

**Detección de cambios de coberturas de uso del suelo a través de imágenes satelitales
Landsat TM en la IX región, Chile.**

Juan Edgardo Medina Mena

Ingeniero Forestal

Universidad Católica de Temuco

edgardo_uct@latinmail.com

RESUMEN

La importancia de actualizar información en forma periódica, eficaz y eficiente, implica la evaluación de la información satelital probada en otros países, destacándose el análisis multitemporal de imágenes satelitales para la detección de cambios de la cobertura de uso del suelo.

En este trabajo se presenta la evaluación cuantitativa de las siguientes técnicas de detección de cambios a través de imágenes satelitales; Post-clasificación utilizando las bandas crudas, Post-clasificación a los NDVI generados en ambos periodos, Post-clasificación aplicando un Análisis de Componentes Principales a las bandas de cada periodo, Imagen de diferencias al NDVI de cada periodo y un Análisis de Componentes Principales (ACP).

Los resultados de este estudio señalan a la imagen de diferencias y al ACP con una exactitud global de 86.90 y 90.47, y un índice Kappa de 0.60 y 0.72 respectivamente, por lo que se destacan como las técnicas que mejor detectaron el cambio de uso de suelo.

ABSTRACT

The importance of satellite images for updating landcover information is now obvious. With the objective of monitoring change detection in landcover, one of the key-method proved to be the multi-temporal analysis of satellite images.

This work aims at quantitatively assessing the accuracy of techniques, which are commonly used for detecting landcover changes through the use of satellite images LANDSAT Thematic Mapper (TM). The techniques evaluated are: post-classification using raw imagery, post-classification of NDVI generated in both periods, post-classification using a Principal Components Analysis (PCA) for each period's bands, image differencing at the NDVI of each period and finally PCA.

In this study, the image differencing and PCA techniques, which respectively came out with a global accuracy of 86.90 % and 90.47 %, and with Kappa values of 0.60 and 0.72, have been proved to be the best methods for landcover changes detection.

INTRODUCCIÓN

La importancia de actualizar información en forma periódica, eficaz y eficiente, implica la evaluación de la aplicación de tecnología satelital probada en otros países, entre los que destacan el análisis multitemporal de imágenes satelitales para la detección de cambios de uso del suelo.

El presente trabajo evalúa la efectividad de distintas metodologías de detección de cambios, como son; Post-clasificación utilizando las bandas crudas, Post-clasificación a los NDVI generados en ambos periodos, Post-clasificación aplicando un Análisis de Componentes Principales a las bandas de cada periodo, Imagen de diferencias al NDVI de cada periodo y un Análisis de Componentes Principales (ACP) en las fechas involucradas en el estudio.

El análisis digital de imágenes satelitales multitemporales Landsat TM para una zona de la IX región, permitirá determinar los procedimientos de mejoramiento espectral que entreguen una eficaz detección del cambio espectral de distintas coberturas del suelo.

Actualmente se desconocen los mejoramientos espectrales y métodos de detección de cambios más eficaces en el análisis del cambio del uso del suelo con imágenes satelitales multitemporales de Chile, así como también las rutinas computacionales que se requieran para ello, toda vez que estos elementos son fundamentales para cualquier aplicación de las imágenes satelitales, y por lo tanto, constituyen aspectos de suma importancia y que deben abordarse con precisión.

Los resultados obtenidos en este estudio permitirán orientar respecto a la aplicabilidad de la imagen satelital Landsat TM en la evaluación multitemporal de los recursos forestales, y a la vez definir algunas estrategias de mejoramiento de los resultados de la clasificación

digital, determinado el alcance y aporte de esta herramienta en la planificación y toma de decisiones que permitan un manejo sustentable del recurso.

ANTECEDENTES

Aplicación de la imagen satelital como herramienta de Percepción Remota.

Una de las utilidades más importante que entrega la información de las imágenes satelitales es la capacidad de monitorear los cambios de uso del suelo en el tiempo, ya que es posible la obtención de bases de datos digitales de cambio en donde las dimensiones espaciales y temporales de las coberturas de uso de suelo puedan ser detectadas y evaluadas (CIESIN, 1999).

La derivación de la información de cambio obtenida a través de la información satelital consiste, en términos generales, en la georeferenciación de dos o más imágenes de la misma área adquiridas en dos puntos distintos en el tiempo; el ajuste de las propiedades radiométricas para normalizar la información obtenida bajo distintas condiciones atmosféricas y de observación; la implementación de una técnica de detección de cambio; y la generación de productos que permitan efectivamente transmitir los cambios de cobertura de suelo en una imagen, un gráfico o en bases estadísticas (CIESIN, 1999).

Beneficios de la utilización de observaciones remotas.

Algunos de los beneficios obtenidos al utilizar observaciones remotas son los siguientes:

- Monitoreo de grandes extensiones en forma rápida, precisa, económica y homogénea.
- Proporciona información de regiones remotas o áreas de difícil acceso.

- En áreas en donde la cobertura de nubes es persistente, los datos de radar proporcionan información consistente del recurso bosque.
- Incremento de la objetividad, velocidad de repetición y eficiencia en sus aplicaciones.
- Formato digital que permite la interpretación automática de la información.

Requerimientos de información de Recursos Naturales basados en técnicas de percepción remota para la planificación territorial.

En este contexto se pueden señalar los siguientes requerimientos de información:

- Actualización y perfeccionamiento de los mapas de cobertura de suelos como información fundamental para la protección medioambiental.
- La producción y actualización de inventarios de distintos tipos de bosques de modo que sea posible la aplicación de un adecuado manejo del recurso.
- El monitoreo de bosques para la detección cambios en su estructura, composición, ataque de insectos y enfermedades.
- Monitoreo de la regeneración de los bosques después de un incendio y el daño ocasionado, incluyendo el análisis del cambio de la distribución espacial de las especies de árboles y el riesgo de incendios forestales.
- Monitoreo de los procesos de deforestación.
- Análisis de ríos, lagos o cambios en los volúmenes de reservas de agua.
- La detección e interpretación de los procesos de evolución.

Algunos Principios y Fundamentos de Teledetección.

La Teledetección (Remote Sensing) se define como la ciencia y arte de obtención de información acerca de un objeto, área, o fenómeno a través del análisis de información adquirida por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área, o fenómeno bajo investigación (Lillesand, 1994).

Teledetección espacial es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia (Chuvienco, 1996).

Un sensor remoto se define como un instrumento cuya tecnología permite la obtención de información de objetos sin estar físicamente en contacto con él. Estos instrumentos se conocen en conjunto como Sensores Remotos incluyendo aparatos como la cámara fotográfica, sistemas scanners y de radar (Avery, 1992).

En general los procesos y elementos involucrados en la teledetección electromagnética de los recursos terrestres se pueden separar en dos procesos básicos; la **adquisición de información** y el **análisis de la información**. Los elementos del proceso de **adquisición de información** son; la fuente de energía, la propagación de la energía a través de la atmósfera, la interacción de la energía con las características de la superficie terrestre, la retransmisión de la energía a través de la atmósfera, el sensor del aeroplano o plataforma espacial, y como resultado, el sensor genera información en formato digital y/o gráfico. El proceso de **análisis de los datos** involucra la aplicación de varios medios de interpretación para compilarla en forma de tablas o como archivos computacionales que pueden ser unidos a un SIG. Por último esta información es utilizada en la toma de decisiones de distintos usuarios (Lillesand, 1994).

Cualquier sistema de teledetección consta de tres elementos fundamentales; el sensor, el objeto observado y un flujo energético que permita poner a ambos en relación. Este flujo de energía puede proceder del objeto por reflexión de la luz solar, por algún tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. De este modo se derivan las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (Chuvieco, 1996).

AREA DE ESTUDIO Y MATERIAL SATELITAL.

El área de estudio utilizada en este trabajo se encuentra al noroeste de la ciudad de Traiguén, IX región, con una superficie de 41.429 ha. Figura N°1. Esta zona se caracteriza por un alto dinamismo del sector forestal presentando notorios cambios en su cobertura del suelo, razón por la cual fue seleccionada para este estudio.

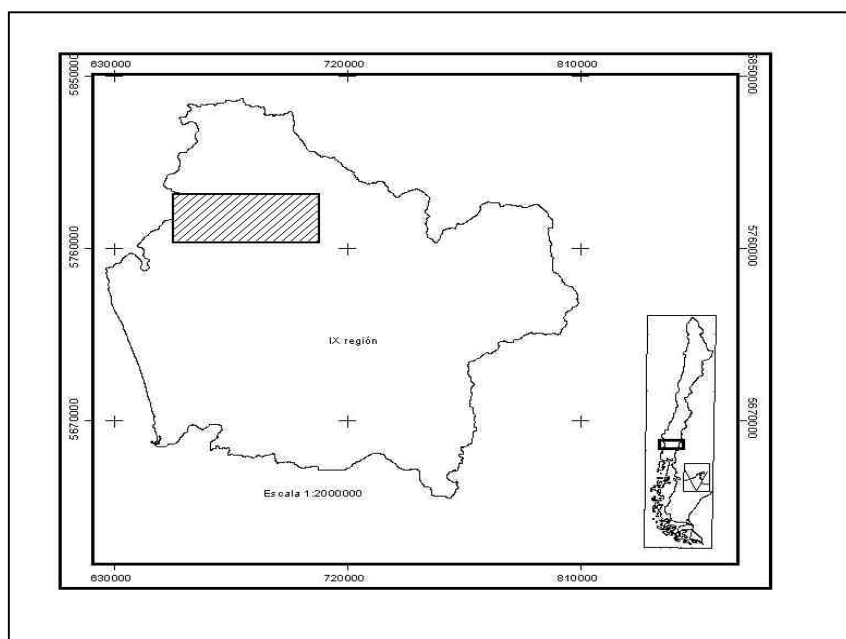


Figura N°1: Mapa de ubicación de la zona de estudio. Traiguén, Lumaco y Capitán Pastene de la IX región, Chile.

En este estudio se utilizaron dos imágenes de la plataforma Landsat 5 TM, de una resolución de 30 mt por pixel, adquiridas el 15 de enero de 1987 y el 28 de febrero de 1998.

Figuras N°2 y N°3.



Figura N°2: Bandas 1, 2 y 3 del 15 de enero de 1987.

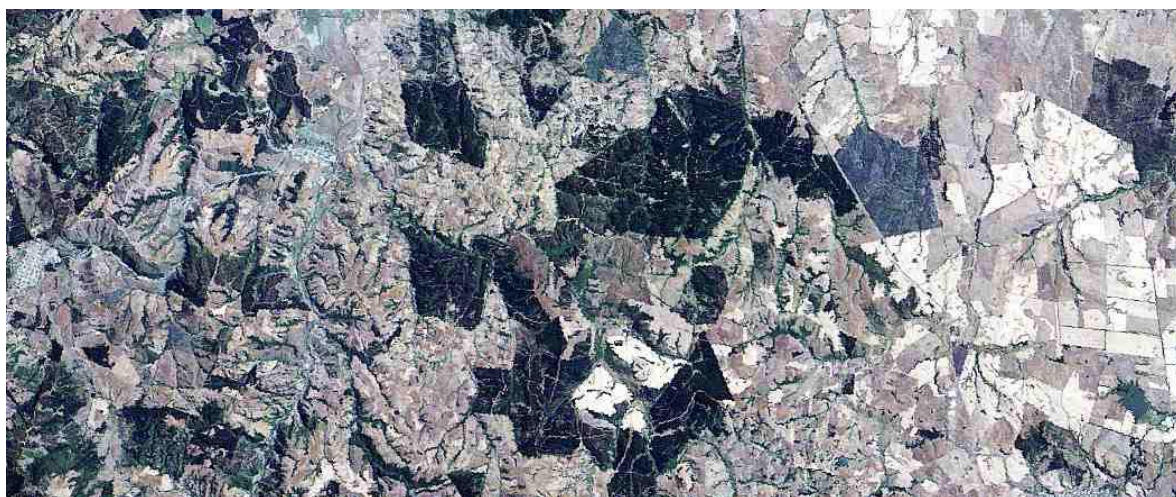


Figura N°3: Bandas 1, 2 y 3 del 28 de febrero de 1998.

Las longitudes de onda captadas por este satélite y sus especificaciones técnicas se presentan a continuación.

Cuadro N°1: Rango espectral del sensor **Landsat Thematic Mapper (TM)**.

Banda	Micrómetros	Resolución
1	.45 - .53	30 m
2	.52 - .60	30 m
3	.63 - .69	30 m
4	.76 - .90	30 m
5	1.55 - 1.75	30 m
6	10.40 – 12.5	120 m
7	2.08 - 2.35	30 m

Fuente: BELSPO, 1999.

Cuadro N°2: Especificaciones técnicas del sensor Landsat TM.

Nombre del sensor	TM (Thematic Mapper)
Plataforma	LANDSAT 4-5
Resolución espacial	30/120 m
Rango espectral	0.45-12.5 μm
Número de bandas	7 bandas.
Resolución temporal	16 días.

METODOLOGÍA

La metodología que permita seleccionar el mejor método de detección de cambios con imágenes satelitales Landsat TM se esquematiza a continuación:

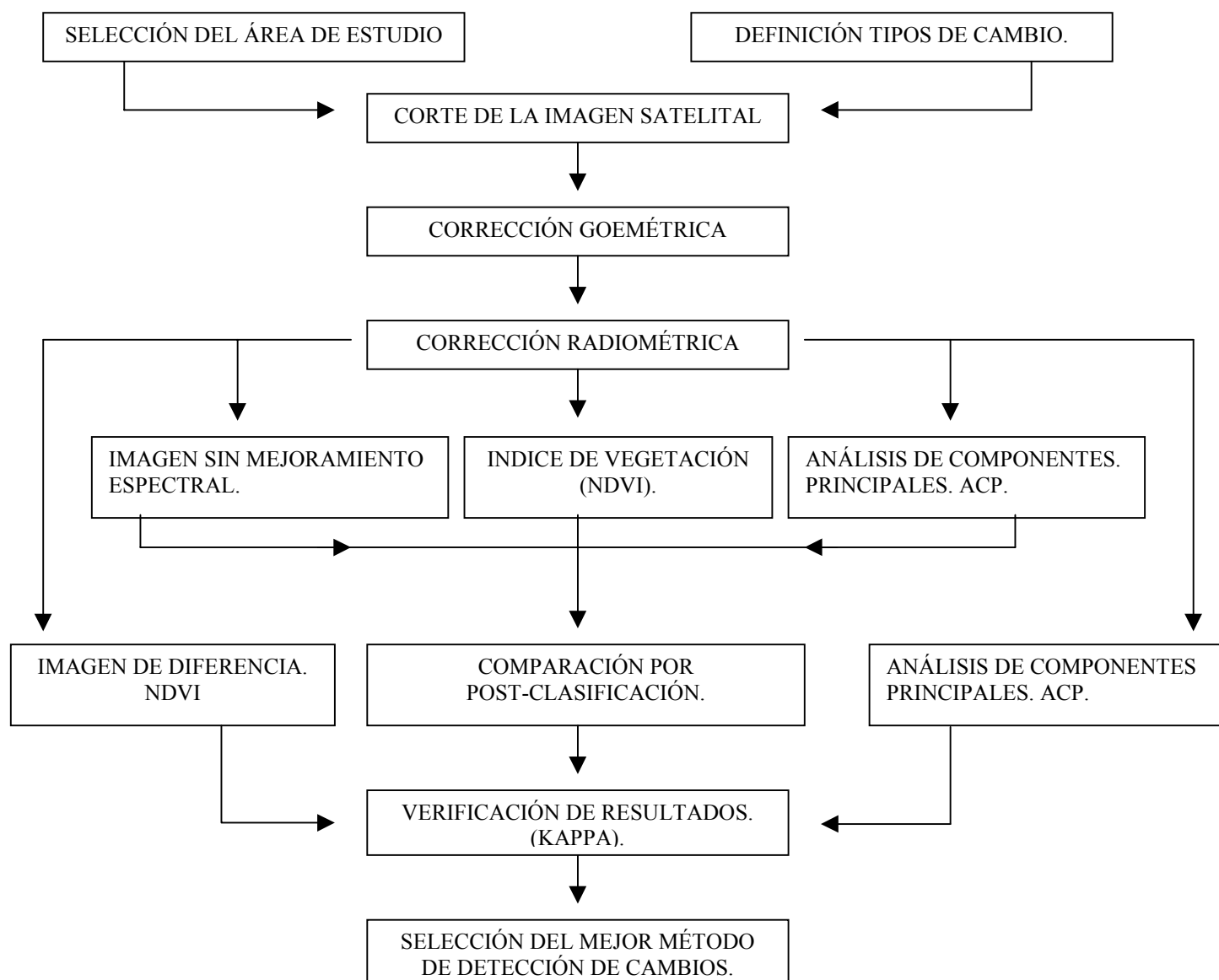


Figura N°4: Diagrama de flujo de la metodología aplicada en el presente estudio.

Definición de los tipos de cambios.

Antes de comenzar el procesamiento de las imágenes satelitales, se procedió a determinar los tipos de cambios de cobertura del suelo a detectar en este estudio. De esta forma, se generó una leyenda de clasificación sencilla que facilitara el entendimiento de las diferentes metodologías aplicadas y las rutinas computacionales requeridas. Esta leyenda de clasificación consideró las siguientes coberturas:

1. Bosque Nativo.
2. Plantaciones Forestales.
3. Agrícola.
4. Cuerpos de Agua.

Corte y Corrección Geométrica de las imágenes.

Una vez definida el área de estudio, se cortó la sección correspondiente de la imagen para así comenzar con la georreferenciación de ellas. En este proceso se utilizó el software Erdas Image 8.3.1 y las cartas IGM correspondientes para ser utilizadas como información de referencia y alcanzar un error medio cuadrático del orden de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ de pixel. La tabla 1 indica los parámetros de georreferenciación alcanzados con cada imagen.

Cuadro N°3. Parámetros de Georreferenciación de las imágenes de 1987 y 1998.

	Imagen de 1987	Imagen de 1998
Información de referencia	Carta IGM	Carta IGM
Método de Resampleo	Nearest Neighbor	Nearest Neighbor
Orden del polinomio ajustado	3°	3°
Puntos de control	49	30
RMS total	0.3712	0.3805
Pixel	30*30	30*30

Corrección Radiométrica.

Idealmente, el flujo de radiación recogido por un sensor remoto, en varias bandas, es una representación precisa del flujo de radiación de las características de la superficie terrestre. Desafortunadamente esto no ocurre, y pueden ingresar errores al sistema de colección de información de varias maneras. Por ejemplo, existen errores radiométricos introducidos por el mismo sensor remoto cuando los detectores individuales no funcionan apropiadamente o son inapropiadamente calibrados (Teillet, 1986, citado por Jensen, 1996). Por otro lado, la intervención atmosférica entre el suelo y el sensor remoto puede contribuir con tanto ruido (error) que la energía recibida por el sensor no se parece a lo que fue reflejado o emitido por la superficie del suelo (Jensen, 1996).

Las variables condiciones de observación, las condiciones atmosféricas o la calibración del sensor, se convierten en otro importante problema en la detección digital de cambios, ya que la signatura espectral en un pixel se ve modificada aunque se mantenga constante la cubierta (Chuvieco, 1996).

En esta investigación se aplicó una calibración relativa que permitiera normalizar los datos de ambas imágenes, minimizando o eliminados los efectos antes señalados. De esta forma, se ajustó mediante regresiones lineales a la imagen de 1987, normalizándola a las condiciones de adquisición de 1998.

Mejoramiento Espectral.

Con el propósito de mejorar la discriminación entre coberturas y resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto más pequeño, se aplicó un índice de vegetación y un análisis de componentes principales al conjunto de bandas de ambas fechas, dejando otro grupo de bandas crudas, (sin ningún mejoramiento), para actuar como información testigo.

Análisis de Principales Componentes. ACP.

Pla, 1986, señala que el método de análisis por componentes principales es un método de análisis que permite la estructuración de un conjunto de datos multivariados obtenidos de una población, cuya distribución de probabilidades no necesita ser conocida, siendo los objetivos más importantes de su aplicación los que se mencionan a continuación:

- Generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto original de datos.
- Reducir la dimensionalidad del problema que se está estudiando, como paso previo para futuros análisis.
- Eliminar, cuando sea posible, algunas de las variables originales si ellas aportan poca información.

El Análisis de Principales Componentes es una transformación de los datos crudos del sensor remoto, que entrega como resultado nuevas imágenes de componentes principales que son más interpretables que los datos originales (Singh and Harrison, 1985. Citado por Jensen, 1996). El análisis de ACP también puede ser utilizado para comprimir la información contenida en las bandas de una imagen satelital en dos o tres imágenes transformadas de principales componentes. Esta habilidad para reducir desde n a dos o tres bandas es una importante consideración económica, especialmente si el potencial de información recuperable desde los datos transformados es tan bueno como los datos originales del sensor (Jensen, 1996).

Índice de Vegetación. NDVI.

Existen varios algoritmos utilizados para la extracción de información desde sensores remotos que en conjunto reciben el nombre de Índices de Vegetación. Entre estos destaca el NDVI (Normalized Differencing Vegetation Index) que se calcula de la siguiente forma:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{TM4} - \text{TM3}}{\text{TM4} + \text{TM3}}$$

Este índice se basa en la significativa diferencia de las características de la reflexión espectral entre la vegetación verde saludable, la vegetación muerta o senescente, y los suelos secos y desnudos. Es así como la vegetación verde saludable, en la región del infrarrojo cercano del espectro, refleja una mayor cantidad de energía que la vegetación senescente o que los suelos secos y desnudos, presentado un comportamiento inverso en la región visible del espectro (Jensen, 1996).

Detección del Cambio

Post-clasificación:

En la técnica de detección de cambios por Post-clasificación las dos fechas son clasificadas y registradas independientemente, en donde la efectividad alcanzada por este método depende de cómo se diferencian espectralmente las clases de cambio, de las clases de no cambio. En ocasiones esta clasificación puede ser complicada, y si se utilizan todas las bandas de cada fecha, se puede tener información redundante (West Virginia University, 1999).

La clasificación individual de las imágenes satelitales se realizó con el método de supervisado, al igual que en todos los métodos revisados en este trabajo. Para la generación de las áreas de entrenamiento se utilizaron los datos del “Catastro y Evolución de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile” como información de apoyo.

Como resultado de esta técnica se obtiene una matriz de cambio que señala los pixeles estables, los pixeles de cambio y la forma en como se desplazaron estos últimos desde una cobertura del suelo a otra.

Imagen de Diferencias:

Esta técnica de detección de cambios, que puede aplicarse sobre alguna de las bandas originales o como es más frecuente sobre índices de vegetación, consiste en la simple resta entre imágenes de dos fechas, de modo que las zonas estables presenten un valor cercano a cero, y las que hayan experimentado cambios ofrezcan valores significativamente distintos de cero, (positivos o negativos) (Chuvieco, 1996).

Matemáticamente una imagen de diferencias se expresa de la siguiente forma:

$$D_{ijk} = BV_{ijk}(2) - BV_{ijk}(1) + C$$

Donde:

- D_{ijk}** = Cambio del valor del nivel digital.
- $BV_{ijk}(1)$** = Valor del valor del nivel digital en el Tiempo 1.
- $BV_{ijk}(2)$** = Valor del valor del nivel digital en el Tiempo 2.
- C** = Constante para evitar valores negativos (habitualmente 127).
- I** = Número de fila.
- J** = Número de columna.
- K** = Número de Banda.

Como producto de la aplicación de esta técnica se obtendrá una imagen de cambios en donde las tonalidades oscuras indicarán una disminución del vigor vegetal, las tonalidades claras serán aquellas zonas que aumentaron su vigor vegetal y los tonos intermedios a las zonas estables.

En este estudio, y con el propósito de generar una matriz que señalara las distintas direcciones de cambio de cobertura de uso del suelo producidas en el tiempo, se determinó aquel umbral de valores a partir de distintas desviaciones estándar de la media, que permitiera separar los píxeles de cambio de los píxeles sin cambio. A través de una imagen binaria se eliminaron los píxeles sin cambio de la imagen de 1998, de modo tal que la clasificación final se realizara solo en los píxeles que modificaron significativamente su respuesta espectral (Macleod, R. and R. Congalton, 1998). La clasificación para 1987 se realizó con las siete bandas originales del respectivo año.

Análisis de Componentes Principales.

Chuvieco, 1996, señala que esta técnica se utiliza de un modo particular en el caso de aplicaciones multitemporales, ya que, luego de generar un archivo multitemporal al que se aplica el ACP, los primeros componentes resultantes recogen la información común a las dos fechas y que los componentes inferiores entregan la información del cambio.

Luego de elegir la imagen de cambio, se seleccionó el umbral de valores de cambio persiguiendo los mismos objetivos y de la misma forma como se señalara en la metodología de la imagen de diferencias.

Verificación de Resultados

La información generada con las imágenes satelitales fue comparada con la información testigo generada a partir de un muestreo realizado con fotografías aéreas escala 1:50000 de 1987 y fotografías a escala 1:20000 de 1994, ya que era la única fuente de información disponible para la zona de estudio y la más cercana a los años 1987 y 1998.

La verificación de los resultados obtenidos en la aplicación de las diferentes metodologías de detección de cambios analizadas permitió dar respuesta a la siguiente pregunta:

Considerando como verdadera la información generada por las fotografías aéreas,

¿Qué corrección espectral y metodología de detección de cambio permitió una mejor detección de la magnitud del cambio de la cobertura de uso del suelo durante 1987 y 1998?.

La respuesta, será aquella metodología que entregue la mayor exactitud global e índice KAPPA.

Se generó entonces, según un muestreo sistemático aplicado en ambas situaciones, una **matriz de error de cambio y no cambio** con los píxeles que presentaron cambio y los píxeles estables según la información testigo y la información a evaluar, así se determinó la exactitud global del método correspondiente, aplicando sobre ella el índice KAPPA, que se utiliza frecuentemente como medida de precisión para evaluar clasificaciones de uso y cobertura de suelo obtenidas de Sensores Remotos (Stehman, 1996).

Sistemas de Información Geográficos: En este estudio se utilizaron los siguientes SIG:

- Idrisi para Windows 3.2.
- Erdas Image 8.3.1
- ArcInfo PC 3.5.2
- ArcView 3.2

RESULTADOS

Post-clasificación sin mejoramiento espectral: En esta metodología se utilizaron las siete bandas de las imágenes de 1987 y 1998 respectivamente, sin utilizar ningún mejoramiento espectral, clasificándose según el método supervisado y cuyos resultados entregaron una exactitud global de 84.5% y un valor de Kappa de 0.55. Este método generó 16 categorías de cambio, que pueden observarse en el cuadro N°4.

Cuadro N°4: Matriz de dirección de cambio según Post-clasificación sin mejoramiento espectral.

	1	2	3	4	Total pixeles
1	27673	8579	52111	5	88368
2	12280	24380	35426	5	72091
3	10792	18054	270490	58	299394
4	1	17	119	348	485
Total pixeles	50746	51030	358146	416	460338

Donde:

Columnas = Clasificación para 1987.

Filas = Clasificación para 1998.

1 = Bosque Nativo.

2 = Plantaciones Forestales.

3 = Agrícola

4 = Cuerpos de Agua.

Post-clasificación NDVI: La aplicación de este método consideró la clasificación supervisada de los índices NDVI para los años 1987 y 1998. Este método generó 14 categorías de cambio, una exactitud global de 85.7% y un índice Kappa de 0.59. En el cuadro N°5 se observan los pixeles estables y aquellos que de cambio.

Cuadro N°5: Matriz de dirección de cambio según Post-clasificación NDVI.

	1	2	3	4	Total pixeles
1	17677	5909	22315	0	45901
2	24549	27458	72245	10	124262
3	8520	17655	263514	95	289784
4	0	8	72	311	391
Total pixeles	50746	51030	358146	416	460338

Donde:

Columnas = Clasificación para 1987.

Filas = Clasificación para 1998.

1 = Bosque Nativo.

2 = Plantaciones Forestales.

3 = Agrícola

4 = Cuerpos de Agua.

Post-clasificación ACP: En este método se utilizó la capacidad de sintetizar un conjunto de variables en otro más reducido sin perder gran parte de la información original (Chuvieco, 1996). De este modo se aplicó un ACP al conjunto de siete bandas de 1987 y 1998 por separado, en donde el primer componente explicaba el 76.65% y 79.24% del total de la varianza de las imágenes de 1987 y 1998 respectivamente. Estas dos imágenes fueron clasificadas y entregaron como resultado una matriz de cambio de 16 categorías, con una

exactitud global de 75% y un índice Kappa de 38.8%. Las categorías de cambio pueden observarse en el cuadro N°6:

Cuadro N°6: Matriz de dirección de cambio según Post-clasificación ACP.

	1	2	3	4	Total pixeles
1	21701	10760	59269	23	91753
2	12471	20332	30088	66	62957
3	13507	14027	261712	9	289255
4	3067	5911	7077	318	16373
Total pixeles	50746	51030	358146	416	460338

Donde:

Columnas = Clasificación para 1987.

Filas = Clasificación para 1998.

1 = Bosque Nativo.

2 = Plantaciones Forestales.

3 = Agrícola

4 = Cuerpos de Agua.

Detección de Cambios con Imagen de Diferencias - NDVI: Esta técnica de detección de cambios se aplicó sobre índice de vegetación NDVI generado para cada fecha, de modo que las zonas estables se diferenciaron de aquellas que hayan experimentado según el análisis de tres desviaciones estándar 0.5, 1 y 1.5 de la media. En este caso, se utilizó un umbral de cambio proporcionado por 1 desviación estándar. Los resultados así obtenidos manifestaron una exactitud global de 86.9%, un índice Kappa de 0.60 y una matriz de cambio de 14 categorías indicadas en el Cuadro N°7.

Cuadro N°7: Matriz de dirección de cambio según método de detección de cambios con Imagen de Diferencias - NDVI.

	1	2	3	4	Total pixeles
1	35155	29	130	0	35314
2	9384	36144	61691	10	107229
3	6207	14843	296263	17	317330
4	0	14	62	389	465
Total pixeles	50746	51030	358146	416	460338

Donde:

Columnas = Clasificación para 1987.

Filas = Clasificación para 1998.

1 = Bosque Nativo.

2 = Plantaciones Forestales.

3 = Agrícola

4 = Cuerpos de Agua.

Detección de Cambios con Análisis de Componentes Principales: Al aplicar un ACP en un estudio multitemporal con imágenes satelitales, se aprovecha la cualidad que entrega esta técnica estadística para recoger la información de no cambio de ambas fechas en los primeros componentes, y la información de cambio en los componentes inferiores. De este modo se aplicó un ACP estandarizado a un archivo multitemporal con las cuatro primeras bandas de cada año, cuyos resultados entregaron un primer componente que explica un 55.9% de la varianza total y un segundo componente de cambio con un porcentaje de varianza explicado del 21.58%. Este último componente fue seleccionado como imagen de cambios a la cual se aplicó el umbral de cambio con una desviación estándar igual a 1 que discriminó de mejor forma a los pixeles estables de los pixeles de cambio, y que permitió

generar una imagen binaria (Figura N°5), que se utilizaría más tarde en la eliminación de los píxeles estables del proceso de clasificación de la imagen de 1998.

El hecho de que sea el segundo componente quién exprese los cambios ocurridos en ambas fechas se debe a la elevada situación de cambio del área de estudio, efecto señalado por Macleod, R. and R. Congalton, 1998.

De la aplicación de esta técnica de detección de cambios se obtuvo una matriz de cambio de 14 categorías de cambio, con una exactitud global de 90.48% y un índice Kappa de 72.8%.

Las categorías de cambio pueden observarse en el siguiente cuadro:

Cuadro N°8: Matriz de dirección de cambio según método de detección de cambios con ACP.

	1	2	3	4	Total píxeles
1	35155	29	130	0	35314
2	9384	36144	61691	10	107229
3	6207	14843	296263	17	317330
4	0	14	62	389	465
Total píxeles	50746	51030	358146	416	460338

Donde:

Columnas = Clasificación para 1987.

Filas = Clasificación para 1998.

1 = Bosque Nativo.

2 = Plantaciones Forestales.

3 = Agrícola

4 = Cuerpos de Agua.

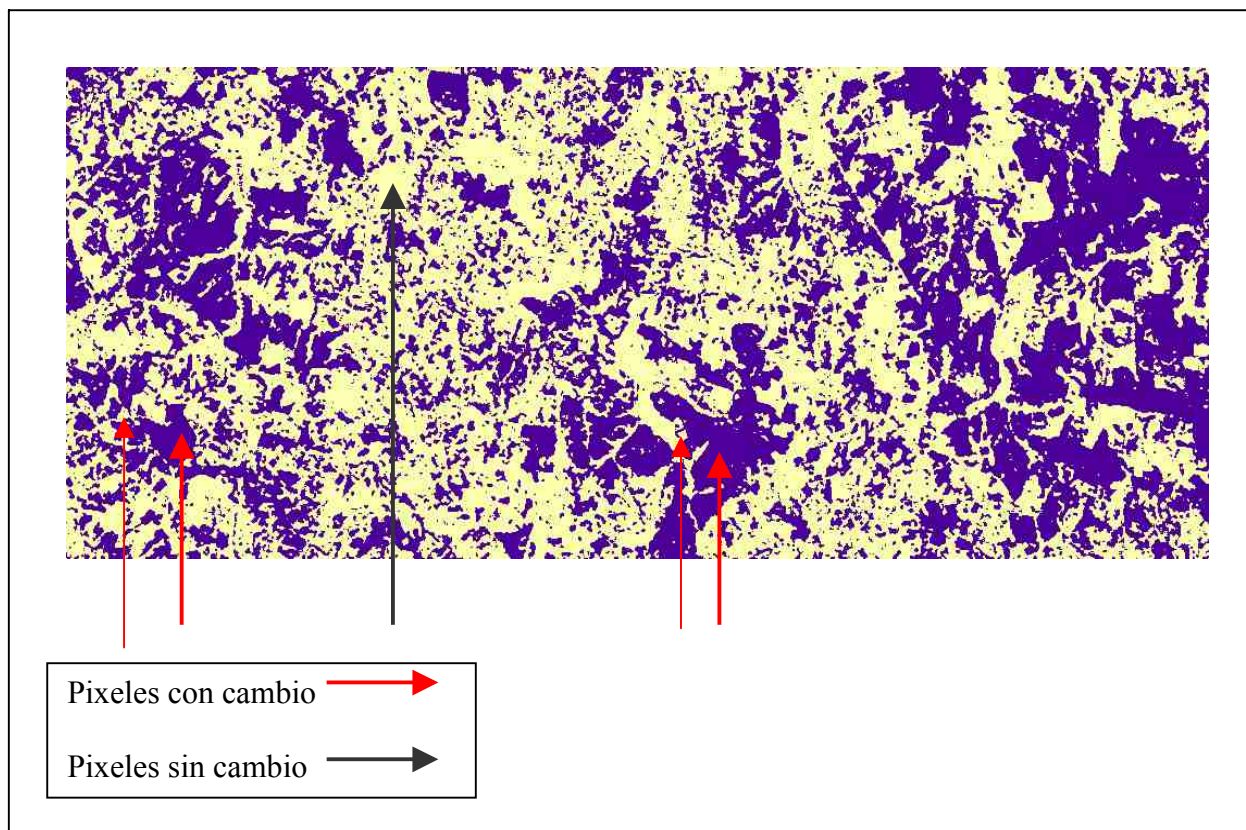


Figura N°5: Imagen Binaria producida con el método de detección de cambios de ACP.

Selección del mejor método de detección de cambios.

La corrección espectral y metodología de detección de cambio permitió una mejor detección de la magnitud del cambio de la cobertura de uso del suelo durante 1987 y 1998, se determinó a partir de aquella que entregara la mayor exactitud global e índice KAPPA, por lo que se generó el siguiente cuadro.

Cuadro N°9: Exactitud global e índice para las cinco metodologías de detección de cambios analizadas en este estudio.

	Exactitud Global	Kappa
Post-clasificación sin mejoramiento espectral	84.52	0.54
Post-clasificación NDVI	85.71	0.59
Post-clasificación ACP	75.00	0.38
Detección de cambios con ACP	90.47	0.72
Det. de cambios con Imagen de diferencia - NDVI	86.90	0.60

Por lo tanto el método de **detección de cambios con ACP** fue el seleccionado como aquel que represento de mejor forma los cambios producidos en el área de estudio.

DISCUSIONES

Las metodologías de imagen de diferencia NDVI y el análisis de componentes principales se presentan como poderosas herramientas para la discriminación de píxeles que modificaron su respuesta espectral en las fechas bajo estudio, cuya separación de los píxeles estables mejora la clasificación final de la imagen más reciente.

De las metodologías de detección de cambios estudiadas, la post-casificación NDVI, la imagen de diferencia NDVI y el análisis de componentes principales presentaron 14 categorías de cambio que no consideraron las direcciones de cambios Bosque Nativo – Cuerpos de Agua y Cuerpos de Agua a Bosque Nativo, que efectivamente no se presentan según el análisis visual de las fotografías aéreas de la zona de estudio. Estas tres metodologías presentaron los más altos indicadores de exactitud global e índice Kappa. Las metodologías de post-clasificación sin mejoramiento espectral y post-clasificación con ACP sí presentaron las direcciones de cambios Bosque Nativo – Cuerpos de Agua y

Cuerpos de Agua - Bosque Nativo, presentando también los menores valores de exactitud global e índice Kappa.

De la lectura de la matriz de dirección de cambio (Cuadro N°8) correspondiente a la metodología de detección de cambios de ACP, se destacan situaciones de cambio de uso de suelo:

- Existen 5552.19 ha que cambiaron de cobertura de uso de suelo agrícola a plantaciones forestales.
- Se observan 1335.87 ha que cambiaron de cobertura de uso de suelo de plantaciones forestales a uso agrícola. La interpretación de este resultado debe ser cuidadosa, ya que gran parte de esta superficie corresponde en realidad a terrenos forestales recién cosechados, y que no necesariamente se produjo un cambio en la cobertura de uso de suelo, pues continua siendo forestal.
- Existen ciertos cambios de cobertura de cuerpos de agua hacia otra categoría, como cuerpos de agua a plantaciones forestales y viceversa, que no se verifican en las fotografías aéreas, y que más bien se deben al error de clasificación introducido por la presencia de sombras existentes debido al relieve y topografía del lugar, el ángulo de inclinación solar y ángulo de observación de la plataforma satelital.

Del trabajo realizado en este estudio y de los resultados entregados por las metodologías de detección de cambios aquí estudiadas, la Post-clasificación se destaca por ser la más sencilla de aplicar, ya que en la imagen de diferencias y análisis de componentes principales se presentan el problema de fijar los múltiplos de desviaciones estándar que

definan el umbral de cambio que mejor separe a los píxeles de cambio con los píxeles estables.

La selección de la mejor alternativa de detección de cambios se realizó en función de la exactitud global e índice capa obtenida de la **matriz de error de cambio y no cambio**, ya que el interés de esta investigación era determinar la magnitud de los cambios encontrados entre 1987 y 1998, en todo caso, debe señalarse que este trabajo puede incrementar su precisión al incorporar un indicador de exactitud e índice Kappa generados a partir de la **matriz de direcciones de cambio** entre las distintas categorías de uso del suelo.

La metodología de detección de cambio de post-clasificación con ACP debe sus bajos valores de exactitud global e índice Kappa al clasificar en dos oportunidades a los píxeles sin cambio, ya que los dos primeros componentes de ambas fechas recogen la información común para cada situación.

Se debe resaltar la utilidad de la aplicación del índice de vegetación NDVI, ya que discrimina favorablemente a las situaciones con bosque nativo o plantaciones forestales de las categorías de suelo agrícola y cuerpos de agua, por lo que puede ser aplicado en estudios de procesos de deforestación o forestación.

Existe una etapa en todos los métodos de detección de cambios revisadas en este estudio, que merece de un análisis más profundo, como lo es la fase de la clasificación digital. En el caso de la clasificación según el método supervisado, que es la que se aplicó en este trabajo, se requieren de áreas de entrenamiento que representen lo más fielmente a la categoría que

describen, y por lo tanto su correcta definición influye directamente en los resultados de la clasificación final. En el ámbito de investigaciones nacionales aún no se ha profundizado lo suficiente en esta temática.

En este estudio, queda demostrada una de las potencialidades de la utilización de información satelital, toda vez que es posible conocer con un cierto grado de exactitud, el dinamismo de las coberturas de suelo en situaciones que no tienen información fidedigna y periódica como la proporcionada por las imágenes Landsat TM, que gracias a su formato digital permite el análisis cuantitativo de variables medioambientales, cualidad que no ofrecen otras fuentes de información como las fotografías aéreas tradicionales.

Se debe señalar que los resultados de este estudio no limitan, ni agotan la posibilidad de estudiar otras alternativas de metodologías de detección de cambios, una gran variedad de otros mejoramientos espectrales, y definir su aplicabilidad en clasificaciones digitales de mayor detalle.

CONCLUSIONES

- La metodología de detección de cambios con un Análisis de Componentes Principales fue la que presentó los mejores valores de exactitud global e índice Kappa, por lo que se presenta como la metodología con los resultados más cercanos a la realidad si se considera a la información testigo como verdadera.
- Las metodologías de detección de cambios de imagen de diferencia NDVI y el análisis de componentes principales se presentan como poderosas herramientas para la discriminación de píxeles que modificaron su respuesta espectral en las fechas bajo estudio.
- Los resultados obtenidos en este estudio entregan una orientación respecto de la aplicabilidad de la imagen satelital Landsat TM en el monitoreo de formaciones forestales y coberturas de uso de suelo.

BIBLIOGRAFÍA.

- Avery, E. and Graydon B. 1992. Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation. Macmillan Publishing Company. 5ª Edición. 472 p.
- Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. Tercera Edición. Ediciones Rialp S. A. Madrid, España. 568 p.
- CIESIN (Center for International Earth Science Information Network Columbia University), 1999. "Thematic Guides". * Provisional Release *. Disponible en Internet: <http://infoserver.ciesin.org/TG/RS/HTML/chngdet.html>
- Copyright© 1990-1995 Microsoft Corp. Ayuda de Microsoft Windows 4.00.950. Sistema de Ayuda de IDRISI para Windows.
- Jensen, J. 1996. Introductory Digital Image Processing A Remote Sensing Perspective.
- Lillesand T. and Kiefer R. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc. 3ª Edición. 748 pp.
- Macleod, R. and R. Congalton, 1998. A Quantitative Comparison of Change-Detection Algorithms for Monitoring Eelgrass from Remotely Sensed Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 64: 207-216.

- Stehman, S. 1996. Estimating the Kappa Coefficient and its Variance under Stratified Random Sampling. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62: 401-402.
- Pla, L. 1986. Análisis Multivariado: Método de componentes Principales. Dpto. de Producción Vegetal Area de Cs. Del Agro y del Mar. Universidad Nacional Experimental Francisco Miranda. Coro, Falcón, Venezuela. 94 pp.
- West Virginia University, 1999. Department of Geology and Geography. Comparison of Change Analysis Procedures. Disponible en Internet: <http://157.182.168.10/geog455/spring97/06/REMOTE.HTM>