

CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE FRAGMENTOS DE BOSQUE NATIVO, EN UN SECTOR DEL SECANO INTERIOR DE LA REGIÓN DEL MAULE, CHILE

CHARACTERIZATION AND QUANTIFICATION OF NATIVE FOREST PATCHES IN A SECTOR OF THE SEMI-ARID LANDSCAPE AT THE MAULE'S REGION, CHILE

Yony Ormazábal¹ Carlos Ávila² Carlos Mena³ Yohana Morales⁴ Óscar Bustos⁵

RESUMEN

Los bosques mediterráneos, en general, han sufrido altos grados de fragmentación, principalmente por la acción antropogénica, consecuencia de las actividades productivas agro-ganaderas, asentamientos humanos y plantaciones forestales de especies exóticas de rápido crecimiento, derivando en una pérdida en la continuidad de los bosques naturales, y por ende, en una disminución de la biodiversidad. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial que tiene el uso de imágenes satelitales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para cuantificar y caracterizar la evolución espacial de los bosques nativos, en un sector del secano interior de la Región del Maule, Chile. El estudio se realizó con imágenes Landsat-5 TM de los años 2004 y 2008, que fueron clasificadas mediante el método supervisado donde fue necesario realizar tratamientos digitales previos, considerando correcciones atmosféricas y geométricas, para disminuir los errores de interpretación y medición. Dentro de los análisis, se incorporó información temática digital de uso del suelo, obtenida desde la Corporación Nacional Forestal (CONAF), y se integró además, una de las técnicas más recientes derivada de teledetección espacial para el estudio de cambios en la cobertura terrestre, llamada Rotación Controlada por Eje de No Cambio (RCEN). Finalmente, se estimaron índices de fragmentación, con la finalidad de caracterizar la configuración espacial del paisaje. A partir de los resultados de la clasificación digital fue posible estimar métricas de paisaje que muestran diferencias importantes en la estructura del área estudiada entre los dos períodos. Además, se generó una imagen de cambio 2004/2008 que permitió evaluar la consistencia de la técnica RCEN, demostrando la factibilidad de utilizar esta metodología alternativa para la detección de cambios, en términos de degradación y recuperación de masa boscosa.

Palabras claves: fragmentación; métricas de paisaje; SIG; RCEN.

ABSTRACT

In general, the Mediterranean forests have suffered high levels of fragmentation, mainly by anthropogenic action, as result of the productive activities of agriculture and livestock, human settlements and forest plantations of fast growing exotic species, leading to loss of continuity of natural forests, and thus a decrease of biodiversity. In this context, the objective of this study was to evaluate the potential use of satellite images and Geographic Information Systems (GIS) to quantify and characterize the spatial evolution of native forests in a semi-arid landscape area at the Region of Maule, Chile. The study was conducted with Landsat-5 TM images of 2004 and 2008, which were classified by the supervised method where it was previously necessary to apply the atmospheric and the geometric corrections to reduce errors of interpretation and measurement. Within the analysis, it was incorporated digital thematic information of land use of the National Forestry

- 1 Ingeniero Forestal, Ms., Prof. Conferenciante, Centro de Geomática de la Universidad de Talca, Avda. Lircay, s/n, Talca, Chile. yormazabal@utalca.cl
- 2 Ingeniero Forestal, Mg., Asistente de Investigación, Centro de Geomática de la Universidad de Talca. Avda. Lircay s/n, Talca, Chile. cavilaazocar@gmail.com
- 3 Cartógrafo, Dr., Prof. Asociado, Fac. Cs. Forestales y Centro de Geomática de la Universidad de Talca, Avda. Lircay, s/n, Talca, Chile. cmena@utalca.cl
- 4 Ingeniera Forestal, Mg., Asistente de Investigación, Centro de Geomática de la Universidad de Talca, Avda. Lircay, s/n, Talca, Chile. ymorales@utalca.cl
- 5 Ingeniero Forestal, Dr., Prof. Asistente, Fac. Cs. Forestales, Universidad de Talca, Avda. Lircay, s/n, Talca, Chile. obustos@utalca.cl

Recebido para publicação em 18/07/2011 e aceito em 2/12/2011

Corporation (CONAF) and also it was joined one of the latest techniques derived from remote sensing for studying changes in land cover, that is called Radiometric Rotation Controlled by No-Change Axis (RCNA). Finally, the fragmentation indexes were estimated for characterizing the spatial configuration of landscape. From the results of the digital classification it was possible to estimate landscape metrics that show significant differences in the structure of the study area between the two periods. In addition, it was generated an image of change 2004/2008 that allowed to evaluate the consistency of the RCEN technique, demonstrating the feasibility of using this alternative methodology for the detection of changes in terms of degradation and recovery of woodlands.

Keywords: habitat fragmentation; landscape metrics; GIS; RCEN.

INTRODUCCIÓN

La fragmentación de los bosques nativos es una perturbación de los bosques originalmente continuos en fragmentos remanentes de diferentes tamaños y más o menos separados entre sí (FAHRING, 2003). Según Primack (1998), el proceso de fragmentación no ocurre al azar, las áreas más accesibles de topografía poco accidentada y con alta productividad son las primeras en ser alteradas para utilizar las tierras en agricultura, asentamientos humanos o extracción forestal. La fragmentación ocurre en todos los bosques nativos del mundo y en Chile la fragmentación se debe a dos grandes causas, la primera es ser un país semi-árido y la segunda es el desarrollo de inadecuadas prácticas agrícolas desde el siglo XVII, tiempo en que comienza la Colonia (DONOSO y LARA, 1995).

Una de las principales consecuencias asociadas a la pérdida de masas boscosas es la desertificación, catalogada como un problema socio ambiental grave, que provoca el deterioro del medioambiente y malas condiciones de vida para la población (CONAF, 1997). Existen cuatro actividades asociadas a la desertificación en Chile: deforestación de los bosques naturales, el sobrepastoreo, malas prácticas agrícolas y las incorrectas técnicas de riego (MIDEPLAN, 1993). Esto ocasiona problemas relacionados principalmente con el empobrecimiento de los suelos, disminución de la biodiversidad y la pérdida de productividad silvoagropecuaria (DONOSO y OTERO, 2005). El interés por estudiar el comportamiento y evolución de la distribución espacial de los fragmentos de bosque nativo en Chile se debe a que los bosques y formaciones arbustivas mediterráneas de Sudamérica se ubican exclusivamente en dicho país y forman parte de las 238 ecorregiones biológicamente más valiosas en el mundo (OLSON et al., 2001). En particular, la Región del Maule presenta una marcada dinámica

en su paisaje natural, priorizando esencialmente las actividades económicas más rentables. Es aquí donde se establece un importante reemplazo de la vegetación nativa por plantaciones forestales y nuevos cultivos agrícolas intensivos, destacándose los viñedos y la ganadería, lo cual genera un impacto negativo en los hábitats naturales (ECHEVERRÍA et al., 2007).

Los estudios de ecología del paisaje poseen un marcado componente espacial, puesto que los fragmentos o parches presentan propiedades y relaciones espaciales cuya variación determinará la magnitud y sentido de los efectos sobre los sistemas ecológicos (TURNER, 1989), es aquí donde el uso de los SIG resulta fundamental para este tipo de estudios debido a la alta capacidad de análisis de los datos espaciales, siendo posible analizar los elementos del mundo real mediante representaciones ráster o vectoriales (MENA, 2005). A su vez, a partir de datos registrados en imágenes satelitales, se han desarrollado procesamientos digitales que posibilitan el seguimiento de la evolución de los fenómenos asociados a la degradación de la tierra. Uno de los más eficientes se denomina Detección de Cambios y se define como un proceso que observa las diferencias de un objeto o fenómeno en distintos momentos, a través de cambios en los valores numéricos de las imágenes (SINGH, 1989; COPPIN et al., 2004). Las metodologías tradicionales basadas en clasificaciones digitales requieren de correcciones atmosféricas previas sobre las imágenes multiespectrales a tratar, sin embargo, Maldonado et al. (2007) y Graça et al. (2008) recientemente desarrollaron una técnica de detección de cambios denominada Rotación Controlada por Ejes de No-Cambio (RCEN), que no requiere dichas correcciones, lo cual facilita el proceso y permite obtener resultados igualmente satisfactorios (MENA et al., 2010).

El objetivo de este trabajo es cuantificar y

caracterizar fragmentos de bosque nativo sobre una zona del secano interior en la Región de Maule, Chile, incorporando información temática digital mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El estudio se realizó con imágenes Landsat-5 TM de los años 2004 y 2008, evaluando el desempeño metodológico de dos técnicas geomáticas empleadas en la espacialización de los cambios en el paisaje vegetacional integrando además, información de uso actual de suelo de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), generada en el año 1999 bajo el programa del Catastro Nacional de la Vegetación Nativa de Chile (CONAF-CONAMA, 1999).

MATERIAL Y MÉTODO

Materiales

Las imágenes que se emplearon en el estudio corresponden a Landsat-5 TM (Thematic Mapper) de la órbita número 233 (path) punto 085 (row), sin calibraciones o correcciones atmosféricas previas. Las fechas de las imágenes corresponden al 18 de marzo de 2004 y 25 de enero de 2008. Además, se utilizó una base de datos digital SIG que incorpora información vectorial (curvas de nivel, caminos, cursos de agua, entre otras) generada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) de Chile, como cartas topográficas a escala 1:50.000 el año 1997/98. Se consideró además una cobertura SIG correspondiente a la ocupación del suelo según Catastro de Bosque Nativo, elaborada por CONAF-CONAMA a escala 1:20.000 el año 1999.

Área de estudio

El estudio se realizó en la zona del secano interior de la Región de Maule, Chile. El área de estudio se encuentra en la zona límite de las comunas de Constitución, Pencahue y San Javier en la Región del Maule. El área está ubicada entre los paralelos 71° 50' y 72° 07' de latitud sur y 54° 51' y 54° 24' de longitud oeste abarcando una superficie de 1.579 km² (Figura 1). La zona posee un clima mediterráneo cálido con precipitaciones promedio de 800 mm, además tiene un período seco de cinco meses entre Noviembre y Marzo, ciclo que presenta las máximas temperaturas medias de 19°C y extremas de 30°C en los valles y cuencas interiores, mientras que en invierno las temperaturas mínimas alcanzan un promedio de 7°C (SANTIBÁÑEZ et al., 1979).

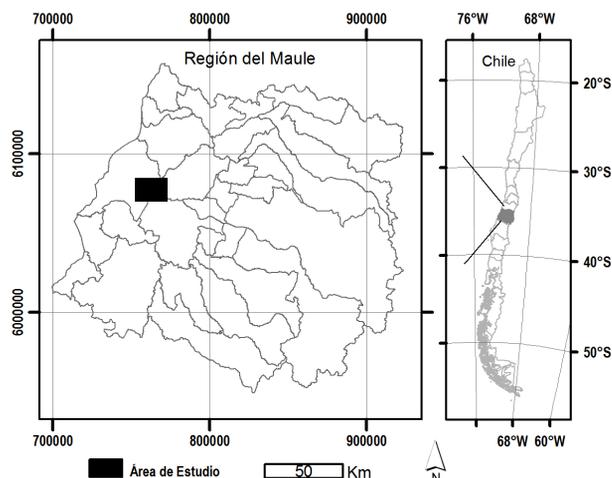


FIGURA 1: Área de estudio.

FIGURE 1: Study area.

Preparación de imágenes satelitales

Las imágenes Landsat-5 TM fueron recortadas para aislar la zona de estudio y facilitar las metodologías a aplicar. Se realizó una corrección geométrica, en donde se transformaron las coordenadas de imagen a coordenadas de mapa, asignando una proyección cartográfica que en este caso correspondió a Universal Transversa de Mercator (UTM), con elipsoide WGS84, datum WGS84 y zona de huso 18 Sur. La corrección se realizó mediante el software ERDAS (ERDAS, 2010) y contempló el uso de vectores referenciados de cartografía digital IGM.

Clasificación supervisada y extracción de información temática

Para proceder con la aplicación de la primera técnica de detección de cambio basada en clasificación supervisada fue necesario llevar a cabo correcciones digitales con el propósito de mejorar y estandarizar la representación gráfica de los elementos que muestran las imágenes, permitiendo su posterior comparación entre imágenes de distinto período. Para esto, se realizó una corrección atmosférica mediante el método de COST sin Tau (substracción de objeto oscuro) propuesto por Chávez (1996), en donde además se convierten los ND (niveles digitales) de cada imagen a reflectancia sobre atmósfera (TOA), lo cual asegura la correcta representación numérica de las propiedades físicas y además facilita la adecuada aplicación de algoritmos de clasificación. El modelo utilizado está defi-

nido por la ecuación [1], que fue implementada en el módulo ModelMaker del programa ERDAS para su aplicación.

$$\rho_{BandN} = \frac{\pi[(L_{BandN} * Gain_{BandN} + Bias_{BandN}) - (H_{BandN} * Gain_{BandN} + Bias_{BandN})] D^2}{E_{BandN} * \cos[(90 - \theta) (\frac{\pi}{180})]} \quad [1]$$

dónde: ρ_{BandN} = Corresponde al valor de reflectancia TOA para la banda N; L_{BandN} = Número digital para la banda N; H_{BandN} = Número digital representante el objeto sombra (objeto que absorbe toda la radiación por ejemplo cuerpos de agua) para la banda N; D = Distancia normalizada Tierra-Sol; E_{BandN} = Irradiancia Solar para la banda N; $Gain_{BandN}$ = Pendiente. Cantidad de niveles digitales por unidad de cambio de radiancia; $Bias_{BandN}$ = Constante. Valor del ND que corresponde a la respuesta del instrumento cuando la radiancia es cero (Gain y Bias se obtienen del archivo *header* (metadatos) de cada imagen).

En términos generales, la clasificación es el proceso en donde se convierte los valores contenidos en imágenes multiespectrales, en una nueva imagen compuesta por un número definido de categorías de cobertura de suelo, obteniendo así cartografía e inventario de las categorías que son objeto de estudio (BOSQUE et al., 1994). Este proceso se llevó a cabo utilizando el método de clasificación digital supervisada con máxima probabilidad, mediante el programa ERDAS. En esta etapa el conocimiento de los elementos existentes en el área de estudio, junto con la calidad de los sitios de entrenamiento en las imágenes es imprescindible para que el resultado de la clasificación sea el óptimo. Por ello, se seleccionó la composición de bandas espectrales 345 (falso color compuesto) para las sub-escenas 2004 y 2008, que permite mejorar significativamente la diferenciación de los límites del agua y tierra, los diferentes tipos de vegetación (que se muestran en colores marrones, verdes y naranjas), y se realzan las diferencias en humedad del suelo (generalmente el suelo húmedo aparece más oscuro). Con el conocimiento del lugar y una interpretación visual previa de las imágenes, se seleccionaron las áreas de entrenamientos para cada clase temática, buscando muestras similares para cada elemento a identificar. Las clases consideradas fueron: bosque nativo, matorral (“capoeira”), coníferas (plantación exóticas), suelo descubierto (bosque talado y praderas), río (agua), lecho de río y cultivos agrícolas.

Aplicación de técnica RCEN

La aplicación de la técnica de detección de cambios RCEN (MALDONADO et al., 2007) no requiere de correcciones digitales previas a las imágenes satelitales, por lo que en este caso se trabajó directamente con las imágenes Landsat-5 TM recordadas y corregidas geométricamente. Con éstas, se realizó una transformación lineal de un par de bandas espectrales de fechas diferentes de una misma región, en donde se debió encontrar el ángulo de aquellos valores definidos como no cambio (Figura 2). Con este ángulo (θ) se produce la rotación de los ejes ortogonales del espacio de atributos de las bandas y corresponde al arco-tangente del coeficiente de inclinación hallado en la recta de regresión de los puntos de no cambio. El proceso se lleva a cabo mediante las fórmulas [2], [3], [4] y [5]. El procedimiento se aplicó sobre las imágenes originales (sin corrección atmosférica).

$$Y = mX + O_i \quad [2]$$

$$\theta = \arctg(m) \quad [3]$$

$$I_{(Intermedia)} = - Fecha1 \times sen\theta + Fecha2 \times cos\theta \quad [4]$$

$$I_{(Detección)} = I_{(Intermedia \text{ banda } 3)} - I_{(Intermedia \text{ banda } 4)} \quad [5]$$

dónde: Y corresponde al valor radiométrico de la primera fecha; X corresponde al valor radiométrico de la segunda fecha; m es la pendiente del eje de no cambio ($m = \text{tg } \theta$); θ es el ángulo de rotación; O_i es el valor donde se intercepta el ori-

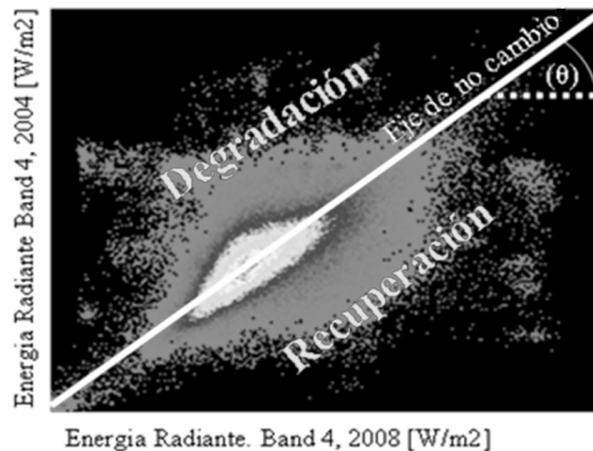


FIGURA 2: Diagrama de dispersión entre dos bandas espectrales.

FIGURE 2: Scatterplot of two spectral bands.

gen; y $I_{(Detección\ o\ Intermedia)}$ corresponde a la imagen de detección de cambios.

Esta imagen representa la variación de las coberturas vegetales presentes en la tierra, la intensidad del cambio está reflejada por la intensidad de la radiometría de los píxeles. Por ejemplo, un cambio caracterizado por la sustitución de la cobertura forestal por suelo desnudo estará asociado a una degradación fuerte, con una alta intensidad radiométrica representándose en tonos más claros. Por otra parte, cambios caracterizados por el aumento de la cobertura vegetal tal como la conversión de un pastizal degradado a plantación, serán asociados a una recuperación fuerte, por lo que la radiometría tendrá valores menores y se representará con tonos más oscuros (MALDONADO y SANTOS, 2005). Luego de haber realizado el proceso de transformación de la imagen de detección y debido a que el resultado está expresado en forma continua, se procede a convertir el resultado en una cobertura temática (mediante reclasificación) y con ello obtener así un mapa de cambios. Para este caso, se establecieron 5 categorías de degradación: recuperación fuerte, recuperación media, no cambio, degradación media y degradación fuerte.

Reagrupación mapa de uso de suelo 1999

En esta etapa se reagruparon las clases de vegetación contenidas en el Catastro Nacional de la Vegetación Nativa de Chile (CONAF-CONAMA, 1999), en 7 clases temáticas descriptivas de toda la Región del Maule, con similar composición y estructura a las clases definidas en la etapa de clasificación supervisada, las cuales son: río, lecho de río, coníferas, bosque nativo, suelos descubiertos, matorral y cultivos agrícolas.

Evaluación de imagen de detección de cambio RCEN

Para evaluar la metodología RCEN en la identificación del cambio de cobertura y fragmentación del bosque nativo, se generó una cobertura digital reclasificada a partir del resultado obtenido de la tabulación cruzada entre las clasificaciones supervisadas del año 2004 y 2008, para ser comparada en términos de forma y superficie con la imagen de detección de cambios RCEN. En la Tabla 1 se pueden observar los escenarios considerados para obtener las mismas categorías de degradación definidas en la imagen de detección de cambios RCEN. La lectura de la tabla es unidireccional para mantener la lógica temporal de los cambios, por lo que se debe leer desde las columnas hacia las filas (2004 a 2008).

Cálculo de métricas de paisaje

Para establecer la fragmentación del paisaje a nivel de clase temática, se eligieron indicadores que miden la composición y la forma del paisaje (área [6], número de fragmentos [7], densidad de fragmentos [8], relación perímetro/área [9], índice de forma [10] y dimensión fractal [11]), e indicadores relacionados con proximidad y conectividad (índice de proximidad [12], índice de cohesión [13] e índice de conectancia [14]), considerados como buenos parámetros espaciales del nivel de fragmentación de los componentes del paisaje (PAUCHARD et al., 2006; LI y REYNOLDS, 1993), ya que describen algunos de los efectos fundamentales del proceso (Tabla 2). La información necesaria para calcular estos índices fue obtenida de los polígonos generados en las clasificaciones supervisadas 2004 y 2008, para cada clase temática definida. El

TABLA 1: Categorización de la tabulación cruzada entre clasificaciones 2004 y 2008.

TABLE 1: Categorization of the cross tabulation between 2004 and 2008 classification layers.

		Clasificación 2004						
Clase temática		Río 04	Lecho de río 04	Coníferas 04	Bosque nativo 04	Suelo descubiertos 04	Matorral 04	Cultivos agrícolas 04
Clasificación 2008	Río 08	NC	NC	DF	DF	NC	DF	DF
	Lecho de río 08	NC	NC	DF	DF	NC	DF	DF
	Coníferas 08	RF	RF	NC	RM	RF	RM	RF
	Bosque nativo 08	RF	RF	DM	NC	RF	RM	RF
	Suelos descubiertos 08	NC	NC	DF	DF	NC	DF	DM
	Matorral 08	RF	RF	DM	DM	RF	NC	RM
	Cultivos agrícolas 08	RF	RF	DF	DF	RM	DM	NC

(RF: recuperación fuerte; RM: recuperación media; NC: no cambio; DM: degradación media; DF: degradación fuerte)

TABLA 2: Fórmulas para el cálculo de métricas de paisaje.
 TABLE 2: Formulae for calculating the landscape metrics.

Fórmula	Descripción	N°
$\text{Área de Clase} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left(\frac{1}{10.000} \right)$; donde a_{ij} = área (m ²) del fragmento i de la clase temática j	[6]
$\text{Número de Fragmentos} = n_j$; donde n_j = número de fragmentos del paisaje de clase temática j	[7]
$\text{Densidad de Fragmentos} = \frac{n_i}{A} (10.000)(100)$; donde A = área total del paisaje (m ²)	[8]
$\text{Relación Perímetro / Área} = \frac{P_{ij}}{a_{ij}}$; donde P_{ij} = perímetro (m) y a_{ij} = área (m ²) del fragmento i de la clase temática j	[9]
$\text{Índice de Forma} = \frac{P_{ij}}{\min P_{ij}}$; donde $\min P_{ij}$ = perímetro mínimo de fragmento de la clase temática j	[10]
$\text{Dimensión Fractal} = \frac{2 \ln(0.25 P_{ij})}{\ln(a_{ij})}$; donde P_{ij} = perímetro (m) y a_{ij} = área (m ²) del fragmento i de la clase temática j	[11]
$\text{Índice de Proximidad} = \sum_{s=1}^n \frac{a_{ijs}}{h_{ijs}^2}$; donde a_{ijs} = área (m ²) del fragmento i de la clase temática j y h_{ijs} = distancia (m) entre el fragmento i y el fragmento vecino a i de la clase temática j, dentro de un radio de búsqueda s	[12]
$\text{Índice de Cohesión} = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij}}{\sum_{j=1}^n P_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} (100)$; donde P_{ij} = perímetro (m), a_{ij} = área (m ²) del fragmento i de la clase temática j y A = área total del paisaje (m ²)	[13]
$\text{Índice de Conectancia} = \left[\frac{\sum_{i \neq k} c_{ikj}}{n_j(n_j - 1)} \right] (100)$; donde c_{ikj} = conexión entre fragmentos i y k (0=no-conectados, 1=conectados) dentro de un umbral de distancia y n_j = número de fragmentos del paisaje de clase temática j	[14]

proceso fue llevado a cabo en el software Fragstats (McGARIGAL et al., 2002), considerando una estructura básica de 4 celdas vecinas (teselas).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación supervisada de imágenes

Como resultado de la corrección atmosférica para las 2 sub-imágenes Landsat-5 TM, se obtuvo una estandarización de los valores de las imágenes tomadas en las distintas fechas (2004 y 2008), eliminando los errores existentes en las imágenes por la condición de la atmósfera. A su vez, como resultado de la corrección geométrica se asignó coordenadas de mapa a las sub-escenas, haciendo posible las operaciones de medición y análisis posteriores. Con ello, se procedió a completar el proceso de clasificación supervisada para cada año según clases temáticas definidas y parcelas de entrenamiento establecidas con apoyo de terreno. Se evaluó la precisión

mediante el coeficiente de Kappa (FLEISS et al., 2003), obteniéndose valores de 0,891 y 0,879 para la clasificación del año 2004 y 2008, además de una precisión global de 91,83% y 91,12% para cada año, respectivamente. A partir de las coberturas digitales fue posible generar cartografía de las categorías en estudio (Figura 3), obteniéndose además un inventario de superficie de las 7 clases propuestas en este trabajo (Tabla 3).

Ambas clasificaciones (2004/2008) presentan diferencias significativas en la cantidad de superficie por clase temática, registrándose una disminución importante de la cubierta de bosque nativo y de matorral, aunque la superficie de suelos desnudos se mantiene relativamente constante. También es posible observar que existe un importante aumento de la superficie plantada de coníferas, siendo ésta la única cobertura vegetal que muestra expansión en el período estudiado. Además, se ha perdido una gran cantidad de superficies de cultivos, lo que hace pensar en condiciones desfavorables para mantener este

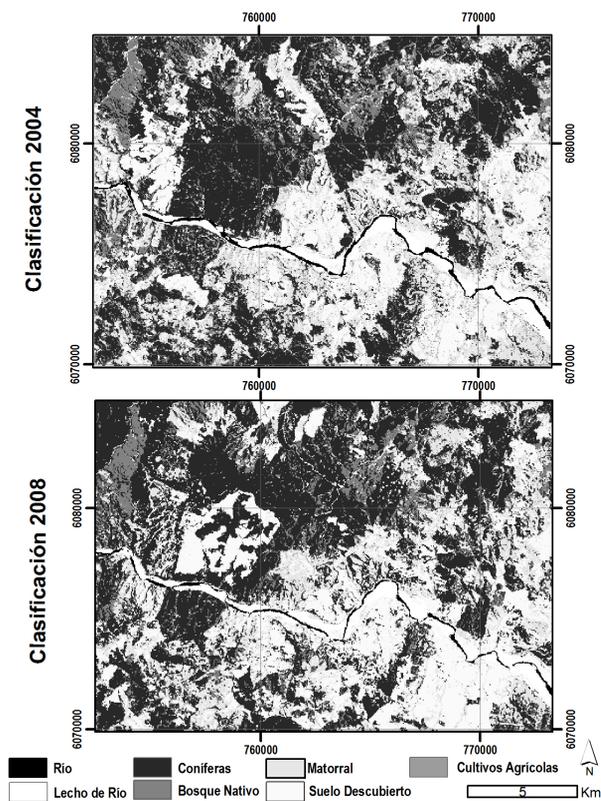


FIGURA 3: Coberturas de uso del suelo obtenidas de las clasificaciones supervisadas 2004 y 2008.

FIGURE 3: Land use coverages obtained from the supervised classifications 2004 and 2008.

TABLA 3: Superficie de clases temáticas clasificadas por año.

TABLE 3: Area of thematic classes classified per year.

Clase temática	Superficie (ha)		Variación (%)
	2004	2008	
Río	352,50	269,56	-23,53
Lecho de río	692,30	779,56	+12,60
Coníferas	11.623,78	13.309,95	+15,51
Bosque nativo	4.255,69	2.697,43	-36,62
Suelos descubiertos	6.734,69	7.121,68	+5,75
Matorral	6.980,80	6.853,37	-1,83
Cultivos agrícolas	487,42	95,62	-80,38

tipo de actividades en la zona del secano interior. Esto se reafirma con el cambio de la clase temática de río que corresponde al disco de agua visible (cauce), el cual registra una reducción de superficie mientras que el lecho de río aumenta en el 2008, año cuando se registra un período de sequía asociada al fenómeno climático la niña (INIA, 2009).

Imagen de detección de cambios RCEN

La Figura 4 corresponde a la imagen de detección de cambios que fue generada por la técnica RCEN a partir de las subescenas Landsat-5 TM. Esta imagen representa zonas de cambio y no cambio clasificadas en 5 categorías de degradación según la magnitud del proceso registrado. De esta forma, una zona de reciente cosecha forestal está catalogada como degradación fuerte; mientras que la conversión de matorral a coníferas es catalogada como recuperación fuerte.

En la Tabla 4 se presenta un detalle de la superficie abarcada por cada categoría. Las grandes superficies de no cambio se encuentran asociados al bosque esclerófilo del secano interior y a plantaciones forestales adultas, las cuales disminuyen su crecimiento promedio anual a través del tiempo. Un marcado crecimiento en las zonas de forestación y reforestación generan un alto valor en la superficie de recuperación fuerte de cobertura vegetal, lo cual se debe a que las plantaciones forestales exóticas presenta un rápido crecimiento anual en sus diez primeros años.

Relación dinámica forestal y topografía

Con la incorporación de un mapa de pendientes generado a partir de las curvas de nivel, se estimaron las superficies correspondientes a las categorías de degradación de la imagen de detección de cambios RCEN, según rangos de pendiente (Figura 5). Se puede apreciar que la mayor super-

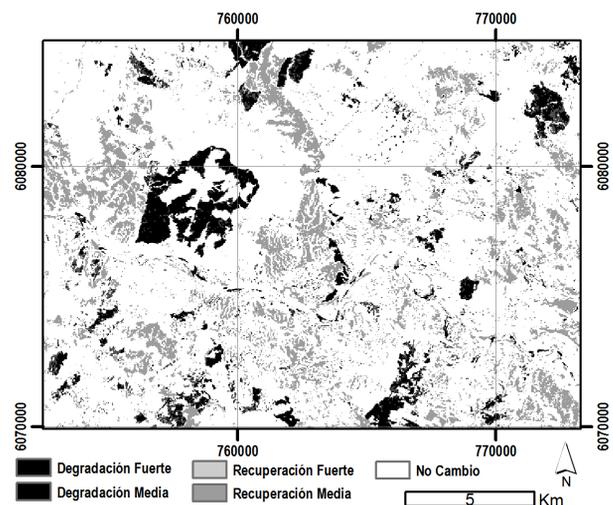


FIGURA 4: Imagen de detección de cambios RCEN.

FIGURE 4: RCNA change detection image.

TABLA 4: Superficie de categorías de degradación de imagen de detección de cambios RCEN.

TABLE 4: Area of categories of degradation according to RCNA change detection image.

Categoría de degradación	Superficie (ha)
Degradación fuerte	1.781,91
Degradación media	1.224,99
No cambio	24.346,08
Recuperación media	3.774,06
Recuperación fuerte	0,00

ficie del área de estudio se encuentra en el rango de 0-15%, lo que incluye zonas planas de praderas, matorral y lecho de río. En términos generales, la categoría de degradación que tiene mayor superficie en los distintos rangos considerados, corresponde a no cambio. Por otra parte, se observa una relación inversa entre el porcentaje de pendiente y la dinámica del paisaje, ya que a mayor porcentaje, las superficies asociadas a cambio, disminuyen. Así también, se puede apreciar una importante superficie de recuperación y degradación de la masa boscosa en los sectores con pendientes menores al 30%, evidenciando la actividad forestal productiva del sector.

Tabulación cruzada de clasificación 2004 y 2008

La Figura 6 muestra las zonas dentro del área de estudio donde el Catastro de Bosque Nativo de CONAF, indica la presencia de formaciones vegetales nativas. Se incluye además el tipo bosque de especies exóticas asilvestradas, debido a que éstas se encuentran mezcladas con especies nativas en

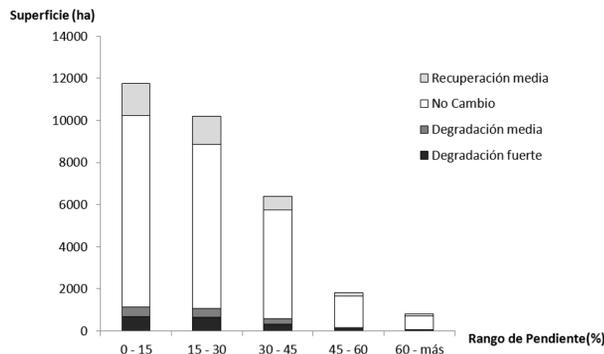


FIGURA 5: Distribución de superficies por categorías de degradación según rangos de pendiente.

FIGURE 5: Distribution of areas per categories of degradation according to slope ranges.

una gran proporción. Considerando estas zonas, se realizó una tabulación cruzada o intersección de las coberturas de clasificación 2004 y 2008, para establecer la dinámica entre clases temáticas y la concordancia con la superficie delimitada por el catastro de CONAF.

En la Tabla 5 se muestra el resultado de la tabulación cruzada dentro del área considerada como formaciones vegetales nativas (12.450,91 hectáreas), en donde se detalla el cambio o redistribución de las clases temáticas desde el año 2004 al año 2008. Los recuadros resaltados en diagonal corresponden a la superficie que ha mantenido el mismo uso entre esos años (no cambio); mientras que los recuadros sobre o bajo éstos, corresponden a superficie de otras clases temáticas que pasan a la clase cabecera correspondiente. Se puede apreciar que dentro del espacio considerado como formaciones vegetales nativas, la clasificación supervisada en los dos años arroja presencia de coníferas (especie exótica) con una importante superficie en crecimiento. Esta situación se puede explicar porque la delimitación de bosques del catastro de CONAF fue realizada el año 1999, con lo que existe un período de 5 y 9 años de diferencia con respecto a las imágenes satelitales utilizadas. Otro motivo puede ser la expansión del tipo bosque de exóticas asilvestradas, que está compuesto por una mezcla de bosque nativo y de coníferas, que pudo ser clasificada dentro de esta última clase temática. Finalmente, existe una gran superfi-

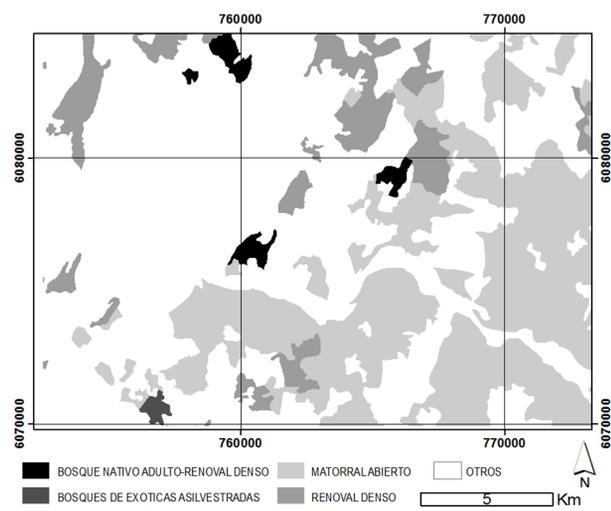


FIGURA 6: Presencia de formaciones vegetales nativas según catastro de bosque nativo de CONAF 1999.

FIGURE 6: Native vegetation areas according to native forest cadaster of CONAF 1999.

TABLA 5: Tabulación cruzada entre la clasificación supervisada 2004 y 2008, para el espacio delimitado como formaciones vegetales nativas en catastro de CONAF.

TABLE 5: Cross tabulation between supervised classifications 2004 and 2008, for the space delimited as native vegetation by the cadaster of CONAF.

		Clasificación 2004 (ha)							
Clase temática		Río 04	Lecho de río 04	Coníferas 04	Bosque nativo 04	Suelo descubiertos 04	Matorral 04	Cultivos agrícolas 04	TOTAL
Clasificación 2008 (ha)	Río 08	53,24	0,86	0,19	0,00	1,06	0,10	0,00	55,45
	Lecho de río 08	4,04	60,45	0,77	0,38	16,14	1,54	0,10	83,42
	Coníferas 08	1,35	0,10	1.926,32	708,83	399,78	749,10	9,42	3.794,89
	Bosque nativo 08	0,00	0,00	284,94	817,14	23,16	325,78	1,06	1.452,07
	Suelos descubiertos 08	10,67	20,47	253,42	70,63	2.413,74	788,98	104,94	3.662,85
	Matorral 08	0,38	1,35	325,97	344,61	769,28	1.744,60	161,54	3.347,74
	Cultivos agrícolas 08	0,00	0,00	2,02	2,40	9,90	22,30	7,88	44,49
	Total	69,67	83,22	2.793,63	1.944,01	3.633,06	3.632,39	284,94	12.440,91

cie de suelo de las clases de bosque nativo, matorral y suelos descubiertos que han sido reconvertidas a plantaciones forestales (coníferas).

Mediante el estadístico de Kappa, se pudo establecer la concordancia para la tabulación cruzada entre los años 2004 y 2008. Se obtuvo un valor de 0,42 que indica un nivel moderado de coincidencia entre una fecha y otra, lo cual establece una dinámica significativa de cambio entre las clases temáticas. Si se considera el área de estudio completa (31.127,17 ha), el valor de Kappa baja a un 0,36 (nivel débil de coincidencia entre una fecha y otra), lo cual implica una mayor dinámica fuera del espacio considerado como formaciones vegetales nativas en el catastro CONAF. La Figura 7 detalla el nivel de estabilidad dentro y fuera del espacio considerado como formaciones vegetales nativas, donde queda claramente establecida una mayor estabilidad de las clases de bosque nativo, suelo descubierto y matorral, reflejando un mayor nivel de protección de estos espacios.

Comparativa entre imágenes de cambio según tabulación cruzada 2004/2008 y técnica RCEN

De acuerdo a las imágenes de detección de cambios 2004/2008 y RCEN, las cuales representan la dinámica del paisaje en términos de recuperación, degradación y no cambio, se generó un gráfico comparativo entre las superficies totales por categoría de degradación (Figura 8). Se puede apreciar que en general ambas metodologías arrojan una tendencia similar en cuanto al comportamiento de cambio registrado en la zona de estudio. Las diferencias

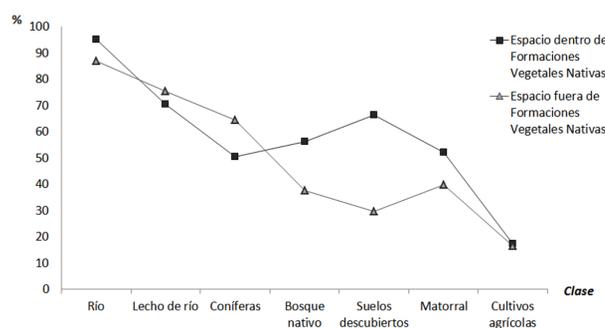


FIGURA 7: Nivel de estabilidad (no cambio) de clases temáticas.

FIGURE 7: Stability level (no change) for thematic classes.

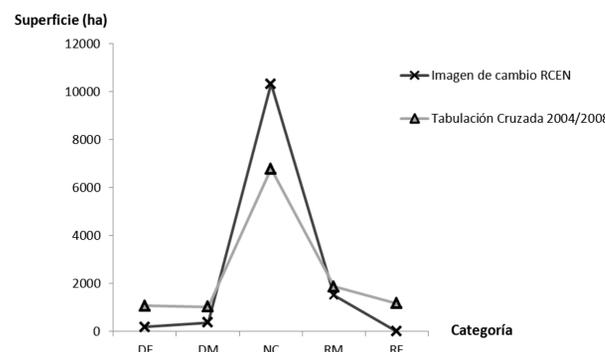


FIGURA 8: Superficies obtenidas por técnica RCEN y por tabulación cruzada de clasificaciones 2004/2008.

FIGURE 8: Areas obtained by RCNA technique and cross tabulation of classifications 2004/2008.

existentes en las categorías se resumen en mayores superficies de cambio, sean de degradación o recuperación, identificadas por la imagen de tabulación cruzada 2004/2008, lo cual está indicando solo diferencias en el umbral de cambio considerado en cada caso.

Índices de fragmentación

Los índices de fragmentación se calcularon para las clases temáticas de mayor interés (coníferas, bosque nativo y matorral), a partir de los resultados de las clasificaciones 2004 y 2008. En la Tabla 6 se puede ver el desglose de los valores para las categorías en cuestión. Se observa claramente que existe una disminución del número fragmentos y de la superficie ocupada por el bosque nativo; mientras que las clases de coníferas y matorral muestran estabilidad en el tiempo. Esto se ratifica con la densidad de fragmentos (DF), dónde sólo bosque nativo muestra cambios significativos durante el período, tendiendo al descenso del valor.

En la Tabla 7, se aprecia que existe una disminución del área promedio de los fragmentos de bosque nativo, confirmando una desfavorable evo-

lución de la clase temática en el tiempo. Notable es el coeficiente de variación del área de coníferas, explicado por la existencia de polígonos de plantaciones de gran extensión así como también, pequeños fragmentos de la especie, lo cual se dimensiona con el parámetro de rango.

En cuanto a la relación perímetro/área, se aprecia que la clase bosque nativo presenta los valores de media más altos, lo que supone mayor complejidad en la forma de los fragmentos de bosque nativo con respecto a las otras clases. Sin embargo, la tendencia en el tiempo indica que aumenta la complejidad para las clases de coníferas y matorral, mientras que disminuye para el bosque nativo, lo que lleva a pensar en un proceso de simplificación de los polígonos de esta última clase. Esta primera impresión se corrige y clarifica con los índices de forma y de dimensión fractal que elimina el efecto de magnitud o tamaño de los polígonos analizados. De esta forma, se puede establecer que en términos de complejidad de forma de los fragmentos, la clase de matorral presenta el valor más alto seguido de coníferas y finalmente por bosque nativo. Esta última es la clase con polígonos más simples, situación que se mantiene relativamente estable en el tiempo.

TABLA 6: Número, área y densidad de fragmentos por clase temática para las clasificaciones supervisadas.
TABLE 6: Amount, area and density of patches at thematic class level for the supervised classifications.

Clase temática	2004			2008		
	Número	Área (ha)	DF (NP/100ha)	Número	Área (ha)	DF (NP/100ha)
Coníferas	5.171	11.623,77	16,61	5.219	13.309,94	16,76
Bosque nativo	11.115	4.255,69	35,70	5.955	2.697,43	19,13
Matorral	7.063	6.980,80	22,69	7.769	6.853,37	24,95

TABLA 7: Índices a nivel de fragmentos para las clasificaciones supervisadas.
TABLE 7: Landscape metrics at patch level for the supervised classifications.

Índice	Clase temática	2004				2008			
		Media	Mediana	Rango	CV (%)	Media	Mediana	Rango	CV (%)
Área (ha)	Coníferas	2,247	0,096	2.877,04	2.128,42	2,550	0,096	5.564,28	3.128,50
	Bosque nativo	0,382	0,096	235,15	763,18	0,453	0,096	313,18	964,98
	Matorral	0,988	0,192	249,66	591,19	0,882	0,096	229,39	674,61
Razón perímetro / area	Coníferas	1.057,787	1.290,322	1.154,11	27,80	1.060,729	1.290,322	1.175,31	27,84
	Bosque nativo	1.081,124	1.290,322	1.100,04	23,53	1.072,472	1.290,322	1.115,37	25,01
	Matorral	1.010,610	967,741	1.061,82	30,26	1.028,362	1.290,322	1.101,07	29,05
Índice de forma	Coníferas	1,142	1,000	17,21	52,36	1,141	1,000	25,93	52,87
	Bosque nativo	1,084	1,000	6,82	25,38	1,092	1,000	6,68	26,01
	Matorral	1,176	1,000	9,32	45,63	1,163	1,000	9,81	43,29
Dimensión fractal	Coníferas	1,025	1,000	0,334	4,23	1,025	1,000	0,36	4,25
	Bosque nativo	1,021	1,000	0,300	3,50	1,022	1,000	0,28	3,61
	Matorral	1,031	1,015	0,333	4,71	1,029	1,000	0,32	4,60

Los índices de proximidad y conectividad muestran el patrón o distribución espacial de los fragmentos dentro de cada clase, el cual depende del nivel de especialización de la especie y de su capacidad de dispersión. Como se muestra en la Tabla 8, la clase de bosque nativo presenta los valores más bajos para el índice de proximidad, indicando una condición de fuerte aislamiento de los fragmentos. Esto se confirma con el índice de cohesión donde también la clase de bosque nativo registra los valores más bajos, indicando una distribución dispersa de los fragmentos que la componen. Se puede apreciar un leve aumento de los índices mencionados para la clase, lo cual está indicando una leve tendencia a la concentración de fragmentos de bosque nativo, ratificado en el aumento del índice de conectancia que refleja las uniones entre elementos de una misma clase. Finalmente, resulta interesante el contraste de la clase de bosque nativo con la clase de coníferas (plantaciones exóticas) que registran los valores más altos para los índices mencionados, representando una clase altamente compacta y conectada.

TABLA 8: Índice de proximidad y conectividad por clase temática para las clasificaciones supervisadas.

TABLE 8: Proximity and connectivity indexes at thematic class level for supervised classifications.

Índice	Clase temática	2004	2008
Proximidad (radio de búsqueda: 1.000 m)	Coníferas	1.049,589	3.123,315
	Bosque Nativo	16,610	16,427
	Matorral	62,409	67,150
Cohesión	Coníferas	98,129	98,871
	Bosque Nativo	78,970	82,667
	Matorral	90,638	90,390
Conectancia (umbral de distancia: 1.000 m)	Coníferas	1,318	1,370
	Bosque Nativo	1,182	1,324
	Matorral	1,192	1,145

CONCLUSIONES

El uso de imágenes satelitales, procesadas mediante técnicas geomáticas, facilita la detección de cambios para la evaluación de paisajes forestales en términos de degradación y recuperación de masa boscosa a través del tiempo, obteniendo buenos resultados para estudios de escala media.

Las dos metodologías aplicadas, tabulación cruzada de clasificaciones supervisadas y técnica

RCEN, ofrecen resultados similares y adecuados para delimitar categorías de degradación de coberturas vegetales. La primera metodología permite un nivel de análisis más detallado de clases temáticas; mientras que RCEN ofrece procedimientos digitales más simples y rápidos de ejecutar.

La integración de geo-información de apoyo, tal como coberturas de catastro de bosque nativo existente, modelos digitales del terreno (MDT) y generación de rangos de pendiente, junto con el cálculo de métricas de paisaje, mejoran considerablemente el análisis de los resultados a través de SIG en la evaluación de los cambios producidos sobre la superficie terrestre y en especial de las coberturas vegetales.

La zona de estudio presenta un notable aumento de la superficie de coníferas, junto con una importante disminución de la superficie de bosque nativo y matorral. En general, se establece un nivel de permanencia o no cambio de 53,73%, indicando una alta dinámica de la zona de estudio explicada por la fuerte actividad forestal. Se constata que la estabilidad es mayor dentro de la zona considerada como formaciones vegetales nativas (catastro CONAF) que fuera de estos espacios, reflejando un nivel de protección.

Existe una relación inversa entre el rango de pendiente y la dinámica del paisaje, esto es que a mayor porcentaje de pendiente, disminuyen las superficies asociadas a cambio. Así también, se aprecia una mayor superficie de cambio (recuperación y degradación) en los sectores con pendientes menores al 30%, evidenciando la existencia de un alto grado de actividad forestal en el sector, cuyos ciclos de crecimiento y corta son muy dinámicos.

Los índices de fragmentación permiten establecer una similitud de la estructura del paisaje entre esos años, aun cuando existe una importante dinámica de cambio. Sin embargo es posible describir una evolución desfavorable de la clase temática de bosque nativo, la cual pierde número y superficie de fragmentos (y por ende densidad) en el período analizado, junto con una tendencia a la concentración de fragmentos en grupos aislados entre sí, situación contraria a las plantaciones de exóticas altamente compactas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSQUE, J. et al. **Sistemas de información geográfica con PC ARC/INFO e IDRISI**. Madrid: RAMA. 1994. 478 p.

- CHÁVEZ, P. S. Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, n. 9, p. 1025-1036, 1996.
- CONAF-CONAMA. **Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe Regional Séptima Región**. Santiago, 1999. 171 p.
- COPPIN, P. et al. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1565-1596, 2004.
- CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). **Diagnóstico de la desertificación en Chile**. Santiago: Ministerio de Agricultura, 1997. 399 p.
- DONOSO, C.; LARA, A. Utilización de los bosques nativos en Chile: pasado, presente y futuro. En: Armesto, J.J.; Villagrán, C.; Arroyo, M.T.K. (eds). **Ecología de los bosques nativos de Chile**. Santiago, Ed. Universitaria. 1995. p. 367-387.
- DONOSO, P.; OTERO, L. Hacia una definición de país forestal: Dónde se sitúa Chile? **Revista Bosque**, v. 26, n. 3, p. 5-18, 2005.
- ECHEVERRÍA, C. et al. Spatial and temporal patterns of forest loss and fragmentation in Mexico and Chile. In: Newton, A. **Biodiversity loss and conservation in fragmented forest landscapes: the forest of montane Mexico and temperate South America**. Londres, Bournemouth University. 2007. 432 p.
- ERDAS. **Erdas Field Guide**. USA. 2010. 812 p. Disponible en: <http://www.erdas.com/Libraries/Tech_Docs/ERDAS_Field_Guide.sflb.ashx> Visitado el: 11 enero 2011.
- FAHRING, L. Effect of habitat fragmentation on biodiversity. **Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics**, v. 34, p. 487-515, 2003.
- FLEISS, J.; LEVIN, B.; CHO PAIK, M. **Statistical methods for rates and proportions**. New York, Wiley. 2003. 800 p.
- GRAÇA, P. M. L. et al. Detecção de corte seletivo de madeira por técnica de rotação radiométrica na floresta Amazônica. **Revista Ambiente**, v. 4, p. 97-106, 2008.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (INIA). **Informe Nacional Agrometeorológico**. Santiago, Ministerio de Agricultura de Chile. 2009. 104 p.
- LI, H.; REYNOLDS, J. F. A new contagion index to quantify spatial patterns of landscapes. **Landscape Ecology**, v. 8, p. 155-162, 1993.
- MALDONADO, F. D.; SANTOS, J. R. Metodología de cambios utilizando técnicas de rotación radiométrica. En: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, Brasil. INPE, p. 601-608.
- MALDONADO, F. D.; SANTOS, J. R.; GRAÇA, P. M. L. Change detection technique based on the radiometric rotation controlled by no-change axis, applied on a semi-arid landscape. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 8, p. 1001-1016, 2007.
- MCGARIGAL, K. et al. **FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps**. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. 2002. Disponible en: <<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>> Visitado el: 15 de noviembre 2010.
- MENA, C. et al. Caracterización y monitoreo de paisaje semiárida en la Región del Maule mediante datos satelitales. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 6, p. 660-668, 2010.
- MENA, C. **Geomática para la ordenación del territorio**. Talca, Universidad de Talca. 2005. 314 p.
- MIDEPLAN (Ministerio de planificación y desarrollo). **Recursos naturales, pobreza y desarrollo**. 1993. 113 p.
- OLSON, D.; DINERSTEIN, E.; WIKRAMAYAKE, E. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. **BioScience**, n. 51, p. 933-938, 2001.
- PAUCHARD, A.; AGUAYO M.; ALABACK, P. Cuantificando la fragmentación del paisaje: las métricas y sus significados ecológicos. En: Grez, A., Simonetti, J., Bustamante, R. (eds). **Biodiversidad en ambientes fragmentados de Chile: patrones y procesos a diferentes escalas**. Santiago, Editorial Universitaria. 2006. p. 41-67.
- PRIMACK, B. **Essentials of conservation Biology**. 2nd ed. Massachusetts: Ed. Sinauer. 1998. 660 p.
- SANTIBÁÑEZ, F.; PARADA, M.; ULRIKSEN, P. **Perspectivas de Desarrollo de los Recursos de la VII Región. Distritos Agroclimáticos**. 1979. 155 p.
- SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, n. 10, p. 989-1003, 1989.
- TURNER, M. G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. **Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics**, v. 20, p. 171-197, 1989.