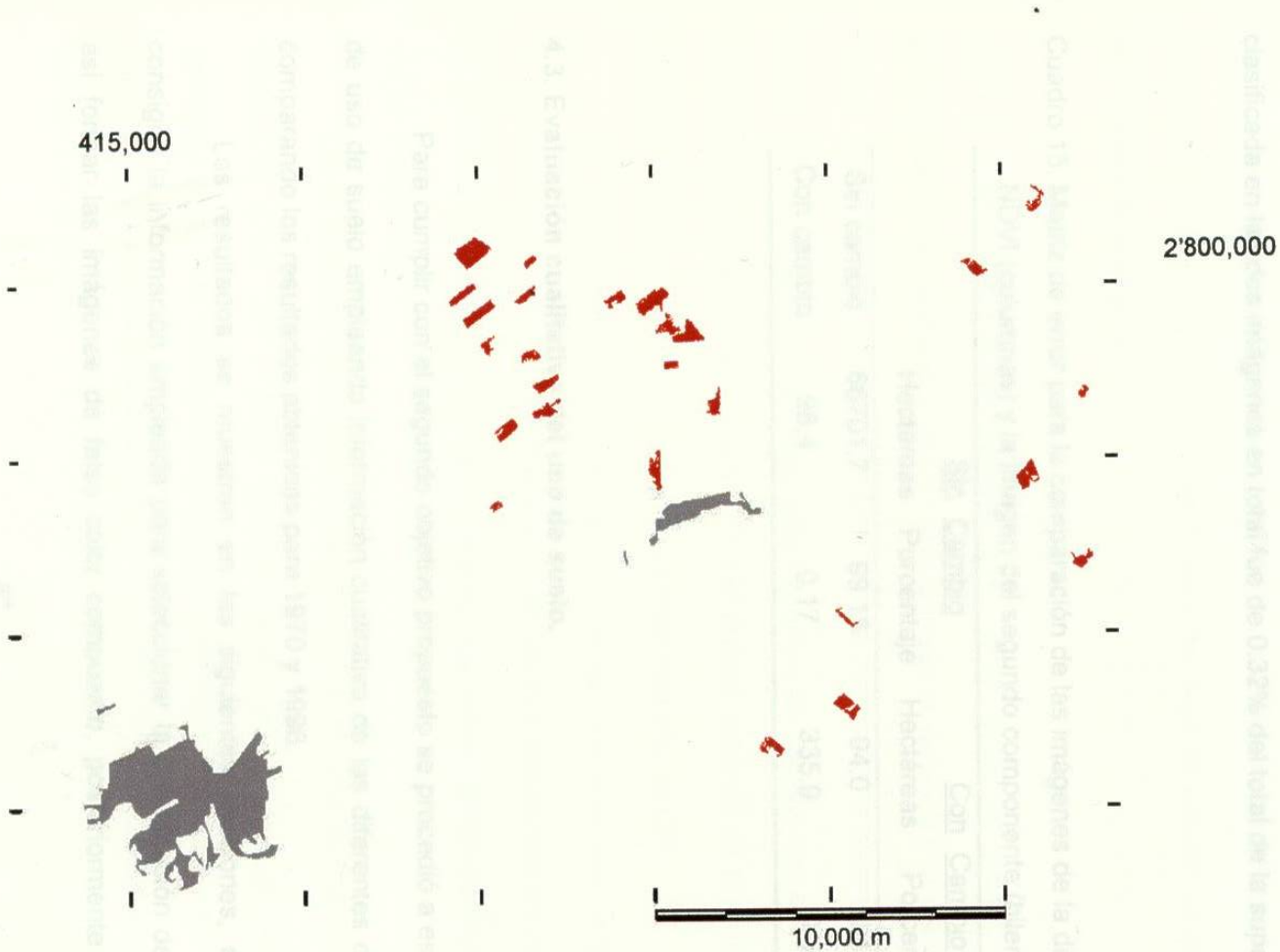


Figura 10. Cambio en el uso del suelo estimado mediante el análisis de componentes principales.