

EFECTO DE LAS ÁREAS DE ENTRENAMIENTO Y MÉTODO DEL ÁRBOL PARA UNA CLASIFICACIÓN PRECISA EN BOSQUES PRIMARIOS DE *Araucaria* Y *Nothofagus* EN EL SUR DE CHILE: USO DE DATOS LANDSAT E INFORMACIÓN AUXILIAR

Nelson Ojeda Ojeda, Miguel Herrera Machuca, Ramiro Bustamante Araya, Luis Morales Salinas, Rubén Carrillo Lopez, León Bravo Ramírez, Alejandro Espinosa Sepúlveda, Zoia Neira Ceballos, Soraya Calzadilla Albornoz y Jesús San-Miguel Ayanz

RESUMEN

En el mundo se realizan esfuerzos para clasificar el bosque nativo y así conocer su composición, estructura y distribución para poder ejercer sobre ellos un mejor manejo. Los bosques de *Araucaria* araucana tienen relevancia ecológica porque son milenarios y su distribución es muy reducida, en Chile y Argentina, justificando así la realización de la presente investigación. Este estudio plantea como objetivo clasificar a una escala fina y media los ecosistemas de *Araucaria* y *Nothofagus* del Sur de Chile. Para ello se utilizan sensores remotos y se aplica una clasificación biunívoca-combinada y el método del árbol, logrando así una descripción detallada. La información auxiliar utilizada fue: cartografía del Parque Nacional Conguillío, Modelo Digital de Elevación e Índices de Vegetación.

Se utilizaron imágenes Landsat-8 OLI del año 2013 con resolución espacial de 30x30m. Se efectuaron 260 parcelas de inventario forestal y los datos fueron analizados con los programas Idrisi Kilimanjaro, ArcGis 8.0 y SPSS. De la clasificación supervisada se obtuvieron 23 categorías cuya precisión global fue de 75,0%. La precisión de los bosques fue de un 74,6%; hierbas y arbustos, 80,5%; suelo con escasa vegetación, 84,95%; nieve, 95,1%; escoria y lava volcánica, 73,03%; agua, 73,0%. A partir de la aplicación conjunta de los métodos clasificación biunívoca-combinada y del árbol, se clasificaron ecosistemas de *Araucaria* y *Nothofagus* a escalas fina y media y cuyo mapa final permite efectuar un mejor manejo de estos.

Introducción

Es necesario conocer mejor la estructura y composición del bosque nativo a una escala fina y media y en extensas superficies, para poder ejercer sobre estos ecosistemas un mejor manejo. Se han efectuado clasificaciones de bosques con imágenes satelitales, con la limitante que se han seleccionado píxeles que son poco representativos de las áreas de entrenamiento; es decir, al momento de seleccionar en forma repetida

grupos de píxeles de aquellas áreas que son de interés, éstas no representan bien las categorías. A pesar de esta situación, son escasas las investigaciones en ecosistemas boscosos en las cuales se analice el efecto que tienen estas áreas de entrenamiento en la calidad de una clasificación digital, como tampoco en la determinación del número óptimo de clases (Wright y Gallant, 2007). La presente investigación incursiona en una aplicación conjunta de los métodos de clasificación

biunívoca y del árbol, para evaluar si un único ND (número digital ó valor espectral de un píxel), un rango de NDs o la combinación de ellos entregan una mejor relación entre las clases espectrales y las informacionales (clase que representa fielmente la realidad).

Hay diferentes criterios de clasificación en los cuales participan clases informacionales y espectrales. Además, es complejo relacionar cada ND a su correspondiente clase informacional.

La cartografía de vegetación de Chile se ha efectuado, por un lado, a escalas gruesas de biogeografía abarcando amplios sectores y, por otro lado, a escala fina de predio en áreas reducidas. Por lo tanto, ha faltado un mapeo a escala fina y media que cubra áreas extensas a partir de las cuales se puedan tomar decisiones y orientar un manejo más sustentable (Pliscoff y Luebert, 2006).

En la presente investigación se propone mapear ecosistemas

PALABRAS CLAVE / *Araucaria* / Árbol de Clasificación / Clase Espectral e Informacional / Clasificación Supervisada / Escala Fina y Media / Landsat / *Nothofagus* /

Recibido: 23/05/2018. Modificado: 14/06/2019. Aceptado: 20/06/2019.

Nelson Ojeda Ojeda. Doctor Ingeniero de Montes, Universidad de Córdoba (UCO), España. Profesor, Universidad de La Frontera (UFro), Chile. Dirección: Departamento de Ciencias Forestales, UFro. Casilla 54-D, Temuco, Chile. e-mail: nelson.ojeda@ufrontera.cl

Miguel Herrera Machuca. Doctor Ingeniero de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, España. Profesor, UCO, España. e-mail: mherrera@uco.es

Ramiro Bustamante Araya. Doctor en Ciencias, Universidad de Chile (UCHile). Profesor, UChile. e-mail: rbustama@uchile.cl

Luis Morales Salinas. Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Chile. Profesor, UChile. e-mail: lmorales@renare.uchile.cl

Rubén Carrillo Lopez. Magister en Ciencias, mención Botánica, Universidad Austral de Chile. Profesor, UFro, Chile. e-mail: ruben.carrillo@ufrontera.cl

León Bravo Ramírez. Doctor en Ciencias, UChile. Profesor, UFro, Chile. e-mail: leon.bravo@ufrontera.cl

Alejandro Espinosa Sepúlveda. Doctor Ingeniero de Montes, UCO, España. Profesor, UFro, Chile. e-mail: alejandro.espinosa@ufrontera.cl

Zoia Neira Ceballos. Doctor en Recursos Naturales y Sostenibilidad, UCO, España. Profesor, UFro, Chile. e-mail: zoia.neira@ufrontera.cl

Soraya Calzadilla Albornoz. Técnico Forestal, Pontificia Universidad Católica, Temuco, Chile. Apoyo investigación, UFro, Chile. e-mail: soraya.calzadilla@ufrontera.cl

Jesús San-Miguel Ayanz. Doctor en Teledetección y SIG, University of California at Berkeley (EEUU). Investigador, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, European Commission, Italy. e-mail: jesus.san-miguel@ec.europa.eu

EFFECT OF THE TRAINING AREAS AND TREE METHOD FOR CLASSIFICATION ACCURACY IN PRIMARY FORESTS OF *Araucaria* AND *Nothofagus* IN THE SOUTH OF CHILE: USE OF LANDSAT DATA AND AUXILIARY INFORMATION

Nelson Ojeda Ojeda, Miguel Herrera Machuca, Ramiro Bustamante Araya, Luis Morales Salinas, Rubén Carrillo Lopez, León Bravo Ramírez, Alejandro Espinosa Sepúlveda, Zoia Neira Ceballos, Soraya Calzadilla Albornoz and Jesús San-Miguel Ayanz

SUMMARY

Much effort is being made around the world to classify the native forest so as to better know its composition, structure and distribution in order to exercise a better management over them. The *Araucaria araucana* forests have ecologic relevance because they are millenary and its distribution in Chile and Argentina is quite reduced, which justifies the execution of the present investigation. This study proposes as its objective to classify at fine and medium scales the *Araucaria* and *Nothofagus* ecosystems of the south of Chile. To do this, remote sensors were used, applying a biunivocal-combined classification and the tree method, obtaining a detailed description. Auxiliary information used was: cartography of the Conguillío National Park, Digital Elevation Model and Vegetation Indexes.

Also, Landsat-8 OLI Images from 2013, with spatial resolution of 30x30m, were used. Two hundred and sixty forestry inventory plots were carried out and the data were analyzed with the Idrisi Kilimanjaro, ArcGis 8.0 and SPSS programmes. The categories obtained from this supervised classification were 23, which had 75.0% of global accuracy. The accuracy for forests was 74.6%, for grass and bushes 80.5%, for soil with scarce vegetation 84.95%, for snow 95.1%, for volcanic lava 73.3%, and for water was 73.0%. Thus, the *Araucaria* and *Nothofagus* ecosystems were classified using this joined application of bi-univoca-combined method and the tree method. This was done at a fine and medium scales. The final map allows to carry out a much better management of these ecosystems.

EFEITO DAS ÁREAS DE TREINAMENTO E MÉTODO DA ÁRVORE PARA UMA CLASSIFICAÇÃO PRECISA EM BOSQUES PRIMÁRIOS DE *Araucaria* E *Nothofagus* NO SUL DO CHILE: USO DE DADOS LANDSAT E INFORMAÇÃO AUXILIAR

Nelson Ojeda Ojeda, Miguel Herrera Machuca, Ramiro Bustamante Araya, Luis Morales Salinas, Rubén Carrillo Lopez, León Bravo Ramírez, Alejandro Espinosa Sepúlveda, Zoia Neira Ceballos, Soraya Calzadilla Albornoz e Jesús San-Miguel Ayanz

RESUMO

Esforços são realizados no mundo para classificar o bosque nativo e assim conhecer sua composição, estrutura e distribuição para poder exercer sobre eles melhor gerenciamento. Os bosques de *Araucaria araucana* têm relevância ecológica porque são milenares e sua distribuição é muito reduzida no Chile e Argentina, justificando assim a realização da presente investigação. Este estudo coloca como objetivo classificar em uma escala fina e média os ecossistemas de *Araucaria* e *Nothofagus* do Sul do Chile. Para isto são utilizados sensores remotos e aplicada uma classificação biunívoca-combinada e o método da árvore, obtendo assim uma descrição detalhada. A informação auxiliar utilizada foi: cartografia do Parque Nacional Conguillío, Modelo Di-

gital de Elevação e Índices de Vegetação. Utilizaram-se imagens Landsat-8 OLI do ano 2013 com resolução espacial de 30x30m. Efetuaram-se 260 parcelas de inventário florestal e os dados foram analisados com os programas Idrisi Kilimanjaro, ArcGis 8.0 e SPSS. Da classificação supervisionada foram obtidas 23 categorias cuja precisão global foi de 75,0%. A precisão dos bosques foi de 74,6%; ervas e arbustos, 80,5%; solo com escassa vegetação, 84,95%; neve, 95,1%; escória e lava vulcânica, 73,03%; água, 73,0%. A partir da aplicação conjunta dos métodos classificação biunívoca-combinada e da árvore, se classificaram ecossistemas de *Araucaria* e *Nothofagus* nas escalas fina e média e cujo mapa final permite efetuar um melhor manejo destes.

templados de *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch, por la importancia ecológica que poseen en Chile y el mundo. Muchos de los árboles de esta especie sobrepasan los 1.000 años de edad y constituyen una fuente única de recursos genéticos. Son endémicos del sur de Chile y escasos en Argentina (Echeverría *et al.*, 2006). Actualmente está catalogada como especie en peligro (UICN, 2013).

El satélite Landsat ha sido de gran utilidad para el reconocimiento, análisis y cartografía de

la cobertura de la tierra (Salovaara *et al.*, 2005), razón por la que se utilizó en este estudio.

A través del proyecto CONAF-CONAMA-BIRF (2012) se llevó a cabo el 'catastro' en todo Chile para mapear la vegetación del país con imágenes satelitales, y por la gran amplitud de la superficie estudiada se aplicó un método de clasificación simple en el cual un rango de ND representara la clase informacional. La principal dificultad que tuvo fue la selección de los

píxeles y la falta de datos de terreno.

La presente investigación plantea como objetivo clasificar a una escala fina y media extensas superficies con ecosistemas de *Araucaria* y *Nothofagus* presentes en el Parque Nacional Conguillío (en adelante PN Conguillío) localizados en el sur de Chile, utilizando para ello información derivada del satélite Landsat-8 OLI y aplicando una clasificación biunívoca-combinada y el método del árbol. Se logra así una descripción más

completa y detallada que los mapas preexistentes, orientando de esta manera su manejo.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área corresponde al PN Conguillío, localizado en el centro-sur de Chile, a 200km al este de la ciudad de Temuco, entre los 38°30' y 38°45'S y los 71°30' y 71°45'O (Figura 1). Comprende una superficie de 66.829ha.

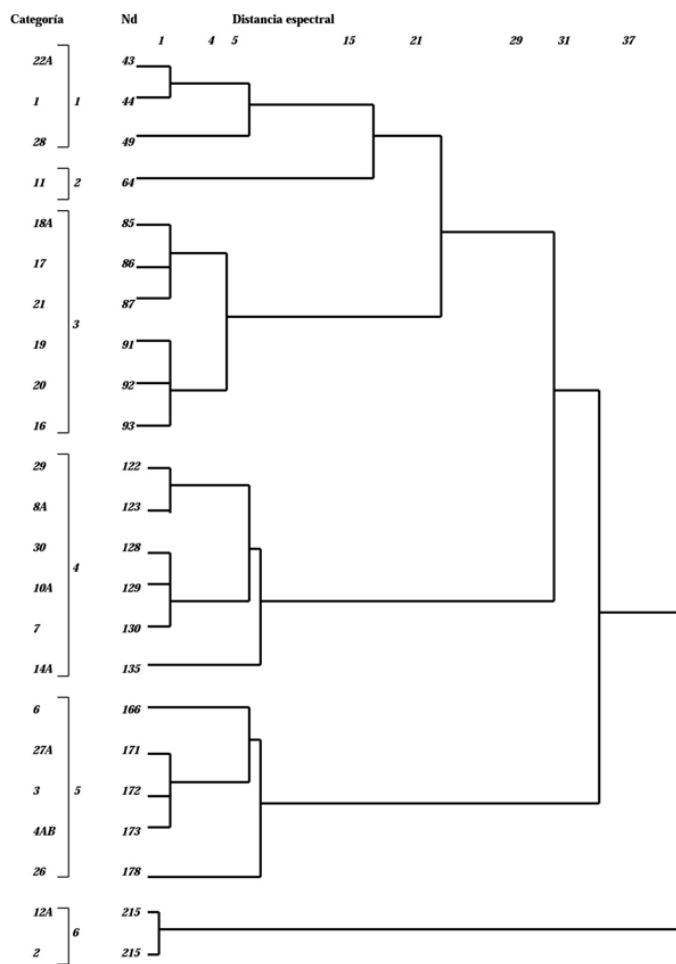


Figura 1. Árbol de clasificación con 23 categorías derivadas desde las bandas OLI 234.

Adquisición de datos y selección de bandas

Se utilizaron imágenes Landsat 8 sensor OLI fechada en noviembre 2013, con una resolución espacial de 30x30 m. La supervisión de terreno se efectuó durante el año 2014. Las bandas utilizadas fueron: OLI 2 (0,45-0,51µm; azul); OLI 3 (0,53-0,5µm; verde); OLI 4 (0,63-0,67µm; rojo); OLI 5 (0,85-0,87µm; infrarrojo cercano); OLI 6 (1,56-1,65µm; infrarrojo medio) y OLI 7 (2,1-2,29µm; infrarrojo medio-2). Para georeferenciarlas se utilizaron el Elipsoide Internacional de 1924, el Datum Provisorio Sudamericano La Canoa de Venezuela de 1956 y el Huso 19. Para seleccionar las bandas más adecuadas para la clasificación se utilizó el método gráfico de firmas espectrales,

componentes principales (CP) y vectores propios, los cuales permiten seleccionar las bandas más idóneas (Eastman, 2012). De acuerdo a Congalton *et al.* (1993) es necesario detectar la información que es redundante, debido a que algunos tipos de cubiertas tienden a presentar un comportamiento similar en regiones próximas del espectro. El análisis de CP permite sintetizar las bandas originales, creando nuevas bandas, los componentes principales de la imagen (Conesse y Maselli, 1993). A partir del análisis de la varianza y covarianza de las bandas del satélite se seleccionan los primeros CP. El sentido espectral de estos componentes se obtiene a partir de la correlación entre los CP y los autovalores. Con el criterio de los CP y los vectores propios se seleccionan las bandas más idóneas.

Realces y mejoras de la imagen satelital

De acuerdo a Chavez (1996) la imagen satelital se corrige atmosféricamente para reducir el incremento de la radiación absorbida por el sensor así reducir el efecto negativo de las partículas en la atmosfera y la imagen satelital. La corrección geométrica es para que calcen los píxeles con las coordenadas geográficas. Con el filtrado se aíslan los componentes que son de interés, de esta manera se refuerzan o suavizan los contrastes de la imagen y los NDs. El ajuste de contraste, en este caso el ecualizador del histograma, es de gran utilidad porque permite adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad que posee el monitor de visualización, práctica que es vital para interpretar mejor la información registrada del ecosistema natural. Para reducir el efecto causado por el relieve se aplicó un modelo de iluminación el cual se deriva del Modelo Digital de Elevación (DEM, del inglés *Digital Elevation Model*) (Riaño *et al.*, 2003).

Criterios para áreas de entrenamiento y agrupamiento de clases

Para evitar problemas de autocorrelación espacial se extrajeron píxeles dispersos; es decir, de varios campos (Brown *et al.*, 2009). Se utilizó un mínimo de 70 píxeles por cada clase espectral. La aplicación del método del árbol permitió realizar la clasificación inicial con un tamaño mínimo y un número máximo de clases (Comber *et al.*, 2012; Khatami *et al.*, 2017). Los criterios utilizados para la selección de los píxeles fueron: a) píxeles de un único ND y/o rango de NDs; en muestras reducidas se escogió un único ND, en cambio donde existe un grupo de píxeles y variabilidad espectral es preferible seleccionar un rango espectral el cual será más representativo de la categoría, b) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, del inglés *Normal*

Difference Vegetation Index); este índice se aplicó como apoyo a la selección de los píxeles para diferenciar pastos, matorrales y bosque; vegetación vigorosa ó estresada, c) DEM, de acuerdo a la altitud es posible relacionar un píxel y su correspondencia con la vegetación, d) disposición espacial de los píxeles; si los píxeles de interés se disponen en forma discontinua en pequeños grupos y aislados, se escogen algunos pocos y con escasa variabilidad espectral, por el contrario, si son muchos los píxeles y presentan continuidad en el espacio, es posible seleccionar un número mayor de píxeles y con mayor variabilidad espectral.

El método del árbol aplicado aquí se basa en la separación o distancia espectrales que se produce entre las distintas clases involucradas y por la confusión espectral que presentan los distintos píxeles y clases. Una vez identificadas las clases de interés, éstas se separan y agrupan con la finalidad de representarlas en un árbol definitivo, dichas clases son fieles representantes de las clases informacionales (Hansen *et al.*, 1996; Wright y Gallant, 2007).

Selección de los lugares de muestreo y parcelas en bosques

El muestreo de parcelas con bosque nativo se efectuó en el año 2014. Los criterios utilizados son: a) topografía (rango de altitud), b) formación geológica, c) composición de especies, d) formación vegetal, e) superficie, f) importancia ecológica, g) disposición espacial de los píxeles, h) tipo de cobertura (lava, suelo, agua, vegetación, suelo-vegetación) (Beaubien *et al.*, 1999). Para describir la estructura y composición de los bosques se utilizó un muestreo estratificado dirigido, para lo cual se muestrearon 20 parcelas de inventario de 25x25m (625m²) por cada categoría de bosques, para 260 parcelas en total. En cada parcela se registró la especie, altura total (H, en m), diámetro a la altura del pecho (DAP, en cm) y cobertura de copa (CC,

en %) (Salas *et al.*, 2010). También se registró la altitud (msnm). Los rangos de cobertura del estrato arbóreo son: muy alta (100%), alta (75-100%), mediana (50-75%), baja (25-50%) y muy baja (0-25%).

Integración de datos topográficos, satelitales y de terreno

La relación entre las variables topográficas y satelitales se efectuó mediante tabulación cruzada 'crosstab' empleando para este cálculo operaciones de lógica booleana. El NDVI es útil para diferenciar la vegetación vigorosa y la estresada (Gilbert *et al.*, 1997).

Clasificación espectral, análisis estadístico y validación

Para la clasificación espectral es necesario, a partir de los píxeles, desarrollar las áreas de entrenamiento para obtener las firmas espectrales y posteriormente aplicar el algoritmo de mínima distancia para obtener la clasificación o mapa final. Este algoritmo consiste en seleccionar un píxel y asignarlo a una de las categorías más cercanas; esto es, en aquella que minimice la distancia entre ese píxel y el centroide de clase (Schowengerdt, 1983). La supervisión en laboratorio y terreno permite reagrupar nuevamente los píxeles según se determine en la relación firma espectral, clase informacional y la clasificación espectral (Kamaruzaman y Souza, 1997). En este estudio se aplicó el índice Kappa (κ), el cual es una técnica de análisis categórico multivariante que permite medir la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el posible esperado por azar (Naesset, 1996). La contribución de la presente investigación se logró evaluando la fiabilidad de la clasificación supervisada según la descripción obtenida de los ecosistemas boscosos y se comparó con otras clasificaciones desarrolladas en un ámbito local y mundial.

Resultados

El componente principal 1 fue significativo y explicó un 81,74% de la varianza original. Del análisis de componentes principales y sus vectores propios se desprende que la banda OLI4 contiene la información más provechosa (0,593939; color rojo), seguido de OLI2 (0,562763; color azul). De los tres criterios utilizados: a) separación de firma espectral, b) componentes principales y c) revisión de literatura; la combinación OLI 234 resultó ser la más informativa y fue la base de la clasificación.

En la clasificación preliminar se determinaron 33 categorías. Esta aportó información de interés pero sus píxeles se disponían en forma dispersa y no hubo una buena relación entre la clase espectral e informacional, limitando así la calidad de las categorías.

Con la finalidad de reducir la confusión entre las clases espectrales la clasificación se basó en los siguientes grupos según sea su origen: cubierta de origen volcánico (estructura de lapilli y lava basáltica), cuerpos de agua, suelo con escasa vegetación, vegetación de herbáceas y bosques (esta contiene el mayor número de clases). Sobre estas clases espectrales se hicieron

iteraciones generando diversos árboles de clasificación; en ellos se analizó tanto la distancia espectral como su confusión. De este modo, se fusionaron clases de la misma naturaleza y también aquellas de distinta naturaleza, pero con píxeles espectralmente próximos. Además, se generaron nuevas subclases espectrales.

La aplicación repetida de árboles de clasificación hizo posible la agrupación de estas clases espectrales, obteniendo así una clasificación final con 23 categorías.

Los NDs designados con número corresponden a la clasificación preliminar y los NDs con número y letra, corresponden a las clases definidas por cercanía espectral y similitud con la clase informacional (Figura 1). De las 23 categorías obtenidas en la clasificación se distinguen seis grupos de NDs. Todos los grupos con excepción del grupo 2 están distanciados entre sí por un solo ND, justificando con ello su agrupación. En la zona reflectiva destacan los suelos con escasa vegetación (12A) y la nieve (2), en cambio, en el otro extremo en la zona más absortiva sobresalen las categorías afectadas por sombra y los renovales densos (22A, 1, 28). El conglomerado 4 es el

de mayor variabilidad espectral, puesto que reúne diversas clases informacionales, desde escoria volcánica hasta bosques (ND=122 hasta ND=135). En este mismo grupo los bosques también muestran variación espectral, los jóvenes (28) (ND=49) y *A. araucana* de baja cobertura (27A) (ND=171). De los seis grupos, cuatro contienen bosques. El grupo 5 también es diverso ya que contiene diferentes clases informacionales (bosques, lava basáltica, lapilli, vegetación herbácea y matorral) con ND=166 hasta ND=178.

Para describir la estructura de los bosques se efectuaron parcelas de inventario en los diferentes tipos de bosques presentes en el PN Conguillío, a fin de relacionar de mejor manera la cobertura, altura y densidad con la información entregada por el satélite. De estas mediciones se infiere que los bosques de *A. araucana* alcanzan importantes densidades entre 250 y 1.130 árboles/ha en las zonas de menor altitud (900 y 1.300msnm), y sus diámetros varían entre 55 y 65,6cm. La especie *N. dombeyi* presenta la mayor cobertura de copa individual (Tabla I). Por su parte, *N. pumilio* se encuentra en todos los bosques estudiados y

TABLA I
DATOS DASOMÉTRICOS DE *Araucaria araucana* spp. Y *Nothofagus* spp. SEGÚN CATEGORÍA

Categoría	Cobertura de copa (%)		Cobertura total de copa (%)	Altura promedio (m)	Rango de altitud (msnm)
	<i>Araucaria</i> spp.	<i>Nothofagus</i> spp.			
16	35	45	80	21,5	664-1.210
14A	37	43	80	22,0	664-1.660
10A	5	10	15	1,5	1.439-1.660
20	25	45	70	22,2	886-1.550
17	35	35	70	24,0	886-1.439
19	44	26	70	22,0	1.218-1.439
30	30	25	55	17,5	1.439-1.660
27A	22	30	52	12,0	1.328-1.771
18A	32,5	32,5	65	25,2	941-1.550
21	31	34	65	25,0	1.107-1.329
29	20	35	55	19,7	1.218-1.550
28	20	40	60	18,0	1.107-1.550
22A	25	40	65	18,5	945-1.550

crece achaparrado en altitud y alto en zonas bajas. Esta condición se observa en la categoría 10A, donde la altura promedio de sus árboles fue sólo de 1,5m. En altitudes intermedias los bosques de *A. araucana* y *N. dombeyi* (18A) alcanzan la mayor altura (25,2m). La cobertura de copa de mayor promedio (80%) está representada por los bosques achaparrados *N. pumilio*, *N. antarctica*, *A. araucana* y matorrales (16), y bosques achaparrados semi-densos de *N. pumilio* y/o asociado *N. antarctica*-asociado *A. araucana* (14A). La cobertura de copa promedio total fue mayor para el género *Nothofagus* (33,9%) y menor para *Araucaria* (27,8%). La cobertura de copa promedio para *A. araucana* fluctuó desde un 5% cuando se asocia con arbustos e hierbas en el límite altitudinal (10A) hasta 44% asociado a *N. pumilio* (19).

En la Tabla II se observa que las categorías más entrenadas correspondieron a suelo con escasa vegetación (12A) y lava basáltica escorícea-musgo (4AB). Este mayor entrenamiento fue posible gracias a la abundancia y concentración de píxeles con el mismo valor ND. La selección de píxeles fue difícil para los bosques de *N. dombeyi* - *A. araucana* asociado *N. pumilio* - sombra (21) y los bosques jóvenes de *N. dombeyi* asociado *A. araucana* (29), debido a la alta dispersión que presentaron sus píxeles y a la variabilidad de los valores espectrales de la categoría. El mayor número de píxeles seleccionados correspondió al suelo con escasa vegetación (12A) y vegetación de alta montaña (10A). Contrariamente, el menor número fue para los cuerpos de agua; Lago Conguillío y Laguna Verde, por su escasa variabilidad de ND.

En la clasificación espectral se entrenaron 10.800 píxeles de un total de 1.069.280 contenidos en la imagen, equivalente a un 1,01% de la superficie

TABLA II
ÁREAS DE ENTRENAMIENTO DE PÍXELES CON UN ND O RANGO DE NDS POR CATEGORÍA

Categoría	Área de entrenamiento (N° de píxeles)	Categoría (N° de píxeles)	Proporción (%)
11	353	2.151	16,41
14A (14+31)*	859	79.221	14,23
4AB (32+5)*	1.102	55.546	5,91
1	460	12.492	3,68
22A (22+24+25)*	899	59.371	3,85
8A (8+9)*	364	31.732	2,53
12A (12+13)*	1.610	119.512	2,45
27A (27+33)*	419	50.512	2,02
10A (10+15)*	704	80.942	1,78
2	892	63.844	1,40
7	286	27.124	1,05
17	427	47.020	0,91
26	297	37.225	0,79
19	177	22.740	0,78
18A (18+23)*	222	58.292	0,77
3	598	79.819	0,75
20	400	58.296	0,69
30	343	50.073	0,68
16	116	18.900	0,61
29	55	14.437	0,38
6	106	29.696	0,35
28	76	45.104	0,17
21	35	25.249	0,14
Total	10.800	1.069.280	1,01

* Entre paréntesis: el número inicial indica la clase espectral cuyos píxeles prevalecieron en la primera clasificación y el segundo, la clase espectral cuyos píxeles se reagruparon.

estudiada (Figura 2). Para el error de muestreo estándar se utilizó el nivel de significación (α) y el nivel de

probabilidad ($1-\alpha$). Por lo tanto, la fiabilidad de la matriz de confusión se calculó con un nivel de significación de

0,05, lo que indica que hay un 95% de probabilidad que la fiabilidad real se encuentre entre 73,14 y 79,25%. Según el índice Kappa la precisión obtenida en la clasificación fue $\kappa = 0,75$; es decir, que el resultado es un 75% mejor que lo esperable por el azar. La fiabilidad promedio de las categorías para el usuario y el productor fue: bosques (74,6%), vegetación herbácea y arbustos (80,5%), suelo con escasa vegetación (84,95%), nieve (95,1%), escoria y lava volcánica (73,03%) y agua (73,0%). Para el caso de la fiabilidad del productor la matriz de confusión indicó un bajo error de omisión, es decir, que la especie que ocupa el territorio es la indicada; por su parte, el error por comisión deriva en que la probabilidad que sea la especie señalada en la clasificación es baja y afecta en este caso al usuario.

De la clasificación supervisada se obtuvieron cinco grupos de clases informacionales (Tabla III). De estos grupos, la mayor superficie la obtuvieron los bosques, 38.133,9ha; magma y vegetación, 13.994,7ha; suelo con escasa vegetación de herbácea, 7.469,6ha; nieve, 3.990,3ha; vegetación herbácea y arbustos, 2.326,6ha; agua, 913,9ha. Entre las

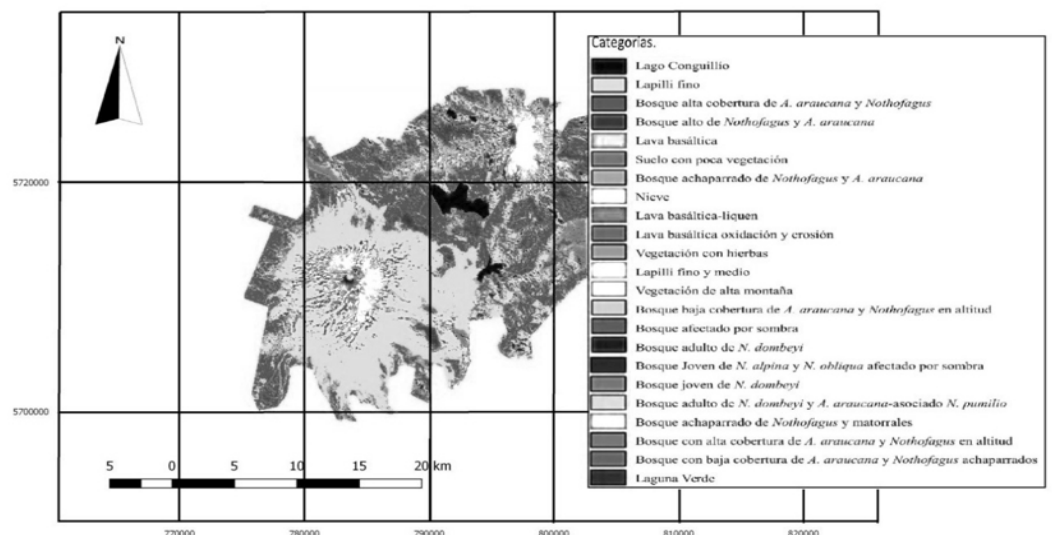


Figura 2. Clasificación supervisada derivada de la combinación de bandas Landsat-8 OLI 234 con 23 categorías.

TABLA III
CATEGORÍAS DERIVADAS DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DESDE LA COMPOSICIÓN DE BANDAS DEL
SATÉLITE LANDSAT OLI 234

Id	Categoría y/o Comunidad	Superficie (ha)
<u>Agua</u>		
1	Lago Conguillío	780,8
11	Laguna Verde	133,1
2	Nieve	3.990,3
<u>Depósitos volcánicos y flora de líquen y musgos</u>		
3	Lapilli fino homogéneo	4.988,7
8A	Lapilli fino y medio homogéneo	1.983,2
7	Lava basáltica escoria	1.695,2
44AB	Lava basáltica escoria – musgo (<i>Rhacomitrium lanuginosum</i>)	3.471,6
4A	Lava basáltica escoria – musgo (<i>R. lanuginosum</i>) – oxidación	
4B	Lava basáltica escoria – musgo (<i>R. lanuginosum</i>) – erosión parcial	
6 (*)	Lava basáltica escoria – líquen	1.856,0
<u>Suelo con escasa vegetación</u>		
12A	Suelo con escasa vegetación de hierbas exóticas y <i>Festuca</i> sp.	7.469,6
<u>Vegetación de hierba y matorral</u>		
26	Vegetación hierba absortiva (<i>A. trifurcata</i> , <i>C. uliginosa</i> , <i>P. pumila</i> , <i>Festuca</i> sp., <i>D. andina</i> , <i>A. retusa</i> y <i>M. distichya</i>)	2.326,6
<u>Bosques</u>		
<u><i>Nothofagus pumilio</i> y <i>Nothofagus antártica</i></u>		
16	Bosque achaparrado, <i>N. pumilio</i> - <i>N. antártica</i> - <i>A. araucana</i> y matorrales	1.181,2
14A	Bosque achaparrado semidenso de <i>N. pumilio</i> y/o asoc. <i>N. antártica</i> / asoc. <i>A. araucana</i>	4.951,3
10A	Vegetación-alta montaña (<i>Senecio</i> sp.)-lapilli fino-eventual <i>N. pumilio</i> - <i>A. araucana</i>	5.057,7
20	Bosque <i>N. pumilio</i> y asociado <i>N. dombeyi</i> - <i>A. araucana</i>	3.643,5
<u><i>Araucaria araucana</i></u>		
17	Bosque con alta cobertura <i>A. araucana</i> - <i>N. dombeyi</i> y asociado <i>N. pumilio</i>	2.938,7
19	Bosque con alta cobertura <i>A. araucana</i> - <i>N. pumilio</i> de altitud	1.421,3
30	Bosque <i>A. araucana</i> y <i>N. pumilio</i> - baja cobertura y alto en altitud	3.129,6
27A	Bosque <i>A. araucana</i> asociado <i>N. pumilio</i> , baja cobertura y achaparrado - <i>Festuca</i> sp. y escoria volcánica	3.157,1
<u><i>Nothofagus dombeyi</i></u>		
18A	Bosque asociado <i>A. araucana</i> - <i>N. dombeyi</i> y <i>N. pumilio</i> , sombra	3.643,3
21	Bosque <i>N. dombeyi</i> - <i>A. araucana</i> asociado <i>N. pumilio</i> , sombra	1.578,1
29	Bosque joven de <i>N. dombeyi</i> asociado árboles de <i>A. araucana</i>	902,3
<u><i>Nothofagus alpina</i> - <i>Nothofagus obliqua</i></u>		
28	Bosque joven de <i>N. alpina</i> asociado <i>N. obliqua</i>	2.819,0
2A	Bosque-sombra: <i>A. araucana</i> - <i>N. pumilio</i> - <i>N. dombeyi</i> - <i>N. obliqua</i> y <i>N. alpina</i>	3.710,8

* Líquenes no identificados.

categorías de bosques la vegetación de alta montaña (*Senecio* sp.) y lapilli fino, y eventualmente *N. pumilio* y *A. Araucana* fue la más extensa con 5.057ha. La categoría de menor superficie correspondió a renovales de *N. dombeyi* asociado a árboles de *A. araucana* (902,3ha), esto es de importancia porque indica que en el PN Conguillío son más abundantes los bosques maduros y envejecidos.

Discusión

Existe coincidencia entre algunos autores cuando se

plantea que una categoría se define por un conjunto de NDs próximos entre sí, y por lo mismo, la mayoría de las clasificaciones se han llevado a cabo siguiendo este criterio. Pero en esta visión no se ha considerado que cada ecosistema mantiene su propia complejidad. En este sentido, nuestros resultados obtenidos con la clasificación realizada concuerdan con lo planteado por Wright y Gallant (2007); es decir, que al clasificar en forma combinada utilizando NDs únicos, y a la vez, pequeños rangos de NDs, es posible conseguir mayor reciprocidad entre la clase espectral y la

informativa. Independiente de la mayor o menor área de distribución de los bosques, igualmente fue posible seleccionar píxeles de un único ND o pequeños rangos de NDs, los cuales fueron representativos de sus respectivas clases espectrales, concordando con los registros de Salovaara *et al.* (2005). Por esta razón, a pesar de la complejidad espectral e informativa de los bosques del sur de Chile, estos fueron correctamente clasificados con una fiabilidad entre 70 y 98%. No se encontró una relación directa entre la proporción de píxeles entrenados por clase espectral y la mayor

o menor fiabilidad que se esperaría en una clasificación. Por su parte, Disperati *et al.* (1980) mapearon bosques de *Araucaria angustifolia* en Curitiba, Brasil y coinciden con nuestro planteamiento, es decir, que para obtener una clasificación fiable, las áreas de entrenamiento deben contener píxeles únicos de la clase y pequeños rangos de NDs, y plantean la dificultad que implica efectuar clases y subclases espectrales, aspecto que se resolvió en la presente investigación mediante la aplicación conjunta de los métodos de clasificación biunívoca-combinada y del árbol.

La mayor o menor cobertura de copa de los bosques no incidió significativamente en la fiabilidad de la clasificación, ya que tanto los bosques ralos como los densos obtuvieron una fiabilidad similar. Solo cuando la cobertura de copa es muy rala se observó una disminución de la fiabilidad, lo que podría ser esperable. Lo planteado anteriormente coincide con los resultados obtenidos por Congalton *et al.* (1993), quienes no encontraron grandes diferencias de fiabilidad en relación a diferentes estructuras de bosques tropicales.

Es importante el registro de solo 902,3ha de renovales de *N. dombeyi* y *A. Araucana* en el PN Conguillío, porque implica que existen importantes superficies de bosques maduros y envejecidos que están presentes y que no han sufrido el efecto de incendios forestales en los últimos 700-1000 años.

El método del árbol de clasificación fue útil porque permitió reagrupar 33 clases espectrales en 23 clases (Hansen *et al.*, 1996; Comber *et al.*, 2012). Lo complejo que resulta clasificar ecosistemas boscosos como consecuencia de la dispersión de los píxeles ha sido reconocido por Brown *et al.* (2009); sin embargo, en el presente estudio se pudo determinar a través del método del árbol un tamaño mínimo de área y un número máximo de clases espectrales. Un método similar para determinar tamaño y número de clases fue aplicado recientemente por Khatami *et al.* (2017).

En la presente investigación se efectuó una clasificación biunívoca-combinada con información espectral derivada de las bandas Landsat OLI234. Congalton *et al.* (1993) obtuvieron resultados similares utilizando la misma combinación de bandas en bosques sobremaduros en el Pacífico Noreste. En la presente investigación la banda OLI4 (rojo) reportó la información más provechosa, a diferencia de Kamaruzaman y Souza (1997), quienes registraron a la banda TM2 (verde) como la más informativa. La clasificación obtenida entre

73,14 y 79,25% puede considerarse de óptima fiabilidad por tratarse de bosque nativo, si se compara con el trabajo de White *et al.* (1995), quienes clasificaron bosques con una fiabilidad de 73% en el volcán Lassen. Por su parte, Salovaara *et al.* (2005) obtuvieron resultados similares en bosques primarios amazónicos.

Los bosques del mundo situados en Parques y Reservas han sido clasificados de preferencia a escalas amplias de observación y en Chile la situación es similar (Pliscof y Luebert, 2006). En este sentido, el presente trabajo es una contribución, ya que a partir del satélite Landsat se obtuvo una clasificación de *Araucaria* y *Nothofagus* a escala fina y media en una extensa superficie.

A través del proyecto CONAF-CONAMA-BIRF (2012) se desarrolló en Chile un 'catastro' de vegetación que consiste en la selección de píxeles por rangos de NDs a escala media y gruesa, pero tuvo la limitante que no contempló el reagrupamiento de las clases espectrales para acercarlas a las informacionales. Al analizar las categorías obtenidas por dicho proyecto y compararla con las clases obtenidas en la presente investigación, se infiere que en esta última se describieron con mayor detalle debido a la selección de los píxeles y al reagrupamiento por árboles de clasificación de las clases espectrales (Ojeda *et al.*, 2011, 2012). Incluso se pudo clasificar en algunos casos según las especies dominantes, a diferencia del 'catastro' que determina solo estructura-densidad del bosque. Con la precisión obtenida en la presente investigación se distinguen 6,25ha y la descripción espacial fue más fiel a la realidad. A modo de ejemplo, algunas categorías del 'catastro' definen 'bosque nativo achaparrado semi-denso' y 'bosque nativo adulto semi-denso', en los cuales contrariamente se detectaron bosques con alta cobertura de copa. En el 'catastro' se reporta 'bosques nativos abiertos' en lugares donde

en realidad se desarrollan bosques de alta cobertura como son los bosques de *N. pumilio* - asociado *N. dombeyi* - *A. Araucana* coexistiendo con *A. araucana*- asociado *N. dombeyi* - *N. pumilio*. El 'bosque nativo adulto denso' descrito en dicho 'catastro' fue escasamente observado. Además, se describen bosques de *A. araucana* en sectores donde solo existen pastizales y matorrales en sectores de alta montaña.

Globalmente existen clasificaciones de bosque nativo realizadas de preferencia a escalas medias y gruesas de observación (Comber *et al.*, 2012). En este sentido, la importancia de la presente investigación es que se realiza un mapeo a escala media y fina con lo cual se logra una gestión con más detalle de un ecosistema natural de alto valor ecológico. La metodología que se presenta aquí es importante porque puede replicarse a ecosistemas boscosos de montaña de otras latitudes, para lo cual será necesario reconocer los píxeles puros o mixtos (trabajo de terreno y selección exhaustiva de píxeles), generar clases y sub clases espectrales, utilizar árboles de clasificación e incorporar al análisis índices de vegetación y modelos de elevación.

Conclusiones

Se demuestra que es posible clasificar y mapear extensas superficies de bosques primarios de *Araucaria* y *Nothofagus* a una escala fina y media, y conseguir una descripción detallada de su composición, estructura y distribución. Con ello se valora positivamente el efecto que tiene la aplicación conjunta de los métodos de clasificación biunívoca-combinada y del árbol, más el apoyo de información auxiliar y los modelos DEM y NDVI. La selección de los píxeles de un único ND y de pequeños rangos de NDs desde datos Landsat 8-OLI y su posterior reagrupación, otorgan una buena relación entre la clase espectral y la informacional, lo que determina una clasificación supervisada que se aproxima a

la realidad. De este modo, se determina el tamaño mínimo y número óptimo de clases espectrales que permiten clasificar y mapear de buena manera los cuerpos de agua, vegetación de hierbas, depósitos volcánicos y bosques. Lo relevante de la metodología aplicada es que permite orientar un mejor manejo de los ecosistemas boscosos localizados en zonas de difícil acceso en la Cordillera de los Andes en el sur de Chile, método que puede ser replicado en otras latitudes con bosques de alto valor para su conservación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Universidad de La Frontera, Proyecto DIUFRO-regular DI14-0058, al Programa de Relaciones Internacionales que hizo posible la presentación de los resultados en el XVI Congreso Internacional Selper 2014, Medellín, Colombia, el financiamiento del proyecto NEXER - UFRO (NXR17-0002), y el apoyo de los guardaparques de la Corporación Nacional Forestal en el Parque Nacional Conguillío.

REFERENCIAS

- Beaubien J, Cihlar J, Simard G, Latifovic R (1999) Land cover from multiple Thematic Mapper scenes using a new enhancement-classification methodology. *J. GeoPhys. Res.* 104(22): 909-920.
- Brown KM, Foody GM, Atkinson PM (2009) Estimating per-pixel thematic uncertainty in remote sensing classifications. *Int. J. Rem. Sens.* 30: 209-229.
- Chavez P (1996) Image-Based atmospheric correction revisited and improved. *Review. Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 62: 1225-1036.
- Comber A, Fisher P, Brunson C, Khmag A (2012) Spatial analysis of remote sensing image classification accuracy. *Rem. Sens. Environ.* 127: 237-246.
- CONAF, CONAMA, BIRF (2012) *Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile*. Informe Novena Región. Corporación Nacional Forestal, Comisión Nacional del Medio Ambiente, Banco Interamericano de

- Reconstrucción y Fomento. Santiago, Chile. 75 pp.
- Conese C, Maselli F (1993) Selection of optimum bands from TM scenes through mutual information analysis. *ISPRS J. Photogramm. Rem. Sens.* 48(3): 2-11.
- Congalton R, Green K, Tepley J (1993) Mapping old growth forests on national forest and park land in the Pacific Northwest from remotely sensed data. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 59: 529-535.
- Disperati A, Keech M, Gantzel O (1980) Algumas considerações sobre o mapeamento de *Araucaria angustifolia* (BERT.) O. KTZE em florestas nativas através de fotografias aéreas e imagens landsat. En *Problemas Florestais do Genero Araucaria*. International Union of Forestry Research Organizations. Curitiba, Parana, Brasil. pp. 10-15
- Echeverría C, Coomes D, Salas J, Reyes-Benayas JM, Lara A, Newton A (2006) Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biol. Conserv.* 130: 481-494.
- Eastman R (2012) *IDRISI Selva Tutorial. Guide to GIS and Image Processing*. Clark University. Worcester, MA, EEUU. 130 pp.
- Gilbert MJ, González-Piqueras, García-Haro J (1997) Acerca de los índices de vegetación. *Rev. Teledetec.* 8: 35-45.
- Hansen M, Dubayah R, DeFries R (1996) Classification trees: an alternative to traditional and cover classifiers. *Int. J. Rem. Sens.* 17: 1075-1081.
- Kamaruzaman J, Souza D (1997) Use of satellite remote sensing in Malaysian forestry and its potential. *Int. J. Rem. Sens.* 18: 57-70.
- Khatami R, Mountrakis G, Stehman S (2017) Mapping per-pixel predicted accuracy of classified remote sensing images. *Rem. Sens. Environ.* 191: 156-167.
- Naesset E (1996) Conditional tau coefficient for assessment of producer's accuracy of classified remotely sensed data. *ISPRS J. Photogram. Rem. Sens.* 51: 91-98.
- Ojeda N, Sandoval V, Casanova JL, Herrera MA, Morales L, San Martín J, Espinosa A., Soto H (2011) Discriminación de bosques de araucaria (*Araucaria araucana*) en el Parque Nacional Conguillio, centro-sur de Chile, mediante datos Landsat TM. *Bosque* 32(2): 19-31.
- Ojeda N, Alvear M, Herrera MA, Lillo A, Reyes F, Soto H (2012) Estudio de ecosistemas longevos de Araucaria en el Sur de Chile: Uso del satélite Landsat Thematic Mapper. Académica Española. 72 pp.
- Plissock P, Luebert F (2006) Una nueva propuesta de clasificación de la vegetación de Chile y su aplicación en el evaluación del estado de conservación de los ecosistemas terrestres. *Rev. Amb. Desarr.* 22: 41-45.
- Riaño D, Chuvieco E, Salas J, Aguado I (2003) Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetations types. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* 41: 1056-1061.
- Salas C, Ene L, Ojeda N, Soto H (2010) Métodos estadísticos paramétricos y no-paramétricos para predecir variables de rodal basados en Landsat ETM+: una comparación en un bosque de *Araucaria araucana* en Chile. *Bosque* 31(3): 179-194.
- Salovaara KJ, Thessler S, Malik RN, Tuomisto H (2005) Classification of Amazonian primary rain forest vegetation using Landsat ETM+ satellite imagery. *Rem. Sens. Environ.* 97: 39-51.
- Schowengerdt RA (1983) *Techniques for Images Processing and Classification in Remote Sensing*. Academic Press. Nueva York, EEUU. 217 pp.
- UICN (2013) *Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN*. Comisión de Supervivencia de Especies. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Gland, Suiza. 34 pp.
- White J, Kroh G, Pinder J (1995) Forest mapping at Lassen Volcanic National Park, California, using Landsat TM Data and a geographical information system. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 61: 299-305.
- Wright C, Gallant A (2007) Improved wetland remote sensing in Yellowstone National Park using classification trees to combine TM imagery and ancillary environmental data. *Rem. Sens. Environ.* 107: 582-605.