



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA**  
**CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**  
**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**  
**DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO**  
**AMBIENTE**

---

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DETECCIÓN DE**  
**CORTAS NO AUTORIZADAS EN LA REGIÓN DEL MAULE POR**  
**MEDIO DE IMÁGENES SATELITALES**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**RAÚL ANDRES DÍAZ VASCONCELLOS**

Profesor guía: Sr. Miguel Castillo Soto. Ingeniero Forestal.  
Doctor en Recursos Naturales y Sustentabilidad.

---

**Santiago, Chile**  
**2018**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA**  
**CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**  
**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**  
**DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO**  
**AMBIENTE**

---

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DETECCIÓN DE**  
**CORTAS NO AUTORIZADAS EN LA REGIÓN DEL MAULE POR**  
**MEDIO DE IMÁGENES SATELITALES**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**RAÚL ANDRES DÍAZ VASCONCELLOS**

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Miguel Castillo Soto:	7,0	.....
Prof. Consejero Sr. Horacio Bown Intveen:	7,0	.....
Prof. Consejero Sr. Gustavo Cruz Madariaga:	6,7	.....

*A mi amor, a mi familia y a mis amigos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Miguel Castillo, profesor y amigo, por su valioso apoyo como guía en la realización de este estudio, y sobre todo, por confiar en mi la realización de trabajos y proyectos que aportan en mi formación como ingeniero.

A los profesores Horacio Bown, Gustavo Cruz y Andrés Plaza, por el tiempo dedicado en la revisión y corrección de este documento, con el fin de ayudarme a realizar un buen trabajo.

También quiero agradecer a Gonzalo Tapia, por su colaboración en la información y guía necesaria, para la formulación del problema que busque resolver con este estudio.

A Makarena, por todo el cariño compartido, ayudándome y aconsejándome para poder mantenerme firme frente a los desafíos.

A mis padres y a mi hermana, por la ayuda, paciencia y comprensión entregada en esta etapa que llega a su fin.

Finalmente quiero agradecer de corazón a todos y todas las personas que me apoyaron y compartieron conmigo, no solo en la realización de este estudio, sino también en mi formación como profesional y como persona.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Técnicas y medios de apoyo para la fiscalización y monitoreo .....	2
1.2	Objetivos .....	5
1.2.1	Objetivo general .....	5
1.2.2	Objetivos específicos .....	5
2.	MATERIAL Y MÉTODO .....	6
2.1	Material .....	6
2.1.1	Área de estudio.....	6
2.1.2	Fuentes de información .....	7
2.2	Método.....	7
2.2.1	Tratamiento previo de las imágenes.....	8
2.2.2	Cálculo de índices vegetacionales.....	8
2.2.3	Definición del área de interés.....	9
2.2.4	Reclasificación .....	9
2.2.5	Validación de la metodología.....	12
2.2.6	Diagrama del procedimiento .....	13
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	14
3.1	Datos seleccionados .....	14
3.2	Descarga y tratamiento de imágenes .....	14
3.3	Definición de variables de diagnóstico.....	15
3.4	Grado de fiabilidad de la metodología .....	19
3.5	Propuesta para el seguimiento del proceso de cortas no autorizadas. ....	31
4.	CONCLUSIONES .....	34
5.	BIBLIOGRAFÍA .....	35
6.	APENDICES .....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Indicación de sectores de cambio y no cambio (modificada) (Jensen, 2005). .....	4
Figura 2. Área de estudio Región del Maule junto con los registros de cortas no autorizadas. .....	6
Figura 3. Determinación del valor crítico a partir del promedio, desviación estándar y valor Z utilizado. ....	10
Figura 4. Cuadro resumen de los procedimientos realizados en la metodología. ....	13
Figura 5. Dispersión en superficie de los registros de cortas seleccionados.....	14
Figura 6. Distribución de los píxeles que buscan ser catalogados como corta. ....	16
Figura 7. Aumento de detección de cortas no autorizadas a medida que el valor Z disminuye. En la leyenda se observan en colores las superficies de las escalas de análisis utilizadas. .	18
Figura 8. Resultados del método para un tamaño de máscara M0 (40,5 hectáreas), expresado a escala 1:4.000. Base comparativa: Cartografía regional escala 1:1.400.000. ....	21
Figura 9. Resultados del método para un tamaño de máscara M1 (81 hectáreas), expresado a escala 1:5.000. Base comparativa: Cartografía regional escala 1:1.400.000. ....	22
Figura 10. Resultados del método para un tamaño de máscara M2 (162 hectáreas), expresado a escala 1:7.000. Base comparativa: Cartografía regional escala 1:1.400.000. ....	23
Figura 11. Resultados del método para un tamaño de máscara M3 (324 hectáreas), expresado a escala 1:10.000. Base comparativa: Cartografía regional escala 1:1.400.000. ....	24
Figura 12. Distribución de los valores de píxeles ( $\Delta$ NDVI) de las cortas seleccionadas por la metodología.....	26
Figura 13. Distribución de valores de píxeles ( $\Delta$ NDVI) no detectados como corta por la metodología.....	28
Figura 14. Secuencia de una misma imagen reclasificada bajo distintos porcentajes de zonas de cambio, donde los píxeles blancos indican las zonas de pérdida de vegetación, y los píxeles negros las zonas de no pérdida de vegetación.....	30
Figura 15. Mapa de delimitación de zonas que concentran las cortas no autorizadas en bosque nativo en la región del Maule.....	33

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores Z utilizados en las iteraciones, junto con los porcentajes correspondientes a una distribución normal estándar. ....	10
Cuadro 2. Número de cortas detectadas de los 48 registros de corta seleccionados, para cada valor Z y para las máscaras M0, M1, M2 y M3. ....	16
Cuadro 3. Resultados específicos para cada máscara y cada valor Z: N=48. ....	19
Cuadro 4. Porcentaje de cortas no autorizadas grandes detectadas por cada máscara. n=16. ....	20
Cuadro 5. Porcentaje de cortas no autorizadas medianas detectadas por cada máscara. n=13. ....	20
Cuadro 6. Porcentaje de cortas no autorizadas pequeñas detectadas por cada máscara. n=19. ....	20
Cuadro 7. Cortas detectadas por la metodología. ....	25
Cuadro 8. Registros de cortas no detectados por la metodología. ....	26
Cuadro 9. Ventajas y desventajas de la metodología aplicada a la detección de cortas no autorizadas. ....	32

## RESUMEN

Se propuso un método de gabinete para la detección de cortas no autorizadas, basado en el uso de la teledetección a partir de imágenes satelitales de libre descarga. Para este propósito se analizaron cambios producidos por cortas no autorizadas sobre bosque nativo en la Región del Maule a través de análisis multitemporales con imágenes OLI del satélite Landsat. Se crearon tres categorías de cortas no autorizadas basadas en las superficies de estas mismas, se crearon las categorías: grandes (entre 4,2 y 40,5 hectáreas), medianas (entre 0,2 y 4,1 hectáreas) y pequeñas (entre 0,01 y 0,19 hectáreas). A su vez fue calculado el índice vegetacional NDVI para los periodos antes y después de realizadas las cortas, para posteriormente determinar el  $\Delta$ NDVI con el fin de crear mapas de cambio los cuales fueron comparados con los registros disponibles en las campañas de campo, a distintas escalas de análisis. La comparación se realizó a partir de una muestra de la imagen a partir de diferentes escalas, se tomaron muestras de 40,5 ha (escala 1:4.000), 81 ha (escala 1:5.000), 162 ha (escala 1:7.000) y 324 ha (1:10.000). Los mejores resultados se obtienen cuando la región de cambio fue definida como un 25% del total de la imagen, conteniendo cerca de un 30% de las cortas no autorizadas en la mayoría de las escalas de análisis utilizadas. Los mapas de cambio obtenidos fueron utilizados para la realización de la propuesta de seguimiento y detección de las cortas no autorizadas, debido que se trata de un material cartográfico es de gran utilidad en el apoyo y la planificación de campañas en terreno. La metodología propuesta puede ser mejorada como por ejemplo, con imágenes de mayor resolución que tengan celdillas de menor superficie, con la capacidad de observar las cortas no autorizadas de menor tamaño. Los valores utilizados para el cálculo de la efectividad del método fueron realizados en base a una muestra de la corta la cual fue un solo pixel, con lo cual podrían esperarse mejores resultados si se tuvieran los perímetros de corta que entreguen información de la vecindad del dato.

### **PALABRAS CLAVE**

**Índices vegetacionales, NDVI, Percepción remota, Detección de cambios, Análisis temporal.**



## **ABSTRACT**

A desktop method was proposed for the detection of unauthorized cuts, based on the use of remote sensing based on free download satellite images. For this purpose, changes produced by unauthorized cuts of native forest in the Region del Maule were analyzed with OLI images of the Landsat satellite. Three categories of unauthorized cutting were created based on the surfaces of cuts. The categories were created: large (between 4.2 and 40.5 hectares), medium (between 0.2 and 4.1 hectares) and small (between 0.01 and 0.19 hectares). In turn, the vegetational index NDVI was calculated for the periods before and after the cutting were made, to later determinate the  $\Delta$ NDVI in order to create change maps which were compared with the records available in the field campaigns, at different scales of analysis. The comparison was made from a sample of the image from different scales, samples were taken of 40.5 ha (scale 1:4,000), 81 ha (scale 1:5,000), 162 ha (scale 1:7,000) and 324 ha (1:10,000). The best results are obtained when the region of change was defined as 25% of the total image, containing about 30% of the unauthorized cuts in most of the analysis scales used. The change maps obtained were used for the realization of the proposal of tracking and detection of unauthorized cuts, because it is a cartographic material that is very useful in the support and planning of field campaigns. The proposed methodology can be improved as for example, with higher resolution images that have smaller surface cells, with the ability to observe smaller unauthorized cuts. The values used to calculate the effectiveness of the method were made based on a sample of a single pixel of the cuts, which could expect better results if had the perimeters of cutting that have the information of the neighborhood of the data.

## **KEYWORDS**

**Vegetational index, NDVI, Remote sensing, Change detection.**

## 1. INTRODUCCIÓN

Los bosques templados de Chile albergan una gran diversidad genética de especies, con alto endemismo (Echeverría *et al.*, 2006), atributos propios de estos bosques que quedaron aislados en pequeñas zonas de la Cordillera de la Costa, desde donde luego los bosques volvieron a poblar el territorio continental (Armesto *et al.*, 1994), es por estas características que es necesario protegerlos, debido a que se encuentran localizados sólo en esta parte del mundo.

En la actualidad, el bosque nativo en la Región del Maule se encuentra con un alto grado de fragmentación, debido a los cambios de uso de suelo que históricamente han tenido lugar en dicha región, primero con el fin de habilitar terrenos agrícolas y luego para el establecimiento de monocultivos forestales. Además, durante el año 2017 ocurrió una de las temporadas de incendios más destructivas, la cual afectó al 16,15% del bosque nativo y matorral esclerófilo de esta región, aumentando el estado de fragilidad en que se encuentran estos bosques en esta región.

Por tal motivo, el monitoreo de los recursos vegetacionales cobra actualmente una mayor relevancia, dado el incremento en las actividades de extracción de madera en áreas de escasa accesibilidad. Esto es una materia que la Corporación Nacional Forestal (CONAF) ha establecido como prioridad dentro del Departamento de Fiscalización Forestal. En esta línea, se ha planteado la necesidad específica de proponer protocolos, herramientas y medios más eficaces para hacer frente al monitoreo de intervenciones no autorizadas en bosque nativo. Lo anterior, implica mejorar la cobertura de vigilancia, tanto en el ámbito de las áreas silvestres protegidas como también del patrimonio de bosque nativo, cuya distribución geográfica y accesibilidad imponen importantes desafíos para mejorar las actuales capacidades de fiscalización que posee la CONAF.

En este contexto, el ámbito de la fiscalización y monitoreo adquiere especial relevancia en aquellos regímenes donde se presenta actividad extractiva de los bosques, muchas de ellas efectuadas sin planes de manejo aprobados por la CONAF o que presenten irregularidades en su ejecución. Particularmente en la Región del Maule, donde existe una presión de corta de bosque nativo para la extracción de biomasa, especialmente leña (CHILE FORESTAL, 2015).

Actualmente CONAF cuenta con un sistema de alerta temprana (SAT), basado en la detección de cambios de la superficie terrestre por medio de imágenes satelitales, este sistema entrará en funcionamiento formalmente a partir del año 2018. Hasta el momento, el método aplicado por CONAF ha demostrado que las imágenes satelitales son un importante recurso en la detección de cortas no autorizadas, donde en su marcha blanca durante el año 2016 fueron detectadas 44 cortas. El SAT cuenta también con un trabajo basado en cuatro fases o componentes, los cuales analizan y determinan áreas críticas, monitorean y detectan cambios de uso de suelo, alerta vía reportes con información cartográfica, para de esta forma obtener la información necesaria para después validar las zonas de pérdida de vegetación como cortas no autorizadas en terreno, donde también CONAF ha realizado una importante inversión en

tecnología, incorporando drones (vehículos no tripulados) que faciliten la visita y adquisición de información en imágenes en alta resolución de aquellos sitios que sean complicados de acceder (CONAF, 2018a; CONAF, 2018b).

La principal forma en que la CONAF detecta las cortas no autorizadas (CNA) es por medio del manejo de información proporcionada por terceras personas (denuncias de terceros o declaraciones ciudadanas) junto con la información que es adquirida por las actividades en terreno de los fiscalizadores, tales como las inspecciones prediales, patrullajes aéreos, fiscalización en carreteras y centros de acopio entre otras (CONAF, 2013).

La actividad más eficiente en la detección de cortas no autorizadas es por medio de las denuncias o declaraciones ciudadanas. La CONAF dispone de un conducto formal por la cual la población puede efectuar sus denuncias las cuales deben ser corroboradas en terreno. En la Región del Maule estas actividades presentan un 50% de eficiencia en comparación con las otras actividades de fiscalización antes señaladas, junto con ser las que presentan un menor costo para CONAF (CONAF, 2015).

Por tal motivo, es que en este estudio se propone el uso de la teledetección como una herramienta de apoyo adicional en el monitoreo de las coberturas vegetacionales. El empleo de la teledetección para la identificación de cambios sobre el uso de suelo toma gran importancia debido al potencial que presenta para este tipo de tareas, pudiendo obtener imágenes de una forma frecuente, que facilite el monitoreo constante de un área de interés. Hoy en día existe una gran variedad de productos y sensores disponibles, los cuales permiten identificar cambios desde diferentes escalas de trabajo (Bedon, 2012). La identificación de manera remota posee la cualidad de que puede ser validada en terreno, lo que permite fortalecer la política de decisiones y acciones regulatorias relacionadas con actividades sobre el uso de la tierra (Lunetta *et al.*, 2006). En consecuencia, es posible apoyar sustantivamente la programación de las actividades de terreno que efectúa actualmente la CONAF.

## **1.1 Técnicas y medios de apoyo para la fiscalización y monitoreo**

Los sensores remotos otorgan información muy valiosa para el apoyo de actividades de campo. La actividad de cortas no autorizadas puede ser identificada y evaluada por medio de imágenes satelitales de libre acceso, para lo cual se deben considerar la escala geográfica del análisis, el grado de intervención y la temporalidad de estas actividades. Estos tres aspectos deben ser considerados para la elección del mejor producto satelital. Como aspectos técnicos en todo proceso de monitoreo indirecto (desde el espacio), se hace necesario considerar tres elementos: La resolución espacial (tamaño de la celdilla o pixel), la resolución espectral (contenido de información de las bandas de cada imagen) e información temporal (frecuencia de pasada del satélite por el área de interés) (Chuvieco, 1996). Este último punto es gravitante por cuanto la temporalidad condiciona la validez de la propuesta para la detección oportuna de cortas no autorizadas. Por tal razón, la teledetección aporta en este caso antecedentes útiles para la definición de un método mixto entre trabajo de campo y monitoreo satelital.

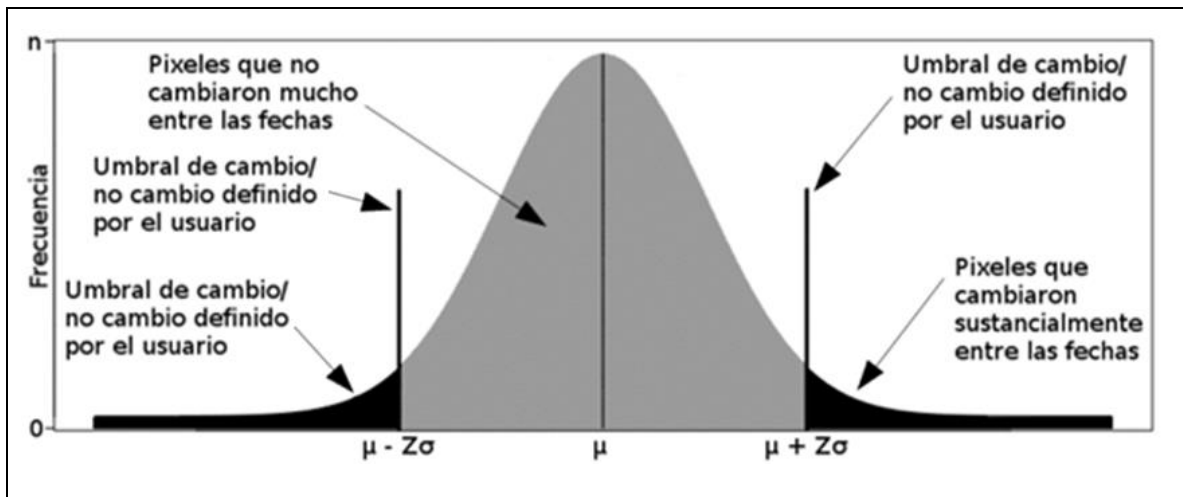
El uso de sensores remotos permite, entre otros aspectos, establecer patrones de cambio en el uso del suelo. Normalmente las imágenes satelitales cubren extensas superficies lo cual

permite obtener un diagnóstico general de las zonas potenciales a ser afectadas si es que el usuario dispone de una resolución (tamaño pixel) razonable para poder detectar y validar en terreno el proceso de cambio o corta no autorizada.

Uno de los métodos utilizados en la detección de cambios es la basada en el pixel, donde dicho pixel corresponde a la unidad fundamental de análisis, en la cual se realizan comparaciones sobre el brillo o valor antes y después que tenga esta celdilla. De esta forma, y debido a las características espectrales que se puede obtener del pixel, es que puede ser utilizado para detectar cambios sin considerar el contexto espacial en el cual se encuentra (Devi y Jiji, 2015).

Una de las técnicas para evaluar indirectamente la existencia y calidad actual de la vegetación, es la utilización de índices vegetacionales, los cuales permiten identificar en qué estado ésta se encuentra (por ejemplo, estado fitosanitario) o incluso si está presente o ausente (Escuin *et al.*, 2007). El índice de vegetación normalizada o NDVI por su sigla en inglés, permite generar una variable útil en la estimación de la vegetación a partir de sensores remotos, con base en la intensidad de la radiación electromagnética en las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano, los cuales la vegetación absorbe o refleja. La clorofila en la vegetación absorbe la radiación electromagnética en la longitud de onda del rojo (0,4 - 0,7  $\mu\text{m}$ ) y la refleja en la longitud de onda del infrarrojo cercano (0,7 - 1,3  $\mu\text{m}$ ; Berlanga-Robles y Ruiz Luna, 2007). Los pixeles resultantes del cálculo del índice vegetacional NDVI entregan valores que oscilan entre el -1 a 1, con el valor 0 que representa el valor aproximado donde empieza la ausencia de la vegetación, y los valores negativos de los pixeles entregan información de ausencia de vegetación (Muñoz, 2013).

Para identificar las zonas de cambio, tanto de ganancia o pérdida de vegetación, es necesario calcular el índice vegetacional NDVI para los momentos antes y después de efectuadas las intervenciones. La forma recurrente de comparar estas dos imágenes es por medio del cálculo de una imagen diferencial resultante de la sustracción del NDVI calculado antes de la intervención, menos el NDVI calculado después de la intervención. Esta capa resultante es conocida como  $\Delta\text{NDVI}$ . La diferencia entre las imágenes de distinta fecha da como resultado una imagen donde cada pixel es producto de la diferencia entre el pixel que corresponde a antes de la intervención menos el pixel que corresponde a después de la intervención. De esta forma se obtienen pixeles con valores positivos donde existió pérdida de vegetación, valores negativos donde existió ganancia de vegetación, y con valor cero o cercano a cero en aquellos casos donde no haya existido cambio (Escuin *et al.*, 2007).



**Figura 1.** Indicación de sectores de cambio y no cambio (modificada) (Jensen, 2005).

La Figura 1, indica un procedimiento usado para la determinación de zonas de cambio a partir de una imagen producto de la sustracción de dos imágenes de fechas distintas, permitiendo asumir el uso de intervalos de confianza cuando los píxeles de la imagen poseen una distribución normal.

Jensen (2005) (Figura 1) menciona ventajas de este procedimiento de detección de zonas de cambio; por ejemplo, que en la mayoría de los casos no hace falta corregir las anomalías atmosféricas sobre la imagen, y es un método eficiente para la identificación de cambios en los niveles digitales de los píxeles y entre fechas de adquisición de las imágenes. Sin embargo, podrían considerarse como desventajas, el desconocimiento sobre el patrón de cambio desde un período a otro y las dificultades para establecer el umbral de "cambio/no cambio".

En un ámbito práctico de la aplicación de las zonas de cambio, se presentan también ventajas y desventajas. Las principales ventajas del método sugerido, es lo económico que este resulta al compararse directamente con otros métodos de monitoreo directo, debido principalmente a que se utilizarán imágenes de libre descarga y gratuitas disponibles en la red.

Por los antecedentes antes expuestos, esta memoria de título busca proponer una metodología de detección de cortas no autorizadas que permita fortalecer y modernizar los protocolos de fiscalización y vigilancia que actualmente dispone la CONAF para el monitoreo de extensas superficies. Para ello, el método se sustenta en el apoyo de información satelital y medios de procesamiento de información disponibles en internet en modalidad de libre descarga, lo que facilita, por un lado, el entrenamiento y por otro, la aplicación de este método para apoyar la labor de fiscalización en terreno.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Construir y validar una metodología de identificación y evaluación del proceso de cortas no autorizadas en bosque nativo mediante técnicas de teledetección, en la Región del Maule.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

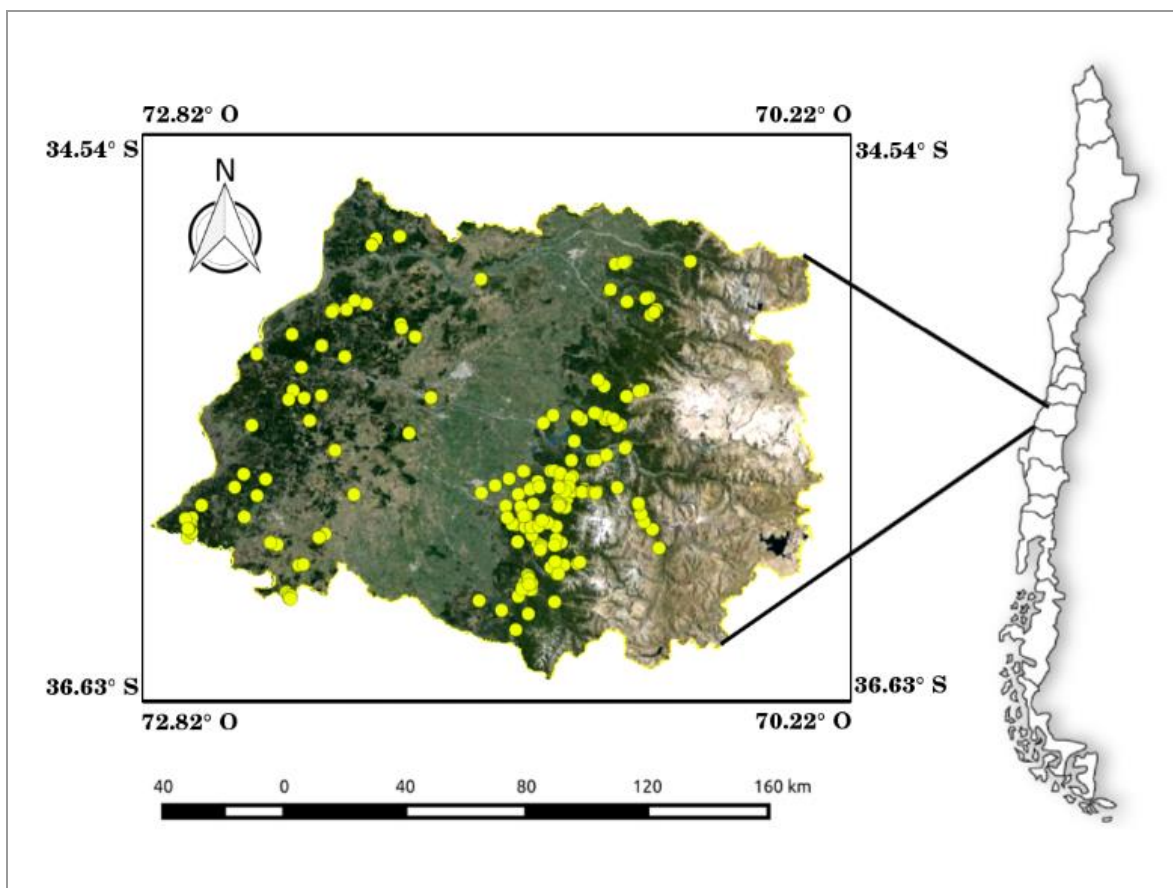
- Definir variables de diagnóstico útiles para la caracterización espacial del proceso de cortas no autorizadas como así mismo los indicadores necesarios para la metodología de evaluación.
- Identificar umbrales basados en la reflectancia de imágenes satelitales para la identificación y evaluación de cortas no autorizadas.
- Determinar el grado de fiabilidad de la metodología de evaluación satelital por medio de la revisión de los formularios de terreno utilizados en el proceso de fiscalización.
- Proponer acciones para el seguimiento del proceso de cortas no autorizadas considerando como apoyo la metodología de evaluación satelital.

## 2. MATERIAL Y MÉTODO

### 2.1 Material

#### 2.1.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde las zonas costeras y precordillera Andina de la Región del Maule. La Región del Maule se sitúa entre el paralelo  $34^{\circ}41'$  y  $36^{\circ}33'$  latitud sur. La superficie total de la región es de  $30.469 \text{ km}^2$ . A escala regional, el área presentaba hasta el año 1999  $370.330 \text{ ha}$  de bosque nativo, dentro de los que tienen mayor importancia en superficie están los tipos forestales Roble–Raulí–Coihue, Roble–Hualo y Ciprés de la Cordillera.



**Figura 2.** Área de estudio Región del Maule junto con los registros de cortas no autorizadas.

En la Figura 2, se aprecian en color amarillo las cortas no autorizadas proporcionadas por CONAF, 548 registros de corta que afectaron a bosque nativo, los registros provienen de las fichas de fiscalización y monitoreo entre los años 2009 a 2015.

### **2.1.2 Fuentes de información**

En el estudio se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8. Este producto gratuito disponible en la red posee una resolución espacial, temporal y espectral acorde con las necesidades de observación y seguimiento de cambios sobre la superficie del área de estudio. Este producto entrega una frecuencia de adquisición de datos sobre un mismo punto cada 16 días, logrando obtener entre 22 a 23 imágenes de un mismo punto en un año (Roy *et al.*, 2014). Además, se utilizó un modelo digital de terreno ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model), de resolución espacial de 30 x 30 metros, con el fin de corregir topográficamente las imágenes adquiridas.

En cuanto a la información cartográfica complementaria y medios de apoyo, se utilizaron antecedentes geográficos de libre acceso disponibles en internet como asimismo software para tratamiento de información espacial. En particular se utilizaron los programas de código libre y gratuitos QGIS (QGIS Development Team, 2017) y R-project (R Development Core Team, 2008). El modelo de datos utilizados fue de tipo vector y ráster (para el caso de información satelital). Se definieron escalas de trabajo de 1:4.000, 1:5.000, 1:7.000 y 1:10.000 para la realización de un análisis detallado sobre cada registro de corta.

Se trabajó con una base de datos recopilados de fichas de terreno que contienen información como: fecha de control, superficie multada, comuna, nombre del predio, superficie del predio, rol del predio, coordenadas geográficas X e Y, referencia de la ubicación del punto (lugar de corta, entrada al predio, casa del cuidador, etc.), superficie de corta (existieron predios con más de una corta no autorizada), producto extraído, presencia del producto, cantidad de producto extraído, tipo de unidad del producto (metros cúbicos, metro ruma, unidades de individuos, etc.) y tipo forestal. Fue en estos sectores en donde se verificó la presencia de actividad de corta no autorizada. Entre la información útil para el desarrollo del estudio, se utilizó la coordenada de corta no autorizada, la superficie de corta y tipo forestal afectado. Esta información fue procesada y tabulada para ser compatibilizada en el trabajo con el sistema de información geográfica.

## **2.2 Método**

Se seleccionaron 60 registros de cortas no autorizadas de las 548 existente en la base de datos. Para la selección de estos registros de cortas se crearon tres categorías de superficie de cortas no autorizadas, CNA grandes (de 4,2 hasta 40,5 hectáreas), CNA medianas (0,2 hasta 4,1 hectáreas) y CNA pequeñas (0,01 hasta 0,19 hectáreas), donde se seleccionaron 20 registros de corta para cada categoría propuesta. El fundamento de la creación de este criterio fue con el fin de obtener una muestra de los registros que de forma obligada perteneciera a alguna categoría de superficie, para de esta manera conocer si la metodología propuesta tiene validez en la identificación de cortas tanto de una gran superficie, como en cortas de una pequeña superficie, incluso menor al pixel utilizado en la realización de este estudio.

Una vez seleccionados los registros de cortas, fueron descargadas las imágenes satelitales Landsat 8 para los periodos que comprenden antes y después de efectuada cada corta (un par de imágenes para cada registro de corta), como criterio adicional en la descarga de las



imágenes se consideraron aquellas imágenes que tuvieran una nubosidad inferior al 10% sobre el continente. Por motivos de monitoreo se propuso en primera instancia descargar imágenes lo más cercana en tiempo a la fecha de la detección de la corta, pero también fue considerada la fenología de las especies principales según el tipo forestal afectado. Por lo cual, para aquellas CNA que afectaron a especies de hoja caduca (como, por ejemplo, Roble o Hualo) que fueron efectuadas en invierno, fue necesario descargar en las imágenes para los periodos de primavera verano, de esta forma se pudo asegurar la existencia de hojas en estas especies al momento de aplicar el método

### 2.2.1 Tratamiento previo de las imágenes

Se realizaron correcciones atmosféricas para convertir los niveles digitales (ND) de las imágenes en parámetros físicos, en este caso reflectividad aparente desde el tope de la atmosfera (Reflectividad TOA<sup>1</sup>). De esta forma es posible comparar los datos obtenidos de las imágenes en diferentes fechas y además permitir el trabajo con diferentes sensores (Chuvienco, 1996). También fue necesario corregir las imágenes topográficamente, debido a que los accidentes geográficos normalmente proyectan sombras sobre la superficie. Así pues, Del Pilar (2010) considera el componente topográfico para resolver anomalías en los niveles digitales producto del efecto del relieve. Pimple *et al.* (2017) y Muradyan *et al.* (2016) señalan que las sombras producidas por la topografía de montañas irregulares es uno de los mayores obstáculos en el mapeo de bosques por medio de imágenes satelitales.

Para este estudio, se consideraron las falsas zonas de umbría que presentan para el sensor niveles digitales asociados a una menor reflectividad del valor esperado, y zonas soleadas que presentan una reflectividad más alta de lo esperado. Por ello, se realizó la prueba de los siguientes métodos de correcciones topográficas: Cosine correction, Minnaert y C-correction, disponibles en el programa SAGA (Conrad *et al.*, 2015) para compensar estas diferencias de iluminación.

### 2.2.2 Cálculo de índices vegetacionales

Se realizó el cálculo de NDVI para antes y después de las intervenciones (Ecuación 1).

$$\text{NDVI} = (\text{IRC} - \text{R}) / (\text{IRC} + \text{R}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

NDVI: Índice de vegetación normalizada

IRC: Infrarrojo cercano (radiación electromagnética entre 0,7 – 1,3  $\mu\text{m}$ ).

R: Banda roja (radiación electromagnética entre 0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$ ).

---

<sup>1</sup> Proporción de energía electromagnética captada por un sensor ubicado sobre la atmosfera terrestre (PEREZ. C; MUÑOZ, A. 2006), es una forma simple de corrección atmosférica, se formula a partir de los supuestos de que no existe influencia de la atmosfera y que la superficie de incidencia de la radiación solar es perfectamente difusora. (MARTIN et al. 2005).

Luego se calculó una imagen diferencial denominada  $\Delta\text{NDVI}$ , la cual se obtuvo de la sustracción de los índices vegetaciones calculados, antes menos después, obteniendo una imagen donde sus píxeles guardan la información de los cambios ocurridos entre una imagen y la otra.

$$\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}_{\text{antes}} - \text{NDVI}_{\text{despues}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Los píxeles calculados en la imagen  $\Delta\text{NDVI}$  son interpretados de la siguiente manera, aquellos que tengan valor cero o cercano a cero no presentan cambios y aquellos que se encuentren más alejados del valor cero son píxeles que presenten cambios como ganancia o pérdida de vegetación (Escuin *et al.*, 2007). Se utilizó este índice como variable de diagnóstico para identificar cambios.

### 2.2.3 Definición del área de interés

Se definieron distintas escalas de análisis con el fin de identificar un óptimo al momento de identificar las zonas de CNA. Las escalas de análisis fueron construidas a partir de la superficie de corta más grande encontrada dentro de la base de datos de CNA. Luego por medio de una progresión geométrica se determinaron las siguientes escalas:

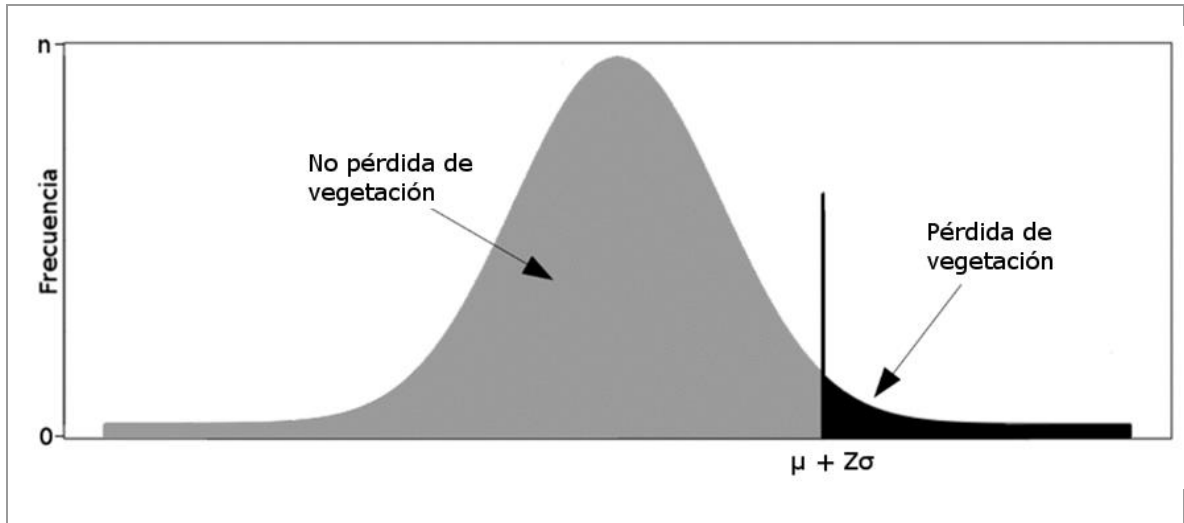
- ◆ M0 (40,5 hectáreas) escala 1:4.000
- ◆ M1 (81 hectáreas) escala 1:5.000
- ◆ M2 (162 hectáreas) escala 1:7.000
- ◆ M3 (324 hectáreas) escala 1:10.000

A partir de estas escalas se construyeron máscaras de corte, las cuales fueron utilizadas para recortar las porciones correspondientes a las áreas de interés. El objetivo de este corte fue cambiar la población de píxeles a utilizar en el análisis, donde las máscaras más grandes tenían una mayor población de píxeles que las más pequeñas.

### 2.2.4 Reclasificación

Se calcularon parámetros estadísticos de los píxeles pertenecientes a las imágenes  $\Delta\text{NDVI}$  a las distintas escalas de análisis antes mencionadas con complementos del programa QGIS. Los parámetros calculados fueron el promedio de la población de píxeles y la desviación estándar. Con estos parámetros fueron ajustadas funciones de distribución normal para cada imagen de corta.

Como ocurre en el caso de una imagen que presenta el histograma de sus píxeles de forma simétrica, los valores alejados del promedio hacia los extremos entregan la información de cambio, en este caso, aquellos valores más positivos entregan la información correspondiente a las zonas de pérdida de cobertura vegetal (Figura 3).



**Figura 3.** Determinación del valor crítico a partir del promedio, desviación estándar y valor Z utilizado.

Los valores Z utilizados en la determinación de los valores críticos que determinan el umbral de cambio provienen de una distribución normal, los porcentajes de pérdida y no pérdida de vegetación señalados en el Cuadro 1, están relacionados con la superficie bajo la curva (expresada en porcentaje) de la función de la Figura 3.

De esta forma, valores Z señalados (Cuadro 1), indican el número de veces que se ve desplazada la desviación estándar desde el centro de la curva hacia el lado derecho, para ello se hace uso de los estadísticos calculados para cada imagen  $\Delta$ NDVI, desviación estándar ( $\sigma$ ) y el promedio ( $\mu$ ). Donde, a modo de ejemplo, 2,5 veces desplazada la desviación estándar hacia la derecha de la curva ( $\mu + 2,5 \sigma$ ), la región de “no pérdida de vegetación” concentraría el 99,38% de los píxeles, por lo cual solo un 0,62% restante sería reclasificado como píxeles que perdieron vegetación.

**Cuadro 1.** Valores Z utilizados en las iteraciones, junto con los porcentajes correspondientes a una distribución normal estándar.

Z	Porcentaje de no pérdida de vegetación	Porcentaje de pérdida de vegetación
2,5	99,38	0,62
2,45	99,29	0,71
2,4	99,18	0,82
2,35	99,06	0,94
2,3	98,93	1,07
2,25	98,78	1,22
2,2	98,61	1,39
2,15	98,42	1,58
2,1	98,21	1,79
2,05	97,98	2,02
2	97,72	2,28
1,95	97,44	2,56
1,9	97,13	2,87

<b>Z</b>	<b>Porcentaje de no pérdida de vegetación</b>	<b>Porcentaje de pérdida de vegetación</b>
1,85	96,78	3,22
1,8	96,41	3,59
1,75	95,99	4,01
1,7	95,54	4,46
1,65	95,05	4,95
1,6	94,52	5,48
1,55	93,94	6,06
1,5	93,32	6,68
1,45	92,65	7,35
1,4	91,92	8,08
1,35	91,15	8,85
1,3	90,32	9,68
1,25	89,44	10,56
1,2	88,49	11,51
1,15	87,49	12,51
1,1	86,43	13,57
1,05	85,31	14,69
1	84,13	15,87
0,95	82,89	17,11
0,9	81,59	18,41
0,85	80,23	19,77
0,8	78,81	21,19
0,75	77,34	22,66
0,7	75,80	24,20
0,65	74,22	25,78
0,6	72,57	27,43
0,55	70,88	29,12
0,5	69,15	30,85

Para realizar las iteraciones del valor Z a las imágenes de corta seleccionadas, se utilizaron los valores del Cuadro 1. Este valor Z fue ajustado para cada escala de análisis, otorgando los valores críticos que definieron los umbrales de cambio. Estos umbrales ayudaron a delimitar las zonas de ganancia de vegetación, no pérdida de vegetación y pérdida de vegetación (Ecuación 3), y basados en los valores críticos obtenidos, fueron reclasificadas las imágenes  $\Delta$ NDVI para determinar geográficamente los sectores de pérdida de vegetación bajo distintos intervalos de confianza:

$$\text{no pérdida} \leq \mu + Z\sigma \quad \text{Ecuación 3}$$

Así fue como se determinaron los porcentajes de pérdida y no pérdida de vegetación para cada intervalo de confianza, donde los porcentajes de cambio corresponden a 1 menos el nivel de confianza, el cual también tiene su equivalente en el porcentaje final seleccionado de la imagen. Después se validó la metodología, para conocer si los cambios detectados por las imágenes tienen coincidencia con los pixeles de cortas no autorizadas fiscalizadas en terreno.

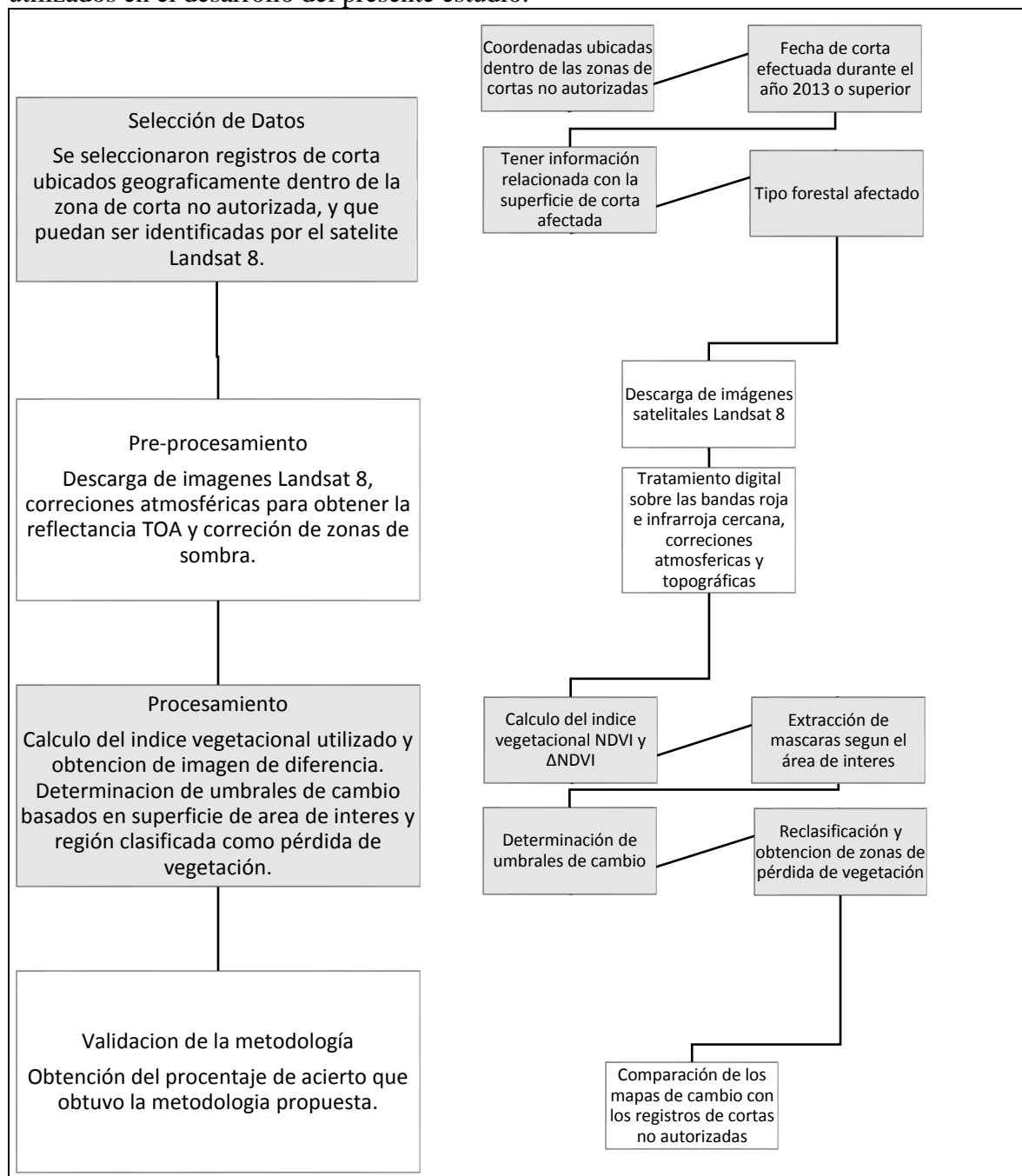
### 2.2.5 Validación de la metodología

Para la validación de la metodología se calculó el porcentaje de acierto y no acierto de la metodología, donde se realizó una comparación entre los píxeles de corta correctamente identificados dentro de la región de cambio, y el número de cortas utilizadas para el desarrollo del método. La validación fue realizada para cada escala de análisis e intervalo de confianza definido. De esta forma se pudo conocer si existe una relación entre los cambios de pérdida de vegetación identificados por las imágenes satelitales, con los disturbios que significaron las cortas no autorizadas (Ecuación 4).

$$\frac{(\text{Numero de píxeles correctamente identificados como corta})}{(\text{Total de píxeles identificados como corta})} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

## 2.2.6 Diagrama del procedimiento

A continuación (Figura 4), se presenta un diagrama a modo de resumen de los procedimientos utilizados en el desarrollo del presente estudio.

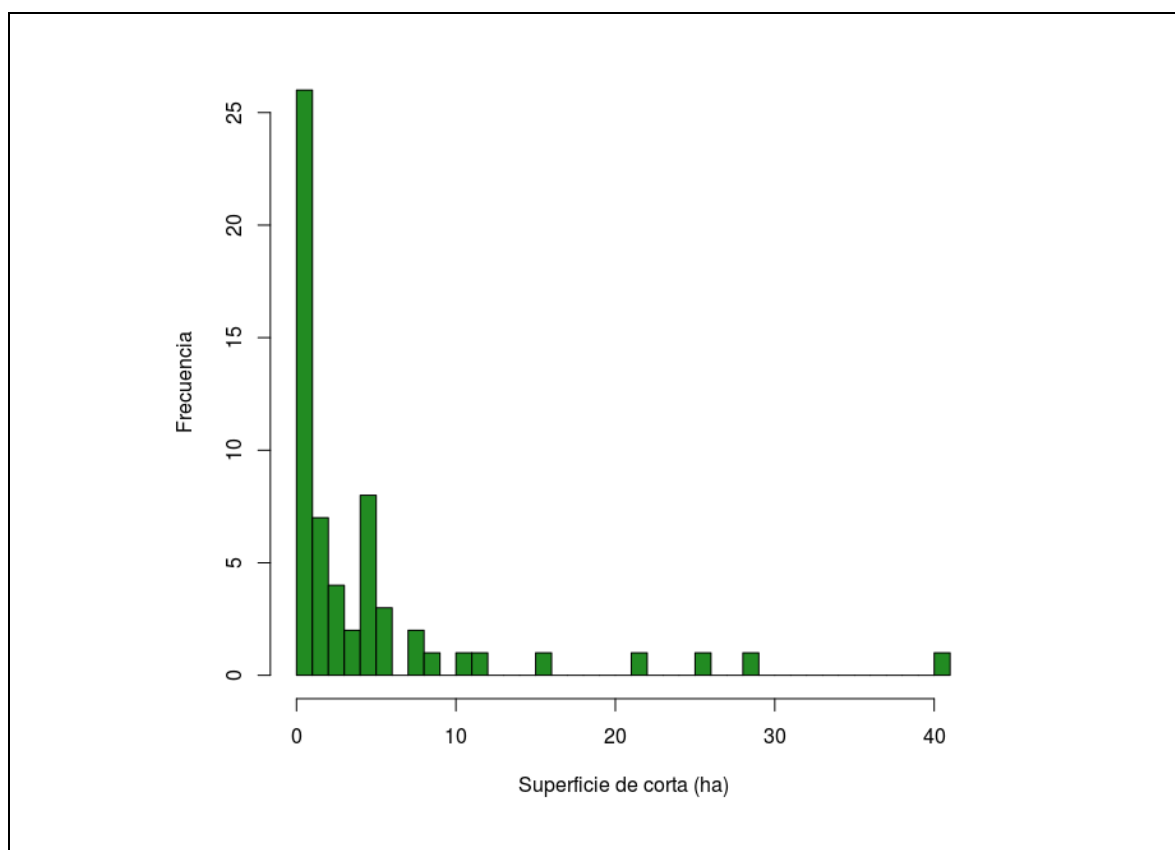


**Figura 4.** Cuadro resumen de los procedimientos realizados en la metodología.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Datos seleccionados

Solo pudieron ser utilizados 48 registros de los 60 datos seleccionados originalmente para la realización de este estudio (Apéndice 1). Los datos descartados del análisis fueron eliminados debido a que: los puntos utilizados como referencia no entregaban con seguridad su ubicación dentro de la zona de corta no autorizada, los registros de corta se ubicaban en zonas de sombra que impidieron el análisis o no se lograron descargar imágenes libres de nubes del área de interés. La selección de cortas dentro de cada criterio fue realizada de forma aleatoria.



**Figura 5.** Dispersión en superficie de los registros de cortas seleccionados.

La mayoría de las superficies seleccionadas (Figura 5) se concentran en valores cercanos a las 100 m<sup>2</sup>, la cual fue el rango de cortas más frecuente de la selección.

#### 3.2 Descarga y tratamiento de imágenes

Luego de probar los métodos de correcciones topográficas: Cosine correction, Minnaert y C-correction, se realizó una comparación visual de las imágenes resultantes donde se decidió

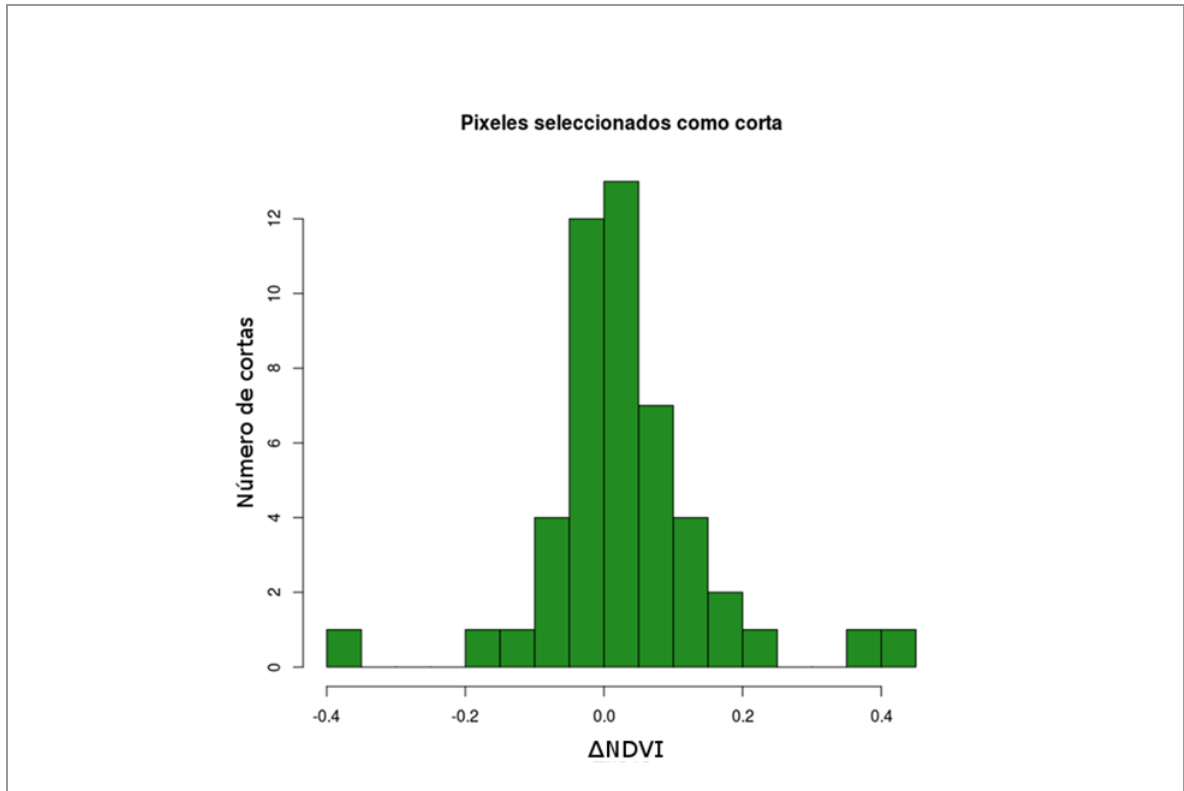
utilizar el método Minnaer, debido a que fue el que aparentemente presentó menores diferencias entre aquellas zonas que se encontraban expuestas de forma más directa al sol, con aquellas que no se encontraban directamente iluminadas. Pimple *et al.* (2017) realizó un estudio donde comparó diferentes métodos de correcciones topográficas, en los cuales Minnaert fue uno de los que presentaron peores resultados, recomendando el método de corrección topográfica SEC (Statical Empirical Corrección) y el modelo digital de terreno SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) de resolución 30 m x 30 m. Se estima que estas diferencias de resultados se deben a las condiciones de terreno en las cuales se realizaron los estudios, por lo cual para estudios posteriores se debería considerar hacer una prueba de distintos métodos de correcciones topográficas para seleccionar el método que mejor se ajuste.

Moreira *et al.* (2016) indica que el índice vegetacional NDVI, es uno de los menos afectados por las condiciones de relieve en comparación con otros índices utilizados para observar la vegetación, pero aun así recomienda la realización de correcciones topográficas en aquellos terrenos que sean irregulares.

### **3.3 Definición de variables de diagnóstico**

De acuerdo con la Ecuación 1, se aplicó el índice de diferencia normalizada para detectar eventuales cambios en la cobertura arbórea para cada una de las fechas de las intervenciones, bajo la restricción de encontrar y seleccionar aquellas fechas más cercanas a cada uno de los registros de la base de datos (situación antes y después de la intervención). Para la interpretación de las coberturas de vegetación fue utilizado el índice  $\Delta$ NDVI (Ecuación 2) para identificar los cambios ocurridos. La muestra utilizada fue el valor  $\Delta$ NDVI (Apéndice II) del pixel que correspondía al sector de corta (Figura 6).





**Figura 6.** Distribución de los píxeles que buscan ser catalogados como corta.

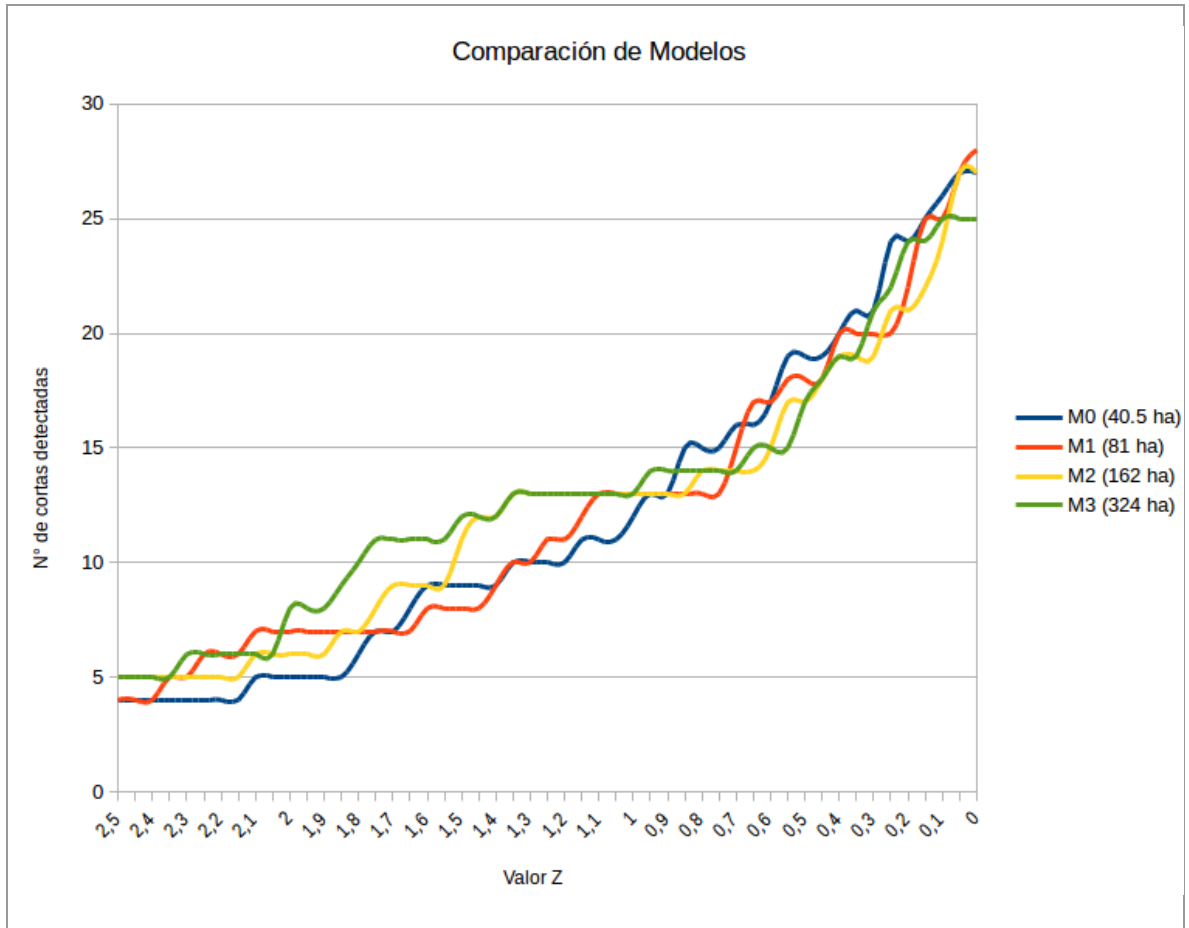
En la Figura 6 se puede observar que existen registros seleccionados que presentan valores  $\Delta\text{NDVI}$  que oscilan entre  $-0,4$  hasta  $0,4$  aproximadamente, encontrándose la mayoría concentrados en el valor cero o muy cercano a cero. Dentro de la muestra de píxeles catalogados como corta, se obtuvieron píxeles con valores negativos, que según Escuin *et al* (2007), son píxeles donde existe ganancia de vegetación, pero que debieron ser clasificados y analizados de forma independiente para cada imagen, esto debido a que los valores críticos variaban en función de cada histograma, ya que los parámetros estadísticos fueron diferentes para cada corta y para cada escala de análisis. Por esta razón se utilizó el valor Z como indicador de los valores críticos que definió el umbral de cambio ( $\mu + Z\sigma$ ). Los resultados de cortas detectadas dentro de las regiones de cambio, para los valores Z entre 0 hasta 2,5 se muestran en el Cuadro 2:

**Cuadro 2.** Número de cortas detectadas de los 48 registros de corta seleccionados, para cada valor Z y para las máscaras M0, M1, M2 y M3.

Valor Z	% Región de cambio	Nº de cortas detectadas en	Nº de cortas detectadas en	Nº de cortas detectadas en	Nº de cortas detectadas en
		M0 E 1:4.000 40,5 ha	M1 E 1:5.000 81,0 ha	M2 E 1:7.000 162,0 ha	M3 E 1: 10.000 362,0 ha
2,5	0,62	4	4	5	5
2,45	0,71	4	4	5	5
2,4	0,82	4	4	5	5
2,35	0,94	4	5	5	5

Valor Z	% Región de cambio	Nº de cortas detectadas en	Nº de cortas detectadas en	Nº de cortas detectadas en	Nº de cortas detectadas en
		M0 E 1:4.000 40,5 ha	M1 E 1:5.000 81,0 ha	M2 E 1:7.000 162,0 ha	M3 E 1: 10.000 362,0 ha
2,3	1,07	4	5	5	6
2,25	1,22	4	6	5	6
2,2	1,39	4	6	5	6
2,15	1,58	4	6	5	6
2,1	1,79	5	7	6	6
2,05	2,02	5	7	6	6
2	2,28	5	7	6	8
1,95	2,56	5	7	6	8
1,9	2,87	5	7	6	8
1,85	3,22	5	7	7	9
1,8	3,59	6	7	7	10
1,75	4,01	7	7	8	11
1,7	4,46	7	7	9	11
1,65	4,95	8	7	9	11
1,6	5,48	9	8	9	11
1,55	6,06	9	8	9	11
1,5	6,68	9	8	11	12
1,45	7,35	9	8	12	12
1,4	8,08	9	9	12	12
1,35	8,85	10	10	13	13
1,3	9,68	10	10	13	13
1,25	10,56	10	11	13	13
1,2	11,51	10	11	13	13
1,15	12,51	11	12	13	13
1,1	13,57	11	13	13	13
1,05	14,69	11	13	13	13
1	15,87	12	13	13	13
0,95	17,11	13	13	13	14
0,9	18,41	13	13	13	14
0,85	19,77	15	13	13	14
0,8	21,19	15	13	14	14
0,75	22,66	15	13	14	14
0,7	24,20	16	15	14	14
0,65	25,78	16	17	14	15
0,6	27,43	17	17	15	15
0,55	29,12	19	18	17	15
0,5	30,85	19	18	17	17

En Figura 7 se puede observar que, a medida que va disminuyendo el valor Z, van aumentando el número de cortas que coinciden con los mapas de cambios obtenidos.



**Figura 7.** Aumento de detección de cortas no autorizadas a medida que el valor Z disminuye. En la leyenda se observan en colores las superficies de las escalas de análisis utilizadas.

Al realizar una comparación de los modelos de distintos tamaños de máscaras, se puede observar que aumenta la eficacia del método cuando disminuye el valor de Z. Esto es porque el valor de Z determina el valor crítico que indica que pixeles son considerados como pérdida o no pérdida de vegetación, y al ir disminuyendo el valor de Z, este criterio se vuelve menos estricto, aumentando la superficie clasificada como pérdida de vegetación, indicando también que existe una relación entre el valor de Z con las cortas detectadas, asumiendo que los resultados no son aleatorios (Figura 7).

Además, en la Figura 7 se puede observar un punto de quiebre en el crecimiento de la detección de las cortas no autorizadas. El punto de quiebre se encuentra cerca del valor  $Z \sim 0,65$ , donde se puede observar un aumento en la pendiente del gráfico (Figura 7). Se observa además un mayor crecimiento en la detección de cortas por unidad de disminución del valor Z, entregando una región de cambio cercana al 25% de la imagen según el Cuadro 1.

### 3.4 Grado de fiabilidad de la metodología

Se tomaron los valores Z de los rangos entre 0,674 y 1,96<sup>2</sup>, para cada una de las máscaras utilizadas. Basados en el número de cortas seleccionadas para la validación de la metodología se calculó el porcentaje de acierto que existió para cada umbral seleccionado, los resultados obtenidos fueron los siguientes (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Resultados específicos para cada máscara y cada valor Z: N=48.

Z	Región de cambio	M0 (40.5 ha)	M1 (81 ha)	M2 (162 ha)	M3 (324 ha)
1,96	2,5%	10,42%	14,58%	12,50%	16,67%
1,645	5%	16,67%	14,58%	18,75%	22,92%
1,282	10%	20,83%	20,83%	27,08%	27,08%
1,036	15%	25,00%	27,08%	27,08%	27,08%
0,842	20%	31,25%	27,08%	27,08%	29,17%
0,674	25%	33,33%	33,33%	29,17%	29,17%

La metodología se vuelve más efectiva en la detección de cortas no autorizadas en la medida que va disminuyendo el valor de Z. Esto es, debido a que, al definir un valor crítico de corte cercano a  $Z = 0$ , aumenta la región de cambio, permitiendo que aquellos pixeles seleccionados como corta puedan entrar en dicha región. En términos prácticos, la región de cambio es equivalente a la región reclasificada como pérdida de vegetación para cada imagen, los cuales al ser mayores significa una mayor superficie a fiscalizar con el fin de detectar una zona de corta no autorizada.

Se puede observar en el Cuadro 3, que los mejores resultados se obtienen utilizando una máscara de análisis de 40,5 y de 81 hectáreas, con un 33,33% de cortas no autorizadas detectadas, pero, considerando un 25% de superficie catalogada como región de cambio. Para la máscara de 40,5 significarían 10,1 hectáreas que necesitarían ser validadas en terreno para detectar la corta, y para la máscara de 81 hectáreas significarían 20,2 hectáreas que necesitarían ser visitadas para identificar una corta no autorizada.

Adicionalmente se realizó el mismo análisis de manera específica para cada categoría de corta.

---

<sup>2</sup> Se utilizaron estos valores de Z a modo de resumir los Cuadros N°2, 3, 4, 5 y 6, ya que es común ver estos valores en bibliografía debido a que están relacionados con los porcentajes de la región de cambio, entregando valores que oscilan entre el 2,5% hasta el 25%

**Cuadro 4.** Porcentaje de cortas no autorizadas grandes detectadas por cada máscara. n=16.

Z	Región de cambio	M0 (40.5 ha)	M1 (81 ha)	M2 (162 ha)	M3 (324 ha)
1,96	2,5%	12.50%	18.75%	18.75%	25.00%
1,645	5%	18.75%	18.75%	25.00%	25.00%
1,282	10%	18.75%	18.75%	25.00%	25.00%
1,036	15%	31.25%	25.00%	25.00%	25.00%
0,842	20%	31.25%	25.00%	25.00%	31.25%
0,674	25%	31.25%	37.50%	31.25%	31.25%

Para las cortas no autorizadas más grandes (Cuadro 4), los mejores resultados se obtuvieron para un valor de Z igual a 0,674 con 37,5% de acierto en detección de cortas. Este resultado se dio con un 25% de región de cambio, utilizando una máscara de análisis de 81 hectáreas.

**Cuadro 5.** Porcentaje de cortas no autorizadas medianas detectadas por cada máscara. n=13.

Z	Región de cambio	M0 (40.5 ha)	M1 (81 ha)	M2 (162 ha)	M3 (324 ha)
1,96	2,5%	7,69%	15,38%	15,38%	15,38%
1,645	5%	23,08%	15,38%	15,38%	23,08%
1,282	10%	30,77%	30,77%	30,77%	30,77%
1,036	15%	30,77%	30,77%	30,77%	30,77%
0,842	20%	30,77%	30,77%	30,77%	30,77%
0,674	25%	30,77%	30,77%	30,77%	30,77%

Para las cortas catalogadas como medianas (Cuadro 5) los resultados se estabilizaron en un 30,77% de acierto cuando se seleccionó una región de cambio de un 10% de la máscara utilizada.

**Cuadro 6.** Porcentaje de cortas no autorizadas pequeñas detectadas por cada máscara. n=19.

Z	Región de cambio	M0 (40.5 ha)	M1 (81 ha)	M2 (162 ha)	M3 (324 ha)
1,96	2,5%	10,53%	10,53%	5,26%	10,53%
1,645	5%	10,53%	10,53%	15,79%	21,05%
1,282	10%	15,79%	15,79%	26,32%	26,32%
1,036	15%	15,79%	26,32%	26,32%	26,32%
0,842	20%	31,58%	26,32%	26,32%	26,32%
0,674	25%	36,84%	31,58%	26,32%	26,32%

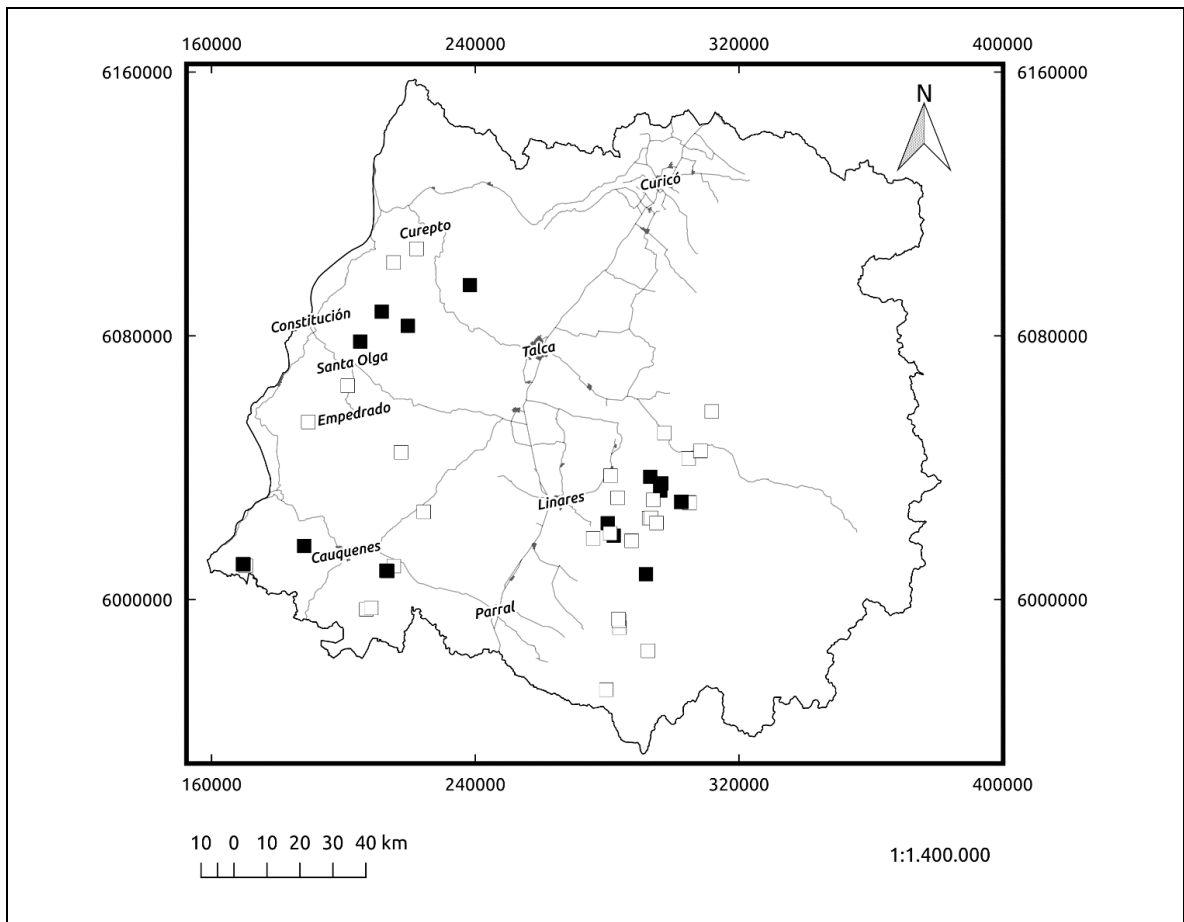
Para las cortas más pequeñas (Cuadro 6) los mejores resultados obtenidos fueron para la máscara más pequeña (40,5 hectáreas), con un 36,84% de detección de cortas no autorizadas y considerando un 25% de región de cambio en la clasificación de las imágenes.

Jin y Sader (2005) indican que utilizando imágenes MODIS, de resolución espacial de 250 m x 250 m, es posible obtener buenos resultados en la estimación de parches de gran superficie, donde aquellos disturbios que hayan afectado sobre 20 hectáreas pudieron ser explicados por las imágenes satelitales con un 76% de precisión, y los disturbios sobre 50

hectáreas detectados con aproximadamente un 90% de precisión. Para la realización de este estudio no se disponía de suficientes registros de superficies similares a las utilizadas en el estudio de Jin y Sader (2005), por lo cual no se pudo llegar a resultados similares.

La región de cambio se transforma en una variable importante al momento de definir una escala de análisis, debido a que mientras mayor sea la región de cambio en porcentaje, mayores serán los esfuerzos efectuados en las campañas de terreno para identificar las cortas no autorizadas dentro de las zonas de cambio. Lo anterior se debe a que el uso de la metodología por medio del cálculo de los índices NDVI, permite detectar una gran variedad de disturbios, entre ellos no solo las cortas no autorizadas, sino también las cortas que son efectuadas por medio de planes de manejo aprobados, o disturbios producidos por la naturaleza, tales como desmoronamientos, aumento del caudal de los ríos, etc. Por dichas razones las cortas no autorizadas deben ser validadas en terreno a partir de los mapas de cambio producidos, en el cual, para optimizar recursos, se recomienda el uso de una cartografía detallada de las zonas a visitar que ayude en la programación de las campañas de terreno.

Los mejores resultados de detección de cortas no autorizadas para cada valor Z y escala de análisis fueron los siguientes:

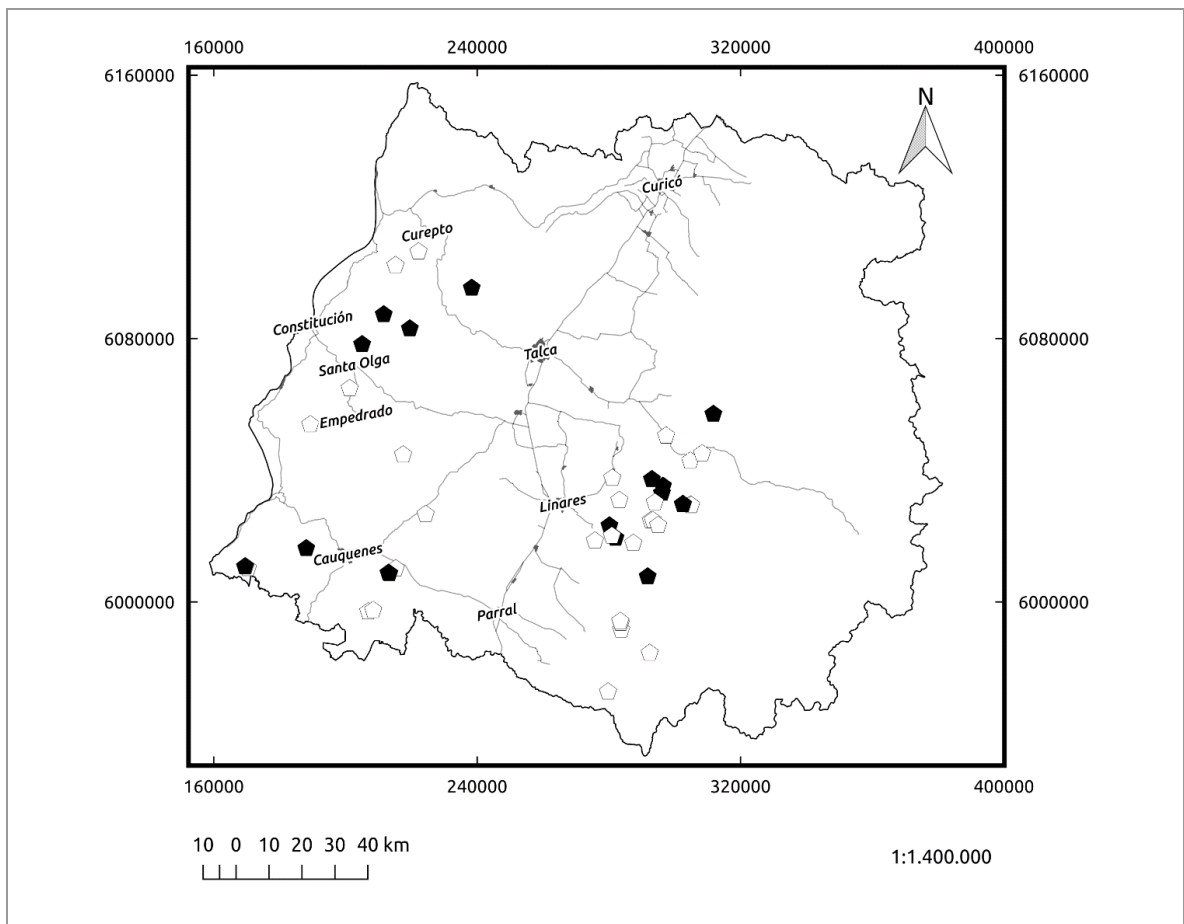


**Figura 8.** Resultados del método para un tamaño de máscara M0 (40,5 hectáreas), expresado a escala 1:4.000. Base comparativa: Cartografía regional escala 1:1.400.000.

Las cortas detectadas y no detectadas fueron cartografiadas. Como se puede ver en la Figura 8, los elementos de la simbología con tonalidad oscura corresponden a los registros que fueron detectados por el método propuesto, y aquellos que tienen tonalidad blanca son aquellas cortas no autorizadas que no pudieron ser detectadas.

La máscara M0 en la Figura 8, detectó un 33,33% de CNA, entre ellas 5 dentro de la categoría de grandes, 4 en la categoría de medianas y 7 dentro de la categoría de pequeñas. El valor de Z utilizado fue de 0,674, con un 25% de región de cambio.

Esta máscara fue la más efectiva en la detección de cortas de pequeña superficie, y fue una de las dos que obtuvieron mejores resultados, detectando un total de 16 cortas no autorizadas de los registros seleccionados para la realización de este estudio.

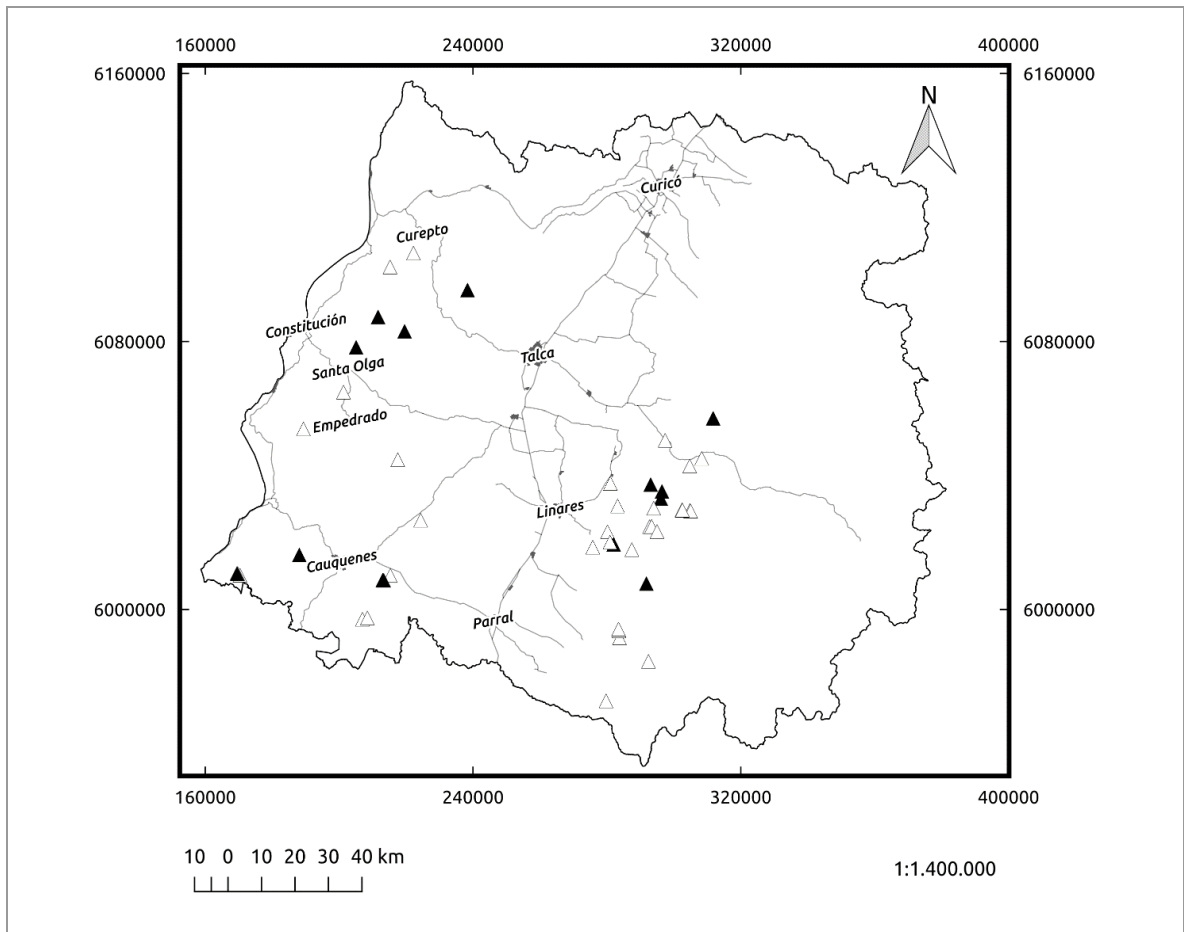


**Figura 9.** Resultados del método para un tamaño de máscara M1 (81 hectáreas), expresado a escala 1:5.000. Base comparativa: Cartografía regional escala 1:1.400.000.

Como se puede ver en la Figura 9, los elementos de la simbología con tonalidad oscura corresponden a los registros que fueron detectados por el método propuesto, y aquellos que tienen tonalidad blanca son aquellas cortas no autorizadas que no pudieron ser detectadas.

La máscara M1 en la Figura 9, detectó un 33,33% de CNA, entre ellas 6 dentro de la categoría de grandes, 4 en la categoría de medianas y 6 dentro de la categoría de pequeñas. El valor Z utilizado fue de 0,674, con un 25% de región de cambio.

Esta máscara también se encuentra entre las que presentaron mejores resultados. Logró identificar un total de 16 cortas no autorizadas desde la base de datos de cortas seleccionadas utilizadas en este estudio. A su vez, esta máscara fue la que presentó mejores resultados en la detección de cortas que se encuentran dentro de la categoría de grandes.

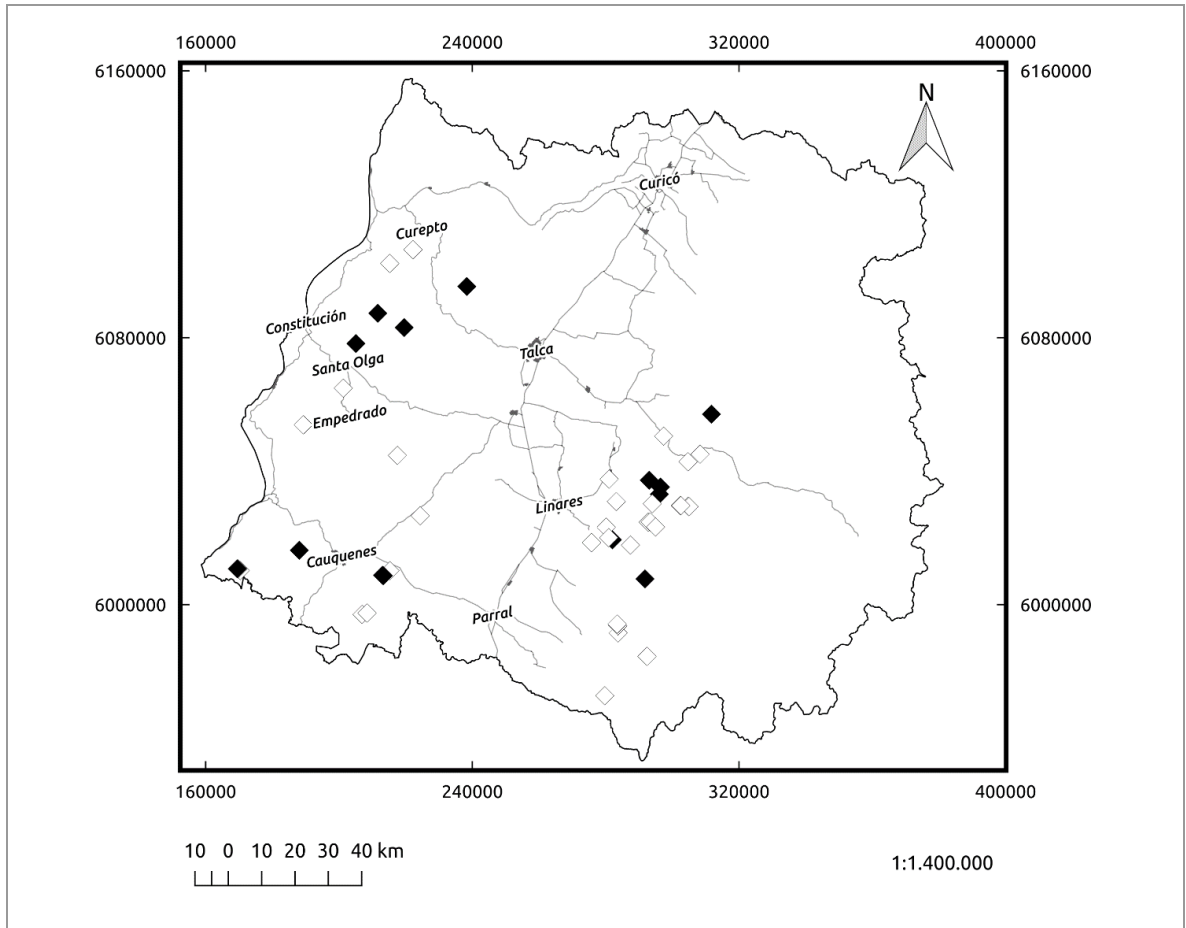


**Figura 10.** Resultados del método para un tamaño de máscara M2 (162 hectáreas), expresado a escala 1:7.000. Base comparativa: Cartografía regional escala 1:1.400.000.

Como se puede ver en la Figura 10, los elementos de la simbología con tonalidad oscura corresponden a los registros que fueron detectados por el método propuesto, y aquellos que tienen tonalidad blanca son aquellas cortas no autorizadas que no pudieron ser detectadas.

La máscara M2 (Figura 10), detectó un 29,17% de CNA, entre ellas 5 dentro de la categoría de grandes, 4 en la categoría de medianas y 5 dentro de la categoría de pequeñas. El valor Z utilizado fue de 0,674, con un 25% de región de cambio.





**Figura 11.** Resultados del método para un tamaño de máscara M3 (324 hectáreas), expresado a escala 1:10.000. Base comparativa: Cartografía regional escala 1:1.400.000.

Como se puede ver en la Figura 11, los elementos de la simbología con tonalidad oscura corresponden a los registros que fueron detectados por el método propuesto, y aquellos que tienen tonalidad blanca son aquellas cortas no autorizadas que no pudieron ser detectadas.

La máscara M3 (Figura 11), detectó un 29,17% de CNA, entre ellas 5 dentro de la categoría de grandes, 4 en la categoría de medianas y 5 dentro de la categoría de pequeñas. El valor Z utilizado fue de 0,842, con un 20% de región de cambio.

No existieron grandes diferencias entre las máscaras M2 y M3 en la detección de cortas, obteniendo resultados similares en todas las categorías de cortas.

Observando los mapas de las Figuras 8, 9, 10 y 11, se puede ver que existe una tendencia en las cortas no autorizadas detectadas para cada una de las máscaras, donde las mismas cortas son frecuentemente seleccionadas por el método.

Dentro de las cortas utilizadas para la validación de la metodología, existieron cortas que fueron detectadas por lo menos una sola vez por el método propuesto, en comparación con

otras cortas que no pudieron ser detectadas, debido a que los píxeles de la muestra no entraron dentro de la región de cambio de los respectivos histogramas de cada imagen.

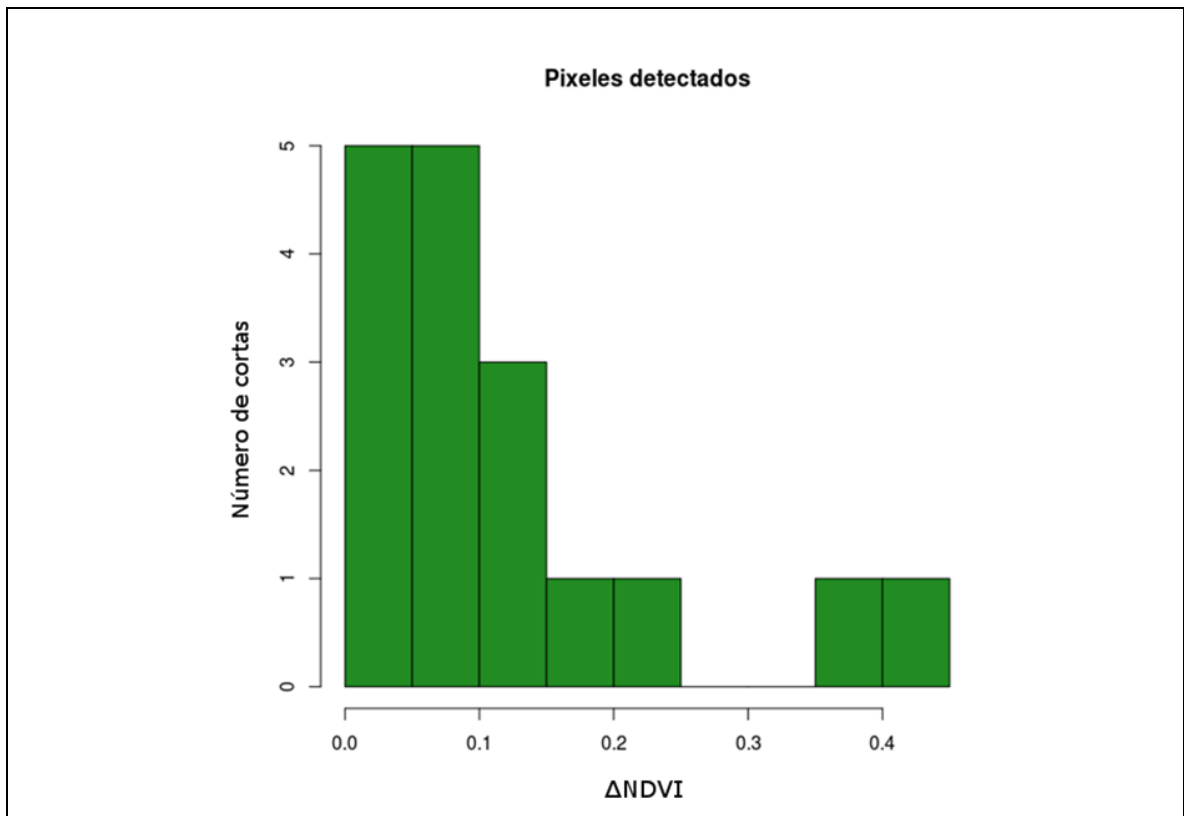
A continuación, se señalan las cortas que fueron detectadas al menos una vez por la metodología (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Cortas detectadas por la metodología.

ID corta	$\Delta$ NDVI	M 0	M 1	M 2	M 3	Superficie de corta (ha)	Tipo forestal
60	0,0019804835	0	1	1	1	8	ROBLE, RAULI, COIGUE
68	0,0288656354	1	1	0	0	0,04	ROBLE HUALO
100	0,3516012728	1	1	1	1	2,4	ROBLE HUALO
121	0,4474453032	1	1	1	1	28,51	ROBLE HUALO
129	0,1155084968	1	1	1	1	21,25	ROBLE, RAULI, COIGUE
149	0,0153021216	1	1	0	0	16	ROBLE HUALO
184	0,0801154375	1	1	1	1	2,8	ROBLE HUALO
190	0,0500364304	1	1	1	1	0,01	ESCLEROFILO
196	0,033836782	1	1	1	1	0,02	ROBLE HUALO
228	0,0504381657	1	1	1	1	3	ROBLE HUALO
247	0,0619060397	1	1	1	1	0,01	ROBLE HUALO
248	0,1081744432	1	1	1	1	4,6	ROBLE HUALO
251	0,1073640883	1	1	1	1	1,88	ESCLEROFILO
252	0,245108217	1	1	1	1	7,87	ESCLEROFILO
253	0,0135404468	1	0	0	0	0,02	ROBLE HUALO
254	0,0597073436	1	1	1	1	0,07	ROBLE HUALO
255	0,1773107648	1	1	1	1	0,1	ROBLE HUALO

En el Cuadro 7, el resultado del índice  $\Delta$ NDVI para las cortas detectadas por la metodología, entrega en las columnas M0, M1, M2 y M3, los valores 0 corresponden a no detección de corta con la máscara correspondiente, y con valor 1, aquellos que si fueron detectados por la máscara señalada en la primera fila. Dentro de las cortas detectadas se obtiene que 8 registros de cortas ocurrieron durante la estación de verano, 2 en otoño, 5 en invierno y 2 en primavera.

El histograma de la distribución de los valores nombrados en el Cuadro 7 fue el siguiente (Figura 12).



**Figura 12.** Distribución de los valores de píxeles ( $\Delta$ NDVI) de las cortas seleccionadas por la metodología.

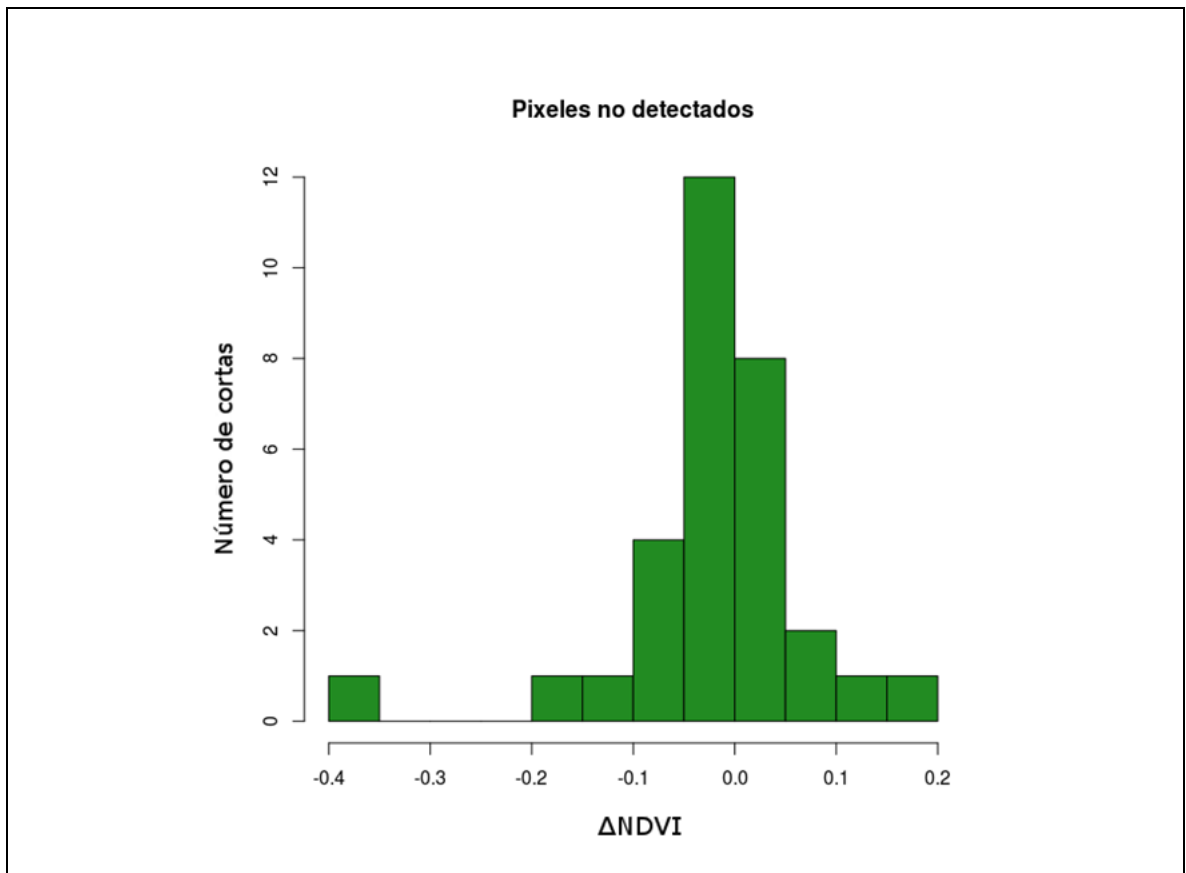
Los píxeles donde se calculó el  $\Delta$ NDVI que fueron tomados de la muestra de cortas no autorizadas y que fueron detectados por la metodología tienen en común que todos tienen valores positivos.

**Cuadro 8.** Registros de cortas no detectados por la metodología.

ID corta	ANDVI	Superficie de corta (ha)	Tipo Forestal
42	0,02728813	0,06	ROBLE HUALO
46	0,12144082	2,54	ESCLEROFILO
49	-0,04220515	0,06	ROBLE HUALO
61	0,0087410	0,02	ROBLE HUALO
67	0,00610744	1,16	ROBLE HUALO
79	-0,04359552	1,09	ROBLE HUALO
80	-0,03667753	0,04	ROBLE HUALO
116	-0,01577544	8,32	ROBLE HUALO
119	-0,04805803	4,2	ROBLE HUALO
120	-0,01506960	4,2	ROBLE HUALO
124	-0,06220948	0,06	ROBLE HUALO
135	-0,04506254	0,6	ROBLE HUALO

<b>ID corta</b>	<b>ΔNDVI</b>	<b>Superficie de corta (ha)</b>	<b>Tipo Forestal</b>
172	0,00708377	0,07	CIPRES DE LA CORDILLERA
174	-0,01316595	5	ROBLE HUALO
175	-0,00271725	6	ROBLE HUALO
183	-0,02280515	4,7	ROBLE HUALO
187	0,05697721	0,04	ROBLE HUALO
189	0,05027228	2	ROBLE HUALO
197	-0,05243086	5,2	ROBLE HUALO
217	-0,00421810	0,75	ROBLE HUALO
221	0,19630645	25,78	ESCLEROFILO
223	-0,15250149	4,1	ROBLE HUALO
225	0,01181277	40,5	ESCLEROFILO
235	-0,09112662	0,3	ROBLE HUALO
236	0,04799887	1,55	ESCLEROFILO
237	-0,36337584	12	ESCLEROFILO
241	-0,13755428	0,1	ROBLE HUALO
244	-0,07862892	0,05	ESCLEROFILO
256	0,00305914	0,1	ROBLE HUALO

En el Cuadro 8, se indican las cortas que no pudieron ser detectadas por la metodología en ninguna de las escalas de análisis utilizadas. De los registros de cortas no autorizadas que no pudieron ser detectados ocurrieron en las siguientes estaciones del año: 7 en verano, 9 en otoño, 8 en invierno y 7 en primavera.



**Figura 13.** Distribución de valores de píxeles ( $\Delta$ NDVI) no detectados como corta por la metodología.

Realizando una comparación entre el histograma de píxeles  $\Delta$ NDVI detectados como cambio (Figura 12) y los píxeles que no fueron identificados como cambio (Figura 13), se puede observar que los píxeles seleccionados de corta tienen en común que todos los valores son positivos, los cuales como indica Escuin *et al.*, (2007) son zonas de pérdida de vegetación, en comparación con los píxeles no detectados dentro de los mapas de cambio, los cuales presentan en su mayoría valores negativos.

Lunetta *et al.* (2002) afirma que las técnicas de detección de cambios tienen un rendimiento limitado en ecosistemas biológicamente complejos, esto debido en gran parte a errores inducidos por la fenología, donde al realizar una aplicación de detección de cambios basada en la comparación de imágenes entre dos fechas sin conocer la fenología de las especies involucradas en el estudio, se pueden obtener errores de tipo 1 (o falso positivo).

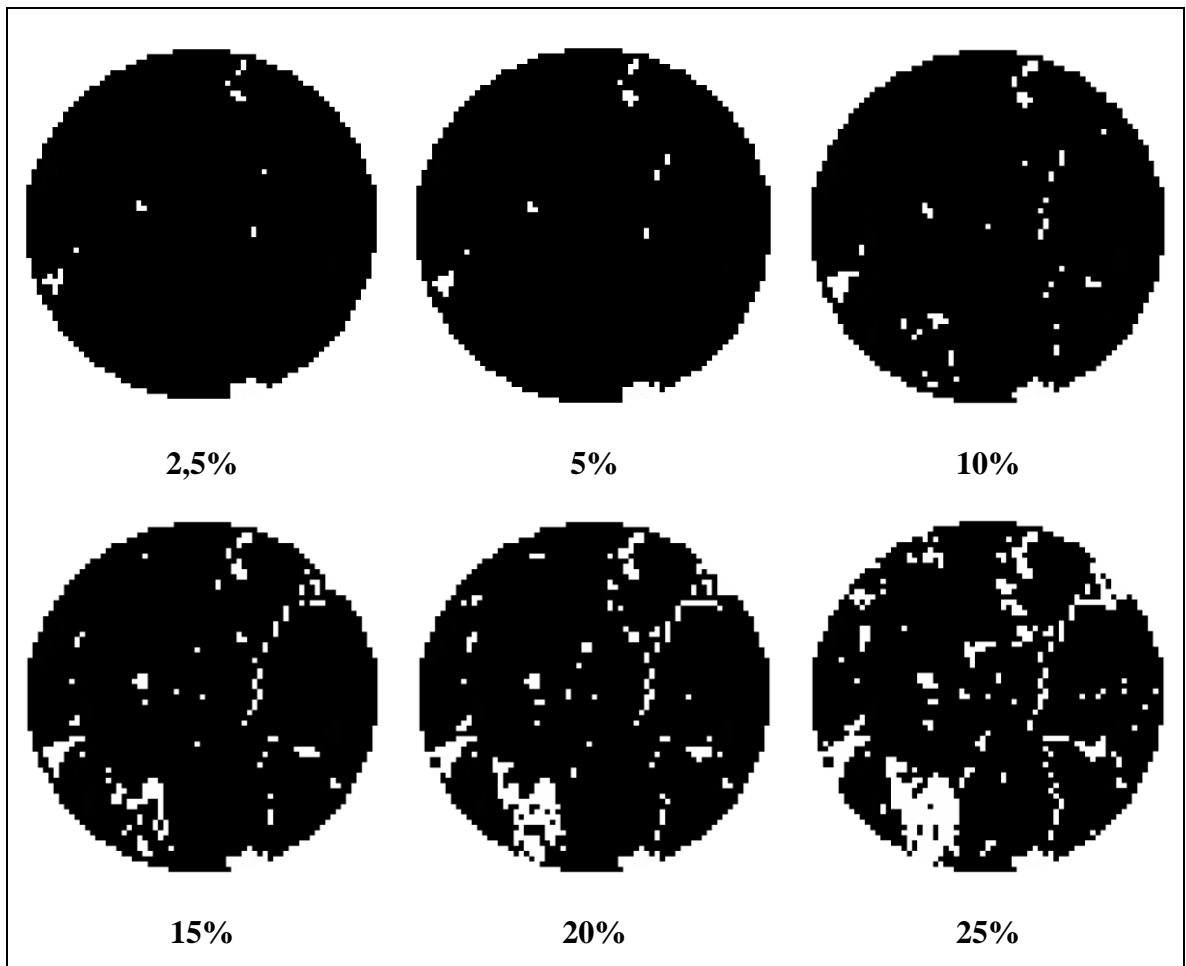
Según Lunetta (2006), es muy importante conocer los errores de omisión y comisión para la construcción de un método robusto de detección de cambios. En estas técnicas basadas en la comparación de dos imágenes de diferente fecha, es posible que existan errores atribuibles a la dinámica de la vegetación que está bajo observación, donde Lunetta (2002) indica que es posible obtener resultados que correspondan a errores de Tipo I atribuibles a la fenología de

la vegetación, y error de Tipo II, atribuibles a la rápida regeneración que termine por poblar los lugares afectados por las intervenciones.

Debido a que los valores de los píxeles de la mayoría de los registros que no fueron detectados por la metodología tienen valores negativos, que están relacionados con la regeneración (Escuin *et al.*, 2007), es que se estima que deberían ser utilizados sensores con una mayor frecuencia en la obtención de las imágenes, de esta forma obtener un monitoreo que permita la identificación de cambios, antes de que sean repobladas las zonas afectadas por cortas no autorizadas.

Respecto al nivel de información cartográfica que se disponía, se tiene que decir que los cálculos realizados para la construcción y estimación de la efectividad de la metodología aplicada están basados en el valor del píxel ubicado bajo la coordenada de corta obtenida de la base de datos, estos cálculos basados en solo un píxel, para fines estadísticos, puede no ser representativo de la vecindad del dato. Esta es una debilidad atribuible a la inexistencia de los perímetros de las intervenciones, factor que sin duda permitiría ampliar la ventana de búsqueda y con ello obtener una mayor cantidad de píxeles como muestra representativa de la intervención, y con ello una mayor información respecto a la veracidad de la ubicación de cada una de las cortas no autorizadas. No obstante, el método aquí desarrollado permite incorporar estas mejoras en función de los perímetros disponibles para cada intervención y de la posibilidad de contar con imágenes de mayor resolución espacial.

Las regiones de cambio en las imágenes pueden ser cartografiadas y corresponden a zonas que deberán ser validadas en terreno para corroborar la existencia de una corta no autorizada, estas regiones son definidas a partir de la superficie de la máscara la cual requiere ser catalogada como cambio, a partir del valor Z definido para la reclasificación.



**Figura 14.** Secuencia de una misma imagen reclasificada bajo distintos porcentajes de zonas de cambio, donde los pixeles blancos indican las zonas de pérdida de vegetación, y los pixeles negros las zonas de no pérdida de vegetación.

Como se aprecia en la Figura 14, una misma imagen puede ser reclasificada a partir de una región de cambio preestablecida, de esta forma, la delimitación de la región de cambio se transforma en una variable de decisión útil al momento de planificar los patrullajes en terreno para validar la presencia de cortas no autorizadas. Una mayor región de cambio en términos prácticos, al momento de realizar una validación en terreno, significaría una mayor cantidad de recursos a movilizar, por lo cual se considera que un criterio a considerar dentro de la determinación de las regiones de cambio sean las variables de superficie, dificultad de acceso, junto con los recursos disponibles para la planificación y realización de la campaña de terreno.

Mientras mayor sea la superficie de cambio definida para la realización de la clasificación, mayor será la probabilidad de que una corta no autorizada pueda ser detectada por la metodología propuesta, pero, al aumentar las zonas de cambio, los esfuerzos de la validación en terreno aumentan, debido a que los mapas de cambio pueden ser producidos por la presencia de algún otro disturbio que haya causado pérdida de cobertura vegetal.

### **3.5 Propuesta para el seguimiento del proceso de cortas no autorizadas.**

Se realizaron dos propuestas con el fin de monitorear y detectar zonas de cortas no autorizadas. Las propuestas están basadas en el nivel de información cartográfica disponible para la planificación de las campañas de terreno y con recomendaciones de aplicación de otros métodos y tecnologías disponibles enfocadas en la detección de cambios.

El método propuesto en esta memoria se considera que entrega resultados satisfactorios en la identificación de las intervenciones de cortas no autorizadas.

Como antecedentes previos a la identificación se cortas no autorizadas, se recomienda conocer las coberturas vegetacionales que se desean monitorear y la fenología de las especies, debido a que es considerado un factor importante que puede afectar en la identificación de zonas de cambio.

Por motivos de clima, se recomienda una descarga de mayor frecuencia de imágenes durante el periodo de verano, donde será posible obtener un registro continuo de la zona de estudio, con una menor probabilidad de ser afectado por nubosidad comparado con las imágenes tomadas en invierno.

Se recomienda la descarga de imágenes Landsat OLI-8, y la aplicación de índices vegetacionales con el fin de resaltar las zonas de vegetación antes y después, para la realización de las cartografías de pérdida de vegetación.

Existen otras alternativas de imágenes que pueden ser consideradas para la identificación de zonas de pérdida de vegetación, con el fin de obtener un registro de mayor resolución espacial, se recomienda el uso de imágenes provenientes del sensor Sentinel-2, con una resolución de pixel de 10 x 10 metros (Drusch *et al.*, 2012), y si lo que se desea es una mayor resolución temporal, se recomienda el uso de imágenes de los sensores MODIS, que tienen una resolución temporal continua de hasta dos imágenes diarias si se utilizan los sensores MODIS AQUA y MODIS TERRA, pero estos sensores tienen una resolución espacial de un pixel de 250 x 250 metros (Jin y Sader, 2005).

En función de los recursos disponibles, y luego de obtener los mapas de cambio, se pueden realizar las visitas a terreno por medio de inspecciones prediales utilizando otros métodos de teledetección como es el uso de drones, que permitan tomar imágenes de alta resolución.

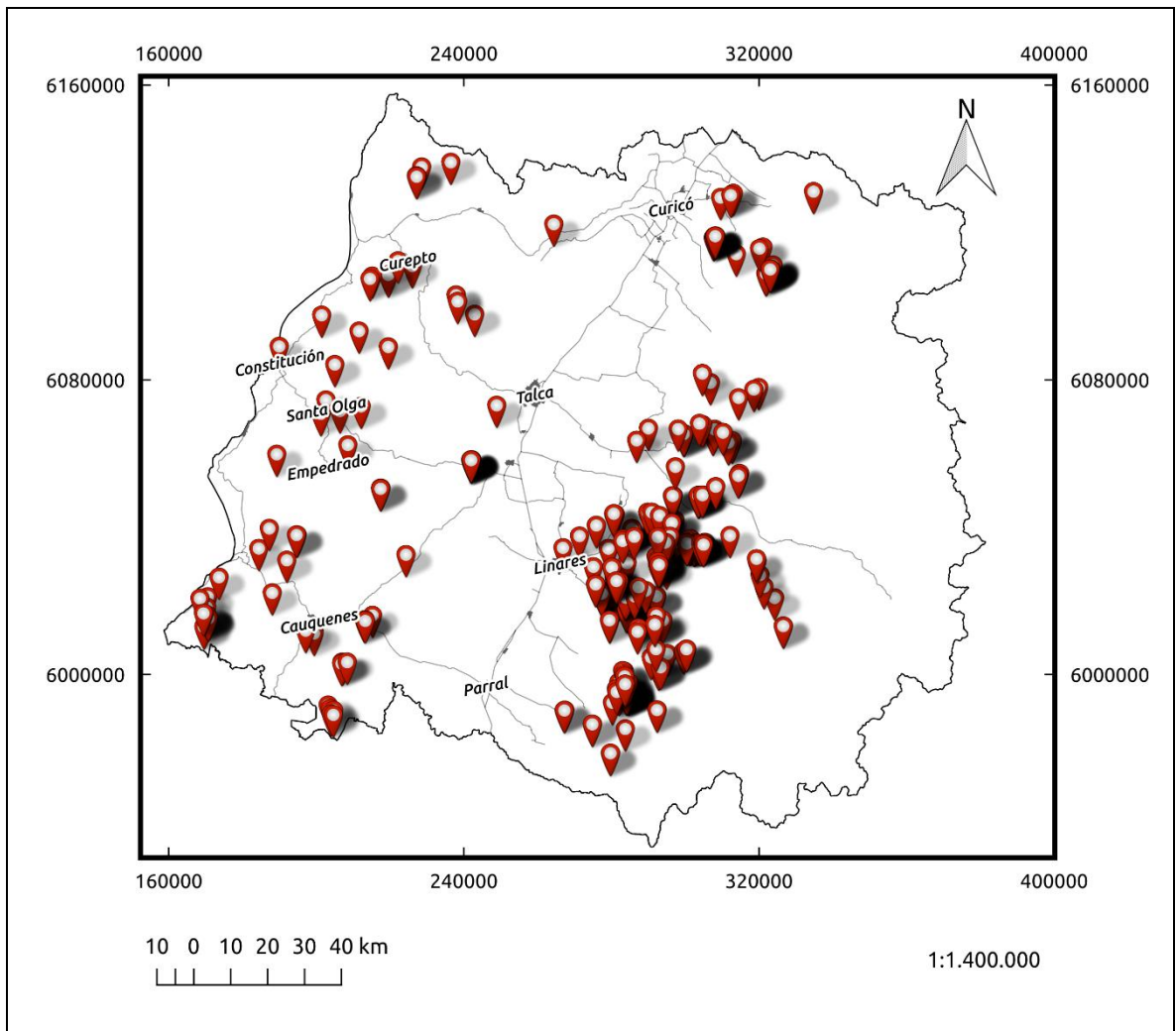
La metodología propuesta es compatible con el uso de cartografías de prioridades de fiscalización, para de esta forma determinar la superficie de las escalas de análisis y la determinación de la superficie de las cartografías de pérdida de vegetación con el fin de optimizar los recursos que serán utilizados en las campañas de terreno.



Las ventajas y desventajas apreciadas para el método se señalan a continuación en el Cuadro 9.

**Cuadro 9.** Ventajas y desventajas de la metodología aplicada a la detección de cortas no autorizadas.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Rápidamente permite obtener un mapa de cambios, definiendo previamente el porcentaje de superficie que quiere ser categorizada como "cambio".</li> <li>◆ Los mapas de cambio obtenido pueden servir como información adicional en la planificación de campañas de terreno.</li> <li>◆ El pixel detectado como cambio, dependiendo del valor Z utilizado es capaz de detectar las cortas pequeñas inferiores a la superficie del pixel.</li> <li>◆ Es de bajo costo, debido a la utilización de imágenes satelitales gratuitas.</li> <li>◆ El método es compatible con otras imágenes satelitales hiperespectrales y de mayor resolución.</li> <li>◆ El método es compatible con información cartográfica adicional, como lo son catastros de bosque nativo, Landcover y mapas temáticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ El mapa de cambios obtenido no necesariamente puede ser efecto de una corta no autorizada. El efecto visual puede atribuirse a otro tipo de actividades tales como cosechas forestales, presencia de cultivos agrícolas, deslizamiento de tierras o cualquier otro disturbio puede producir un cambio que el método puede detectar.</li> <li>◆ Los mapas obtenidos requieren ser validados en terreno.</li> <li>◆ La nubosidad es un factor que impide la obtención frecuente de imágenes.</li> <li>◆ Debido a que el método se basa en la utilización del índice NDVI, no es posible identificar patrones para bosques de hoja caduca, durante las temporadas de otoño - invierno.</li> </ul>



**Figura 15.** Mapa de delimitación de zonas que concentran las cortas no autorizadas en bosque nativo en la región del Maule.

En el siguiente mapa (Figura 15) se resumen las áreas inicialmente consideradas para este estudio, y que detallan la distribución espacial de las cortas no autorizadas.

#### 4. CONCLUSIONES

El índice  $\Delta$ NDVI demostró ser una variable útil para diagnosticar cambios en las coberturas vegetacionales.

El método presentó resultados similares en la detección de cortas, cuando el valor Z utilizado para determinar el umbral de cambio adquirió valores menores a 0,65.

Con los antecedentes obtenidos de los registros de corta junto con el análisis del comportamiento satelital realizado, se estima necesario fortalecer este estudio con la inclusión de mapas de detección de cambios de coberturas vegetacionales, como paso previo a la programación de actividades de fiscalización en terreno de CONAF.

El método permite la detección de cambios de la cobertura vegetal y la detección de cortas no autorizadas por medio de imágenes satelitales de un sensor de mediana resolución como lo es Landsat 8. Bajo este supuesto debieran obtenerse mejores resultados utilizando imágenes multispectrales provenientes de otros sensores de mayor resolución espacial y temporal.

Las porciones de tierra clasificadas como pérdida de vegetación pueden compatibilizarse con las actividades de fiscalización utilizadas por CONAF en la actualidad, como lo son las visitas prediales, las guías de libre tránsito y/o las denuncias de terceros.

Los mapas de cambios obtenidos pueden ser contruidos a partir de los recursos disponibles para la realización de las campañas de terreno, siendo requisito básico el registro de las variables de superficie a fiscalizar como también la dificultad de acceso.

Se pudo construir una metodología a partir de una muestra de un solo pixel, pero se espera que, al incluir el perímetro junto con la superficie de las cortas y un mayor detalle del tipo de intervención realizada para la realización de la corta no autorizada, permita la construcción y validación de un método más robusto de detección de cortas, y con lo mismo, tener la posibilidad de ampliar el tamaño de la máscara para la aplicación del método.

Se recomienda el uso del valor Z, asociado a distribuciones paramétricas del tipo normal, para la determinación de umbrales de cambio en imágenes que presenten una distribución simétrica de los valores de sus pixeles. La recomendación se debe a que es sencillo determinar por medio de este valor las zonas donde los cambios hayan sido más severos y permite además, programar en función de la intensidad de muestreo la campaña en terreno para la validación.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

ARMESTO, J; VILLAGRÁN, C. Y DONOSO, C. 1994. Desde la era glacial a la industrial: La historia del bosque templado chileno. Ambiente y desarrollo [En línea] Santiago, Chile. <<http://www.sendadarwin.cl/espanol/wp-content/uploads/2010/03/armesto-et-al-amb-des-1994.pdf>>. [Consulta 05 de diciembre de 2017].

BEDÓN, F. 2012. Evaluación de técnicas de detección de cambios de uso de la tierra a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales en el cantón Daule. [En línea] Santiago, Chile. < <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5114/1/T-ESPE-033066.pdf>>. [Consulta 27 de octubre de 2017].

BERLANGA-ROBLES, CA. Y RUIZ-LUNA, A. 2007. Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. Universidad y Ciencia 23(1) 29-46. [En línea] Santiago. Chile. <<http://www.redalyc.org/service/redalyc/downloadPdf/154/15423104/1>> [Consulta 15 de octubre de 2017].

CHILE FORESTAL. 2015. Santiago, Chile. (378).

CHUVIECO, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. 3Ra Edición. 571p.

CONAF, 2018a. Con Drones CONAF fiscalizo cortas no autorizadas de bosque nativo en Melipilla. [En línea] <<http://www.conaf.cl/con-drones-conaf-fiscalizo-cortas-no-autorizadas-de-bosque-nativo-en-melipilla/>> [Consulta 20 de enero 2018]

CONAF, 2018b. Gobierno lanza sistema de monitoreo satelital para vigilar bosques de Chile. [En línea] <<http://www.conaf.cl/gobierno-lanza-sistema-de-monitoreo-satelital-para-vigilar-bosques-de-chile/>> [Consulta 20 de enero de 2018]

CONAF, 2013. Informe anual de estadísticas de fiscalización forestal. Corporación nacional forestal. Departamento de Fiscalización Forestal y Monitoreo de Ecosistemas Forestales.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V. y BÖHNER, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

DEVI. R. N Y JIJ. G. W. 2015. Change detection techniques - a survey. International Journal on Computational Science & Applications (IJCSA) Vol. 5. No. 2. [En línea] Sydney, Australia. <<http://wireilla.com/papers/ijcsa/V5N2/5215ijcsa05.pdf>>. [Consulta 6 de noviembre de 2017].

ECHEVERRIA, C.; COOMES, D.; SALAS, J; REY-BENAYAS, J. M.; LARA, A. y NEWTON, A. 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. Biological conservation, 130(4), 481-494. [En línea]

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320706000358>>. [Consulta 20 de octubre de 2017].

ESCUIN, S.; NAVARRO, R. y FERNANDEZ, P. 2007. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images.

JENSEN, J. 2005. Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective. In: Digital Change Detection 478 - 482. 3 ed. 526 P.

JIN. S. y SADER. S. A. 2005. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects. Remote Sensing of Environment. 99(4): 462-470.

LUNETTA, R. S.; EDIRIWICKREMA, J.; JOHNSON, D. M.; LYON, J. G. y MCKERROW, A. 2002. Impacts of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA. Remote Sensing of Environment, 82(2), 258-270.

LUNETTA. R. S; KNIGHT. J. F; EDIRIWICKREMA. J; LYON. J. G y WORTHY. L. D. 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. Remote Sensing of Environment. 105(2): 142-154.

MARTIN. F; LOPEZ. P y CALERA. A. 2005. Agua y agronomía. 606P

MOREIRA, E. P.; VALERIANO, M. M.; SANCHES I. A. y FORMAGGIO, A. R. (2016) Topographic effect on spectral vegetation indices from Landsat TM data is topographic correction necessary?. Boletim de Ciências Geodésicas, 22(1), 95-107 [en línea] <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1982-21702016000100095](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702016000100095)> [Consulta 20 de octubre de 2017].

MUÑOZ, P. 2013. Apuntes de Teledetección. Índices de vegetación. [en línea] <<http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26389>> [Consulta 10 de septiembre de 2017]

PEREZ. C; MUÑOZ, A. 2006. Teledetección: Nociones y Aplicaciones. 359p.

PILAR. B. 2010. Detección y análisis del cambio de uso del suelo en la zona centro – norte de la provincia de Capitán Prat XI Región Período 1984 – 2003. Memoria de Ingeniero Forestal. Valdivia, Unversidad Austral de Chile, Facultad de Cencias Forestales y Recursos Naturales. 62p.

QGIS Development Team (2017). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.

R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C. y SCAMBOS, T. A. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172. [En línea] <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442571400042X#f0020>> [Consulta 26 de octubre de 2017]

## 6. APENDICES

### Apéndice I. Base de datos de cortas seleccionadas y fecha de las imágenes

ID corta	Fecha de corta	Escenas de descarga Landsat 8 TM (antes - después) en días julianos	Superficie de corta (ha)	Tipo forestal	Datum	Coordenada X	Coordenada Y
42	2013169	2013102 - 2013326	0.06	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	280199	6023166
46	2013183	2013102 - 2014009	2.54	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	215295	6010144
49	2013186	2013102 - 2014025	0.06	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	304760	6042800
60	2013199	2013102 - 2014089	8	ROBLE, RAULI, COIGUE	WGS 84 UTM 19 Sur	304833	6029494
61	2013200	2013102 - 2014025	0.02	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	305045	6029339
67	2013200	2013102 - 2014278	1.16	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	296147	6033066
68	2013206	2013102 - 2014025	0.04	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	283783	5991487
79	2013253	2013102 - 2014025	1.09	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	206954	5997037
80	2013259	2013102 - 2014025	0.04	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	296482	6035208
100	2014024	2013326 - 2014025	2.4	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	311779	6057056
116	2014086	2014009 - 2015044	8.32	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	283664	5993577
119	2014126	2014025 - 2014313	4.2	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	188107	6016252
120	2014126	2014025 - 2014313	4.2	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	283493	5994098
121	2014127	2014025 - 2014313	28.51	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	213339	6008647
124	2014143	2013102 - 2014025	0.06	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	292778	6024686
129	2014175	2014025 - 2014313	21.25	ROBLE, RAULI, COIGUE	WGS 84 UTM 19 Sur	224376	6026614
135	2014211	2014025 - 2014329	0.6	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	222210	6106395
149	2014283	2014025 - 2014313	16	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	292438	5984449

<b>ID corta</b>	<b>Fecha de corta</b>	<b>Escenas de descarga Landsat 8 TM (antes - después) en días julianos</b>	<b>Superficie de corta (ha)</b>	<b>Tipo forestal</b>	<b>Datum</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>
172	2014314	2014297 - 2014329	0.07	CIPRES DE LA CORDILLERA	WGS 84 UTM 19 Sur	294010	6030223
174	2014317	2014313 - 2015012	5	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	211647	6087320
175	2014317	2014313 - 2015012	6	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	281071	6037611
176	2014322	2014297 - 2014329	0.1	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	170372	6010199
181	2015009	2014329 - 2015012	0.05	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	208443	5997438
183	2015022	2015012 - 2015044	4.7	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	293386	6024753
184	2015029	2015012 - 2015076	2.8	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	293105	6037240
187	2015057	2015028 - 2016031	0.04	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	213071	6008761
189	2015058	2015028 - 2015092	2	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	302520	6029600
190	2015062	2015012 - 2016015	0.01	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	201309	6064873
196	2015086	2015012 - 2016031	0.02	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	282044	6019400
197	2015097	2015028 - 2016015	5.2	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	297421	6050471
217	2013135	2013102 - 2013326	0.75	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	238376	6095366
221	2013268	2013205 - 2014009	25.78	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	295000	6023242
223	2013280	2013278 - 2014025	4.1	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	275796	6018558
225	2013294	2013205 - 2014032	40.5	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	291825	6007675
228	2013343	2013278 - 2014025	3	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	280949	6020056
235	2014048	2013317 - 2015339	0.3	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	308357	6045082
236	2014055	2014032 - 2014057	1.55	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	215227	6102249
237	2014057	2014032 - 2014297	12	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	217527	6044689



<b>ID corta</b>	<b>Fecha de corta</b>	<b>Escenas de descarga Landsat 8 TM (antes - después) en días julianos</b>	<b>Superficie de corta (ha)</b>	<b>Tipo forestal</b>	<b>Datum</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>
241	2014086	2014032 - 2014313	0.1	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	283227	6030865
244	2014156	2014041 - 2014313	0.05	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	302455	6029668
247	2014216	2014032 - 2014361	0.01	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	205083	6078239
248	2014224	2014009 - 2014297	4.6	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	279776	5972653
251	2015049	2015044 - 2015060	1.88	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	302584	6029650
252	2015049	2014012 - 2015108	7.87	ESCLEROFILO	WGS 84 UTM 19 Sur	169676	6010691
253	2015050	2014032 - 2015339	0.02	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	169491	6010709
254	2015050	2014032 - 2015339	0.07	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	287469	6017822
255	2015055	2014032 - 2015339	0.1	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	219572	6083027
256	2015084	2014032 - 2015339	0.1	ROBLE HUALO	WGS 84 UTM 19 Sur	189334	6053876

Apéndice II. Valores pixeles  $\Delta$ NDVI de corta no autorizada.

Registro	Valor Pixel $\Delta$ NDVI
60	0.0019804835
116	-0.0157754421
119	-0.048058033
120	-0.0150696039
121	0.4474453032
129	0.1155084968
149	0.0153021216
174	-0.0131659508
175	-0.0027172565
183	-0.0228051543
197	-0.0524308681
221	0.1963064522
225	0.0118127763
237	-0.3633758426
248	0.1081744432
252	0.245108217
46	0.1214408278
67	0.0061074495
79	-0.0435955226
100	0.3516012728
135	-0.045062542
184	0.0801154375
189	0.0502722859
217	-0.0042181015
223	-0.1525014937
228	0.0504381657
235	-0.0911266208
236	0.0479988754
251	0.1073640883
42	0.0272881389
49	-0.0422051549
61	0.008741051
68	0.0288656354
80	-0.0366775393
124	-0.062209487
172	0.0070837736
176	0.0046157837
181	-0.0127345324
187	0.0569772124
190	0.0500364304
196	0.033836782
241	-0.1375542879
244	-0.0786289275
247	0.0619060397
253	0.0135404468
254	0.0597073436
255	0.1773107648
256	0.0030591488

Apéndice III. Estadísticas de imágenes máscara M0

Registro	Prom	Desv	1.96	1.645	1.282	1.036	0.842	0.674
60-0	-0.0149364	0.02855126	0.04102404	0.03203039	0.02166628	0.01464267	0.00910372	0.00430711
116-0	0.00224220	0.03504647	0.07093330	0.05989366	0.04717178	0.03855035	0.03175133	0.02586353
119-0	-0.0192574	0.05838212	0.09517154	0.07678117	0.05558846	0.04122646	0.02990033	0.02009213
120-0	-0.0149508	0.04370229	0.07070560	0.05693938	0.04107544	0.03032468	0.02184643	0.01450445
121-0	0.26367996	0.15939638	0.57609687	0.52588701	0.46802612	0.42881461	0.39789171	0.37111312
129-0	0.02245541	0.02534994	0.07214131	0.06415608	0.05495405	0.04871796	0.04380007	0.0395412
149-0	-0.0065521	0.02093684	0.03448406	0.02788896	0.02028888	0.01513842	0.01107667	0.0075592
174-0	0.01735642	0.01879558	0.05442286	0.04850225	0.03079094	0.027402506	0.03705574	0.03295314
175-0	0.03779352	0.05416633	0.14395954	0.12689714	0.10723476	0.09390984	0.08340158	0.07430163
183-0	0.00346819	0.01584493	0.02758788	0.02259672	0.01684501	0.01294715	0.00987323	0.00721128
197-0	-0.0296652	0.01183029	-0.0064777	-0.0102042	-0.0144988	-0.0174089	-0.0197040	-0.0216915
221-0	0.015435642	0.09334527	0.33731316	0.30790940	0.27402506	0.25106213	0.23295314	0.21727114
225-0	0.12614610	0.09909339	0.32036915	0.28915473	0.25318383	0.22880685	0.20958274	0.19293504
237-0	-0.2958025	0.07059177	-0.1574426	-0.1796790	-0.2053037	-0.2226694	-0.2363642	-0.2482236
248-0	0.00738213	0.04167436	0.07429963	0.06117220	0.04604441	0.03579251	0.02770768	0.02070639
252-0	0.01632959	0.08341713	0.26982718	0.24355078	0.21327036	0.19274975	0.17656682	0.16255274
46-0	0.10050203	0.05826261	0.21469675	0.19634403	0.17519470	0.16086210	0.14955915	0.13977103
67-0	0.00796223	0.04823402	0.10250091	0.08730719	0.06979824	0.05793267	0.04857527	0.04047196
79-0	-0.0096006	0.04347701	0.07561433	0.06191907	0.04613691	0.03544156	0.02700702	0.01970288
100-0	0.15134567	0.09477151	0.33709783	0.30724480	0.27284274	0.24952895	0.23114328	0.21522167
135-0	-0.0014788	0.02483680	0.04720131	0.03937772	0.03036196	0.02425210	0.01943376	0.01526118
184-0	0.03923694	0.02959894	0.09725088	0.08792721	0.07718279	0.06990145	0.06415926	0.05918663
189-0	0.03699357	0.04671641	0.12855774	0.11384207	0.09688401	0.08539178	0.07632879	0.06848043
217-0	0.08567654	0.04965846	0.18300712	0.16736471	0.14933868	0.13712270	0.12748896	0.11914634
223-0	0.01920919	0.05649629	0.12994193	0.11214560	0.09163744	0.07773935	0.06677907	0.05728770
228-0	-0.0300086	0.04536330	0.05890344	0.04461400	0.02814712	0.01698774	0.00818726	0.00056623
235-0	0.00459331	0.05068447	0.10393487	0.08796926	0.06957080	0.05710242	0.04726963	0.03875464
236-0	0.04306427	0.02704469	0.09607187	0.08755528	0.07773557	0.07108257	0.06583590	0.06129239
251-0	0.02075289	0.04780316	0.11444709	0.09938909	0.08203654	0.07027697	0.06100315	0.05297222
42-0	-0.0465723	0.12095083	0.19049125	0.15239173	0.10848658	0.07873267	0.05526821	0.03494847
49-0	0.01053807	0.04510384	0.09894160	0.08473389	0.06836119	0.05726565	0.04851550	0.04093806
61-0	-0.0259468	0.05914605	0.08997936	0.07134836	0.04987834	0.03532841	0.02385407	0.01391754
68-0	-0.0274712	0.05749672	0.08522227	0.06711080	0.04623949	0.03209530	0.02094094	0.01128149
80-0	-0.0478575	0.08430307	0.11737646	0.09082100	0.06021898	0.03948042	0.02312563	0.00896271
124-0	-0.0354614	0.04146818	0.04581623	0.03275375	0.01770080	0.00749962	-0.0005451	-0.0075118
172-0	0.01074901	0.04011760	0.08937953	0.07674248	0.06217979	0.05231086	0.04452804	0.03778828
176-0	0.00085342	0.01449712	0.02926779	0.02470120	0.01943874	0.01587245	0.01306000	0.01062449
181-0	0.01224182	0.04292972	0.09638408	0.08286122	0.06727773	0.05671702	0.04838865	0.04117646
187-0	0.06301185	0.12907418	0.31599725	0.27533888	0.22848495	0.19673270	0.17169231	0.15000785
190-0	0.01110934	0.01541954	0.04133165	0.03647450	0.03087720	0.02708399	0.02409260	0.02150211
196-0	-0.0209091	0.03367704	0.04509786	0.03448950	0.02226482	0.01398026	0.00744692	0.00178917
241-0	-0.1318397	0.03346575	-0.0662468	-0.0767885	-0.0889366	-0.0971692	-0.1036615	-0.1092838
244-0	-0.0985307	0.07443270	0.04735740	0.02391110	-0.0031079	-0.0214184	-0.0358583	-0.0483630
247-0	0.01573075	0.05195677	0.11756603	0.10119965	0.08233934	0.06955797	0.05947835	0.05074961
253-0	0.00154544	0.01708795	0.03503783	0.02965513	0.02345220	0.01924856	0.01593350	0.01306272
254-0	0.00102983	0.01902207	0.03831310	0.03232115	0.02541613	0.02073670	0.01704642	0.01385071
255-0	0.05755309	0.13579194	0.32370529	0.28093083	0.23163836	0.19823354	0.17188990	0.14907685
256-0	0.00060470	0.04633331	0.09141801	0.07682301	0.06000402	0.04860602	0.03961736	0.03183336

Apéndice IV. Estadísticas de imágenes mascara M1

Registro	Prom	Desv	1.96	1.645	1.282	1.036	0.842	0.674
60-1	-0.0190252	0.02987200	0.03952391	0.0301142	0.0192707	0.01192218	0.00612702	0.00110852
116-1	0.00016203	0.03790872	0.07446313	0.06252188	0.04876102	0.03943547	0.03208118	0.02571251
119-1	-0.0161827	0.0556394	0.09287032	0.07534390	0.05514678	0.04145948	0.0306654	0.0213180
120-1	0.01049475	0.08109457	0.16944012	0.14389532	0.11445799	0.09450873	0.07877638	0.06515249
121-1	0.22619605	0.17352368	0.56630247	0.51164251	0.44865341	0.40596659	0.3723029	0.34315101
129-1	0.02466187	0.02285937	0.06946624	0.0622655	0.05396759	0.04834418	0.04390946	0.0400690
149-1	-0.0149820	0.04366743	0.07060608	0.05685083	0.04099956	0.03025737	0.02178589	0.01444976
174-1	0.01483772	0.01857648	0.05124763	0.04539603	0.03865277	0.03408296	0.03047912	0.02735827
175-1	0.03985359	0.05806655	0.15366403	0.13537307	0.11429491	0.10001054	0.08874563	0.07899045
183-1	-0.0017405	0.01363934	0.02499258	0.02069619	0.0157451	0.01238983	0.00974380	0.00745239
197-1	-0.0297517	0.01641369	0.00241887	-0.0027514	-0.0087096	-0.0127473	-0.0159316	-0.0186894
221-1	0.17106499	0.12405682	0.41421637	0.37513847	0.33010584	0.29958786	0.27552084	0.25467929
225-1	0.10248996	0.13856830	0.37408380	0.33043482	0.28013452	0.24604672	0.21916447	0.19588499
237-1	-0.2724599	0.08301474	-0.1097510	-0.1359006	-0.1660350	-0.1864566	-0.2025615	-0.2165080
248-1	-0.0083874	0.03936732	0.06877247	0.05637177	0.0420814	0.03239706	0.02475980	0.01814609
252-1	0.07742777	0.0708026	0.21620101	0.19389816	0.16819680	0.15077934	0.13704362	0.1251487
46-1	0.09747030	0.05557915	0.20640545	0.18889802	0.16872278	0.15505031	0.14426795	0.13493065
67-1	0.0113429	0.04495232	0.09944948	0.08528950	0.06897180	0.05791353	0.04919278	0.04164079
79-1	-0.0107138	0.05244016	0.09206885	0.07555020	0.05651441	0.04141379	0.0334407	0.02463079
100-1	0.1112512	0.0912502	0.29010172	0.26135790	0.22823406	0.2057865	0.18808396	0.17275392
135-1	-0.0006802	0.02378650	0.04594130	0.03844855	0.02981405	0.02396257	0.01934799	0.01535186
184-1	0.03495935	0.03309489	0.09982534	0.08940044	0.0773870	0.06924566	0.06282525	0.05726530
189-1	0.04006580	0.04992705	0.13792284	0.12219581	0.10407229	0.09179024	0.0821043	0.07371664
217-1	0.08325357	0.05820297	0.19733141	0.17899747	0.15786979	0.14355186	0.13226048	0.12248238
223-1	0.01971494	0.05108133	0.11983436	0.10374374	0.08520121	0.0726352	0.06272543	0.05414376
228-1	-0.0333183	0.05852150	0.08138377	0.06294950	0.04170619	0.02730990	0.0159567	0.00612512
235-1	0.01103848	0.04846185	0.1060237	0.09075823	0.07316658	0.06124496	0.0518433	0.04370177
236-1	0.0436492	0.02319961	0.08912046	0.08181258	0.07339112	0.06768402	0.06318329	0.059285
251-1	0.01480296	0.04077852	0.09472887	0.08188363	0.06708103	0.05704951	0.04913848	0.04228769
42-1	-0.0342629	0.10746778	0.17637394	0.14252159	0.10351078	0.07707370	0.05622495	0.03817036
49-1	0.00248888	0.04859519	0.09773546	0.08242797	0.06478792	0.052833	0.04340603	0.03524204
61-1	-0.0158197	0.05535001	0.09266625	0.07523099	0.0551389	0.04152284	0.03078493	0.02148613
68-1	-0.0149608	0.0596295	0.10191307	0.08312977	0.06148424	0.04681537	0.03524723	0.0252294
80-1	-0.0275604	0.08049686	0.13021343	0.1048569	0.07563656	0.05583433	0.04021793	0.02669446
124-1	-0.0410564	0.04138717	0.04006245	0.02702549	0.01200195	0.00182070	-0.0062084	-0.0131614
172-1	0.00783487	0.04140094	0.08898073	0.0759394	0.06091089	0.05072625	0.04269447	0.03573911
176-1	0.0019877	0.01516627	0.03171364	0.02693627	0.02143091	0.0177000	0.01475775	0.01220982
181-1	0.01281298	0.03856685	0.08840401	0.07625545	0.06225568	0.0527682	0.04528627	0.03880704
187-1	0.04500843	0.12176278	0.28366348	0.24530821	0.20110832	0.1711546	0.1475326	0.12707655
190-1	0.00707640	0.02019508	0.04665876	0.04029731	0.03296649	0.02799850	0.02408066	0.0206878
196-1	-0.0198800	0.03279514	0.04439846	0.03406799	0.02216335	0.01409575	0.00773349	0.00222391
241-1	-0.1380488	0.0371818	-0.0651723	-0.0768846	-0.0903816	-0.0995283	-0.1067416	-0.1129882
244-1	-0.0844986	0.07397532	0.06049297	0.03719074	0.01033770	-0.0078602	-0.0222114	-0.0346392
247-1	0.01421231	0.04249185	0.09749634	0.08411141	0.06868687	0.05823387	0.04999045	0.04285182
253-1	0.00190467	0.01783913	0.03686937	0.03125005	0.02477444	0.02038601	0.01692522	0.0139282
254-1	-0.0005392	0.0194526	0.03758790	0.03146031	0.02439900	0.01961365	0.01583983	0.01257179
255-1	0.0240788	0.13166570	0.2821436	0.24066891	0.19287425	0.16048449	0.13494134	0.11282151
256-1	-0.0049596	0.05085159	0.09470951	0.07869126	0.06023213	0.04772263	0.03785742	0.02931435

Apéndice V. Estadísticas de imágenes mascara M2

Registro	Prom	Desv	1.96	1.645	1.282	1.036	0.842	0.674
60-2	-0.0283692	0.03616220	0.04250864	0.03111755	0.01799067	0.00909476	0.00207930	-0.00399594
116-2	-0.0007318	0.0436504	0.08482306	0.0710731	0.05522804	0.04449002	0.0360218	0.02868855
119-2	-0.0103277	0.060989893	0.10908386	0.0898720	0.06773271	0.0527292	0.04089716	0.03008605
120-2	0.0229335	0.09650031	0.2120741	0.1816765	0.14664695	0.12290787	0.10418681	0.08797476
121-2	0.15494285	0.1684409	0.4850872	0.4320282	0.37088421	0.32944772	0.29677017	0.26847208
129-2	0.02569138	0.022299994	0.06939937	0.0623748	0.05427997	0.04879417	0.04446797	0.04072157
149-2	-0.0229247	0.0594126	0.09352403	0.07480905	0.05324225	0.03862674	0.02710068	0.01711936
174-2	0.01795977	0.03315385	0.082941329	0.0724978	0.06046301	0.05230716	0.04587531	0.0403054
175-2	0.0377740	0.053500542	0.1426019	0.1257493	0.10632862	0.09316749	0.08278838	0.07380029
183-2	-0.0008986	0.01204659	0.022712	0.01891801	0.01454510	0.01158164	0.00924460	0.00722077
197-2	-0.0321495	0.02341746	0.01374872	0.00637220	-0.00212833	-0.00788903	-0.0124320	-0.01636615
221-2	0.18844341	0.1346694	0.45239546	0.4099746	0.36108960	0.32796092	0.30183506	0.27921060
225-2	0.08530637	0.165906936	0.41048397	0.35822324	0.29799906	0.25718596	0.22500001	0.19712765
237-2	-0.2607451	0.09641091	-0.07177979	-0.10214923	-0.13714639	-0.16086347	-0.17956719	-0.19576422
248-2	-0.0123682	0.03692033	0.05999533	0.04836542	0.03496334	0.02588094	0.01871839	0.01251578
252-2	0.0613969	0.05643336	0.17300787	0.15507040	0.13439961	0.12039130	0.10934410	0.09977799
46-2	0.08118866	0.08102601	0.23999965	0.21447646	0.1850640	0.16513161	0.14941257	0.13580020
67-2	0.02694144	0.09290540	0.20903604	0.17977083	0.14604617	0.12319144	0.10516779	0.08955968
79-2	-0.0147114	0.04773980	0.07885853	0.06382050	0.04649095	0.03474696	0.02548544	0.01746515
100-2	0.08641026	0.09665131	0.27584683	0.24540167	0.21031724	0.18654102	0.16779067	0.151553
135-2	0.00031973	0.03589130	0.07066669	0.05936093	0.04633238	0.0375031	0.03054021	0.02451047
184-2	0.03495935	0.03309489	0.09982534	0.08940044	0.0773870	0.06924565	0.06282525	0.0572653
189-2	0.04497971	0.04935325	0.14171209	0.12616581	0.10825058	0.0961096	0.0865351	0.078243810
217-2	0.07786990	0.06406505	0.2034374	0.18325692	0.16000131	0.14424130	0.13181268	0.12104975
223-2	0.02168648	0.04831011	0.11637430	0.10115661	0.08362004	0.0717357	0.06236359	0.0542474
228-2	-0.0380536	0.05789994	0.07542935	0.05719101	0.03617348	0.02193020	0.01069770	0.00097058
235-2	0.01665487	0.04165007	0.09828901	0.08516924	0.07005026	0.05980434	0.05172423	0.0447270
236-2	0.04172509	0.02271059	0.08623786	0.0790840	0.07084007	0.06525326	0.06084741	0.05703203
251-2	0.009086	0.0321421	0.07208506	0.06196028	0.05029268	0.0423857	0.03615013	0.03075024
42-2	-0.0404238	0.114923167	0.18482554	0.148624752	0.10690764	0.078636543	0.05634144	0.03703435
49-2	-0.0092424	0.05717226	0.10281520	0.08480594	0.06405241	0.04998803	0.03889661	0.02929167
61-2	-0.0177201	0.09651905	0.17145719	0.14105369	0.10601727	0.08227359	0.063548895	0.0473336
68-2	-0.0123654	0.09728341	0.17831005	0.14766578	0.11235190	0.08842018	0.06954720	0.05320358
80-2	0.01548576	0.08278848	0.14677967	0.12070129	0.09064907	0.07028310	0.05422214	0.04031367
124-2	-0.039225	0.05515404	0.06887681	0.05150328	0.03148236	0.01791447	0.00721458	-0.00205128
172-2	-0.0030239	0.05692559	0.10855018	0.0906186	0.06995463	0.05595094	0.04490737	0.03534387
176-2	0.00258744	0.0229546	0.04757861	0.040347886	0.03201533	0.0263684	0.02191528	0.01805889
181-2	0.01064084	0.033200130	0.07571310	0.06525506	0.05320341	0.04503618	0.03859535	0.03301773
187-2	0.03663871	0.1420286	0.3150148	0.27027582	0.21871942	0.18378038	0.15622682	0.13236601
190-2	0.00480417	0.025140086	0.05407874	0.04615962	0.03703377	0.03084930	0.025972133	0.02174859
196-2	-0.0183076	0.02783718	0.03625320	0.02748449	0.0173795	0.01053164	0.00513123	0.00045458
241-2	-0.1349239	0.04502100	-0.04668276	-0.06086438	-0.07720701	-0.08828218	-0.09701625	-0.10457978
244-2	-0.0713511	0.08620571	0.09761208	0.07045728	0.039164607	0.0179580	0.00123409	-0.01324846
247-2	0.01238165	0.03281856	0.07670604	0.06636819	0.05445505	0.04638168	0.04001488	0.03450136
253-2	-0.0025507	0.02905573	0.05439854	0.04524598	0.03469875	0.02755103	0.02191422	0.01703286
254-2	-0.0022187	0.02880310	0.0542353	0.04516233	0.03470680	0.027621246	0.02203344	0.01719452
255-2	-0.0090715	0.12693711	0.23972538	0.19974019	0.1536620242	0.12243545	0.09780969	0.07648426
256-2	-0.0024859	0.07018003	0.13506688	0.11296017	0.0874848244	0.07022053	0.05660561	0.04481536

Apéndice VI. Estadísticas de imágenes mascara M3

Registr o	Prom	Desv	1.96	1.645	1.282	1.036	0.842	0.674
60-3	-0.0365557	0.04000625	0.041856530	0.0292545	0.0147322	0.0048907	-0.0028704	-0.00959150
116-3	-0.0025787	0.05020888	0.095830693	0.0800148	0.0617890	0.04943768	0.0396971	0.03126206
119-3	-0.0009752	0.06509170	0.126604540	0.1061006	0.0824723	0.06645980	0.0538320	0.04289660
120-3	0.0196792	0.09043367	0.196929252	0.1684426	0.1356152	0.11336853	0.0958243	0.08063153
121-3	0.1052419	0.1477322	0.39479704	0.3482613	0.2946346	0.25829243	0.2296324	0.20481342
129-3	0.0284359	0.022817589	0.07315840	0.0659708	0.0576880	0.05207495	0.0476483	0.04381498
149-3	-0.0327577	0.07146771	0.10731898	0.0848066	0.0588638	0.04128281	0.0274180	0.01541150
174-3	0.0241322	0.04113764	0.1047620	0.0918037	0.0760746	0.06675088	0.0587701	0.05185906
175-3	0.0473730	0.08749038	0.218854216	0.1912947	0.1595357	0.13801312	0.1210399	0.10634158
183-3	0.0022086	0.01615016	0.03386294	0.0287756	0.0229131	0.01894019	0.0158070	0.01309383
197-3	-0.0306207	0.02172299	0.01195629	0.0051135	-0.0027718	-0.00811575	-0.0123300	-0.01597948
221-3	0.1990633	0.13007039	0.45400133	0.4130291	0.3658136	0.33381628	0.3085826	0.28673080
225-3	0.0838809	0.192364247	0.4609149	0.4003201	0.3304919	0.28317035	0.2458516	0.21353449
237-3	-0.2446399	0.098303861	-0.05196439	-0.0829301	-0.1186141	-0.14279716	-0.1618681	-0.17838316
248-3	-0.0166903	0.043715027	0.06899112	0.0552088	0.0393523	0.02859843	0.0201177	0.01277359
252-3	0.0603271	0.054597653	0.16733857	0.1501403	0.1303213	0.11689033	0.1062983	0.09712598
46-3	0.0800107	0.081680952	0.24010544	0.2143759	0.1847257	0.16463224	0.1487861	0.13506373
67-3	0.0377916	0.127274847	0.2872503	0.2471587	0.2009579	0.16964838	0.1449570	0.12357489
79-3	-0.0215682	0.070135943	0.11589820	0.0938053	0.0683460	0.05109259	0.0374862	0.02570337
100-3	0.0743080	0.097007191	0.26444367	0.2338864	0.1986727	0.17480903	0.1559863	0.13969242
135-3	-0.0040918	0.044546809	0.08321993	0.0691876	0.0530171	0.04205868	0.0334166	0.02593273
184-3	0.0349593	0.033094892	0.09983408	0.0894004	0.0773870	0.06924566	0.0628252	0.05726530
189-3	0.0525430	0.053478063	0.15736009	0.1405145	0.1211019	0.10794636	0.0975716	0.08858730
217-3	0.0686821	0.074107116	0.21393210	0.1905883	0.1636874	0.14545713	0.1310803	0.11863035
223-3	0.0218059	0.055230922	0.1300585	0.1126077	0.0926119	0.07902514	0.0683103	0.05903155
228-3	-0.0382224	0.049816902	0.05941866	0.0437263	0.0256428	0.01338784	0.0037233	-0.00464587
235-3	0.0128634	0.042873710	0.09689595	0.0833907	0.0678275	0.05728065	0.0489631	0.04176036
236-3	0.0411242	0.021718758	0.08369304	0.0768516	0.0689677	0.06362489	0.0594114	0.05576269
251-3	0.0055031	0.025834037	0.05613789	0.0480001	0.0386224	0.03226723	0.0272554	0.02291531
42-3	-0.0368123	0.119263241	0.19694357	0.1593756	0.1160830	0.08674434	0.0636072	0.04357104
49-3	-0.0118331	0.055406660	0.0967638	0.0793107	0.0591981	0.04556811	0.0348192	0.0255109
61-3	-0.0343219	0.125942148	0.212524629	0.1728528	0.1271358	0.09615408	0.0717213	0.05056302
68-3	-0.0323631	0.134083493	0.23044045	0.1882041	0.1395318	0.10654730	0.0805351	0.05800908
80-3	-0.0106197	0.085649414	0.15725310	0.1302735	0.0991828	0.078113045	0.0614970	0.04710795
124-3	-0.0308827	0.060325872	0.08735593	0.0683532	0.0464549	0.031614832	0.0199116	0.00978669
172-3	-0.0021234	0.061503714	0.11842435	0.0990506	0.0767246	0.061594684	0.0496629	0.03933024
176-3	-0.0014391	0.020278048	0.03832158	0.0319339	0.0245730	0.019584667	0.0156507	0.01224401
181-3	0.0072792	0.037815953	0.08139847	0.0694864	0.0557592	0.046456534	0.039120	0.03276715
187-3	0.0214263	0.166407620	0.34758525	0.2951668	0.2347608	0.193824614	0.1615415	0.13358505
190-3	0.0070121	0.021407089	0.04897004	0.0422268	0.0344560	0.029189896	0.0250369	0.02144053
196-3	-0.0159073	0.024787292	0.03267570	0.0248677	0.0158699	0.009772244	0.0049635	0.00079924
241-3	-0.1349871	0.059190160	-0.01897448	-0.0371938	-0.0591054	-0.073661899	-0.0851490	-0.09509302
244-3	-0.0699440	0.083262052	0.093249	0.0670220	0.0367888	0.016315423	0.0001625	-0.01382543
247-3	0.0107657	0.027025992	0.06373668	0.0552235	0.0454130	0.038764672	0.0335216	0.02898126
253-3	-0.0019681	0.037512246	0.07155584	0.0597394	0.0461225	0.036894525	0.0296171	0.02331509
254-3	-0.0058277	0.043080755	0.0786104	0.0650400	0.0494017	0.038803880	0.0304621	0.02320864
255-3	-0.0279115	0.113223545	0.19400656	0.1583411	0.1172410	0.089388010	0.0674226	0.04840108
256-3	-0.0124524	0.067545782	0.1199372	0.0986603	0.0741412	0.057524950	0.0444210	0.03307337