

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA CONSTRUIR EL ESCENARIO DE
DEFORESTACIÓN DE FORMACIONES LEÑOSAS DEL NORTE DE CHILE**

DANIELA MONTALVA SOLIS

Santiago, Chile
2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA CONSTRUIR EL ESCENARIO DE
DEFORESTACIÓN DE FORMACIONES LEÑOSAS DEL NORTE DE CHILE**

**METHODOLOGICAL PROPOSAL TO BUILD THE SCENARIO FOR
DEFORESTATION OF WOODEN FORMATIONS IN NORTH CHILE**

DANIELA MONTALVA SOLIS

Santiago, Chile
2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA CONSTRUIR EL ESCENARIO DE
DEFORESTACIÓN DE FORMACIONES LEÑOSAS DEL NORTE DE CHILE**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

DANIELA MONTALVA SOLIS

Profesor Guía	Calificaciones
Manuel Paneque C. Bioquímico, Dr.	7,0
Profesores Evaluadores	
Gerardo Soto M. Ingeniero Forestal, M.S. Dr.	6,9
Marcos Mora G. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,2

Santiago, Chile
2017

A mi Vicente!

AGRADECIMIENTOS

Comenzaré agradeciendo a mi familia, principalmente a mi madre! Gracias a ti he llegado hasta aquí y llegaré muy lejos, gracias por cada uno de los momentos que has vivido con la finalidad de tener unas hijas exitosas, gracias por cada decisión que has tomado porque eso ha ayudado a forjar nuestras vidas, gracias por estar ahí siempre, gracias infinitas a ti... Este es un logro tuyo madre amada!!!

Gracias a mi hermana Caro que siempre me motivó con los estudios y me instaba a confiar en mí, además me ha enseñado que con esfuerzo se puede lograr mucho. Gracias a mi Mamita Juana que me regalaba y eso me daba mucha energía para seguir. Gracias a mi padre, que también se hizo presente en este proceso.

Gracias a Andrés por ser parte de mi vida, mi compañero, el padre de mi hijo, mi amor de la vida. Gracias por apoyarme siempre y ser un factor importante en el desarrollo de mi vida profesional.

Gracias a mi hijo Vicente que irrumpió justo en medio de esta memoria de título, viniendo a rebosar de alegría y amor mis días, a sorprenderme y maravillarme haciéndome conectar con mi esencia mamífera.

Gracias a mis amigos de Antumapu, por todos esos momentos, aprendizajes, trabajos, comilonas, risas, y tantas cosas más. También agradezco al campus Antumapu, su hermosura me cautivaba cada vez llegaba y recorría sus rincones, y así a toda la fauna antumapina que la compone, incluyendo a los profesores, administrativos y auxiliares todos.

Gracias al planeta tierra, a la naturaleza y a la vida, la cual nunca nos dejará de impresionar con su inmensidad y poder.

Finalmente gracias al equipo de Agroenergía por acogerme y apoyarme durante la realización de esta memoria.

Gracias infinitas!

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos.....	4
2 ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Caracterización de los recursos naturales del norte de Chile	5
2.2 Caracterización de la deforestación.....	7
2.3 Motores de deforestación	9
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3.1 Materiales	12
3.1.1 Área de estudio	12
3.2 Metodología	13
3.2.1 Procesamiento de imágenes satelitales	13
3.2.1.1 Pre-procesamiento de imágenes satelitales	14
<i>Conversión a reflectividad</i>	<i>15</i>
<i>Corrección atmosférica.....</i>	<i>17</i>
<i>Corrección topográfica.....</i>	<i>17</i>
<i>Mosaico</i>	<i>19</i>
3.2.1.2 Identificación de coberturas.....	19
<i>Identificación de vegetación.....</i>	<i>19</i>
<i>Identificación de otras coberturas</i>	<i>21</i>
3.2.2 Caracterización de la deforestación de las formaciones leñosas	21
3.2.3 Identificación y proyección de motores de deforestación	22
3.2.4 Predicción del escenario de deforestación en el período 2014-2113.....	23
3.2.4.1 Tendencia lineal histórica	23
3.2.4.2 Promedio anual histórico	24
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25

4.1	Procesamiento de imágenes satelitales.....	25
4.1.1	Pre-procesamiento de imágenes satelitales.....	26
	<i>Mosaico</i>	27
4.1.2	Identificación de coberturas.....	28
	<i>Identificación de vegetación</i>	28
	<i>Identificación de otras coberturas</i>	32
4.2	Caracterización de la deforestación de las formaciones leñosas.....	34
4.3	Identificación y proyección de motores de deforestación.....	36
4.4	Predicción del escenario de deforestación en el período 2014-2113	40
5	CONCLUSIONES	43
6	BIBLIOGRAFÍA	44
7	ANEXOS Y APÉNDICES	52
7.1	Anexo 1. Imágenes satelitales utilizadas, con su <i>Path Row</i> , nombre y fecha de adquisición.	52
7.2	Anexo 2. Escenarios de deforestación 2014-2113 (Ha).....	54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Causas directas de la deforestación a nivel mundial.....	10
Cuadro 2. Bandas utilizadas y su respectivo rango de longitud de onda según sensor y satélite.	14
Cuadro 3. Coberturas utilizadas para la clasificación supervisada, indicando número de polígonos, superficie y píxeles de las áreas de entrenamiento por cobertura.	31
Cuadro 4. Superficie de bosque y matorral, en hectáreas y porcentaje para los años 2003, 2008 y 2013.....	35
Cuadro 5. Superficie de plantaciones forestales (forestación y reforestación), para las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, para los períodos 2004-2008 y 2009-2013, en hectáreas, según cifras oficiales de CONAF.	35
Cuadro 6. Cambios en la cobertura vegetal de formaciones leñosas, en hectáreas y porcentaje, para los períodos 2003-2008 y 2008-2013.....	36
Cuadro 7. Cambio de uso de suelo del año 2003 al 2008, en porcentaje. Se entiende como el porcentaje de la cobertura en el año 2003 que pasó a ser otra cobertura en el año 2008.	38
Cuadro 8. Cambio de uso de suelo del año 2008 al 2013, en porcentaje. Se entiende como el porcentaje de la cobertura en el año 2008 que pasó a ser otra cobertura en el año 2013.	39
Cuadro 9. Superficie de agricultura en los años 2003, 2008 y 2013. En hectáreas y porcentaje.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio en UTM 19 Sur, Datum WGS 84. Incluye las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, con dimensión nacional como referencia. El área de estudio corresponde a cerca de un 30% del territorio nacional.	13
Figura 2. Red de 19 <i>Path Row</i> (identificación única de ubicación geográfica de imágenes de la misión Landsat), que cubren el área de estudio. Corresponden a las 19 escenas que se procesaron por cada año, para cubrir por completo el área de estudio.	15
Figura 3. Imágenes satelitales crudas (en ND) en combinación de verdadero color, del año 2008, obtenidas por el sensor TM a bordo del satélite Landsat 5 (USGSa, 2014), sobrepuestas cubriendo el área de estudio, antes de ser pre-procesadas.	25
Figura 4. a) Escena con corrección atmosférica, utilizada como entrada a la corrección topográfica; b) Método del Coseno, se observa sobreexposición a la luz en zonas con relieve; c) Método de corrección C, con regresión en escena completa, se observa una corrección poco eficiente, se siguen apreciando zonas con sombras en relieves; d) Método de corrección C, con regresión en polígono de sombra y luz, se observa escena uniforme, eliminando el efecto de las sombras en zonas con relieve.	27
Figura 5. Mosaicos resultantes para los años a) 2003, b) 2008, c) 2013. En este último se puede observar la disparidad en los tonos de las escenas que componen el mosaico.	28
Figura 6. Mapas de zonificación utilizando NDVI; a) Año 2003, valor umbral NDVI 0,1; b) Año 2008, valor umbral NDVI 0,1; c) Año 2013, valor umbral NDVI 0,1; d) Año 2013, valor umbral NDVI 0,14. Se observa a modo general que la zonificación coincide espacialmente en los años de estudio, luego de aplicada la corrección del valor umbral en el año 2013.	29
Figura 7. Bosques, praderas matorrales y terrenos agrícolas en el Catastro de Recursos Vegetacionales del año 1997. Se puede observar que la distribución de la vegetación de interés coincide con la zonificación realizada con NDVI (Figura 6).	30
Figura 8. Clasificación supervisada en zonificación con NDVI, sin considerar las coberturas de cuerpos de agua ni salar, a) Año 2003; b) Año 2008; c) Año 2013.	31
Figura 9. Carta de ocupación de tierras a) Año 2003; b) Año 2008; c) Año 2013.	34
Figura 10. Superficie de bosque deforestada acumulada para el período 2014-2113 (ha) ...	41
Figura 11. Superficie de matorral deforestada acumulada para el período 2014-2113 (ha).	42

GLOSARIO DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

Siglas institucionales y de organizaciones

CEA	Centro de Estudios Agrarios y Ambientales
CONAF	Corporación Nacional Forestal
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
DGA	Dirección General de Aguas
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
ENAMI	Empresa Nacional de Minería
GORE	Gobierno Regional
INE	Instituto Nacional de Estadísticas
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
ONF	Oficina Nacional Forestal internacional
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada
SNASPE	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado
USGS	United States Geological Survey

Abreviaturas

ASPS	Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
COT	Carta de Ocupación de Tierras
DEM	Digital Elevation Model
ENOS	El Niño, Oscilación del Sur
ENVI	Exelis Visual Information Solutions
ERD	Estrategia Regional de Desarrollo
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
IDL	Interface Data Language
ND	Nivel Digital
NDII	Normalized Difference Infrared Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
OLI	Operational Land Imager
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SLC	Scan Line Corrector
REDD+	Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación

TM	Thematic Mapper
TP1	Elaboración de Insumos Técnicos y Metodológicos para el Desarrollo de la Tipología de Proyectos Forestales de Captura de Carbono mediante Manejo, Forestación y Conservación en Zonas Áridas con Fines de Producción de Bioenergía y Bonos de Carbono en el Norte Grande
UTM	Universal Transverse Mercator
VCS	Verified Carbon Standar
WGS	World Geodetic System

Nomenclatura de unidades usadas

ha	Hectárea
m^2	Metro cuadrado
ND	Nivel Digital
sr	Estereorradián
μm	Micrómetro
W	Watt

RESUMEN

Las formaciones de bosque y matorral en el norte de Chile, si bien son escasas, son importantísimas para la biodiversidad y los ciclos de la tierra. A pesar de esto, su evolución y cambios no han sido suficientemente estudiados, incluidos los factores que propician su deforestación. En este contexto, el principal objetivo de este estudio fue desarrollar una metodología para construir el escenario de deforestación de formaciones leñosas entre los años 2003-2013, y entre los años 2014-2113, para el norte de Chile. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8, de los años 2003, 2008 y 2013, de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. Las imágenes fueron procesadas y agrupadas en un mosaico para cada año, zonificándose en función de NDVI y clasificándose en diferentes coberturas. Se determinó la magnitud y distribución de los cambios en las coberturas de bosque y matorral. Posteriormente, se identificaron los motores de deforestación proyectándose al periodo 2014-2113, junto con la proyección de la deforestación. La deforestación bruta de bosque y matorral fue de 75.903 ha y 577.338 ha, respectivamente. La reforestación de bosque y matorral fue de 110.181 ha y 716.898 ha, respectivamente. Se cuantificó un aumento neto de 34.279 ha para bosques y 139.560 ha para matorrales. En concreto, entre los años 2003 y 2013 hubo un aumento de 1,49% en la superficie de bosque y un aumento de 3,23% de matorral entre las regiones de Arica y Parinacota y Atacama. La tala, extracción de madera y la agricultura son los principales motores de deforestación en el norte de Chile. La agricultura con una leve tendencia al alza no debería representar un motor importante de deforestación en el futuro. La superficie de bosque se acabaría en el año 2038 y la superficie de matorral se acabaría el año 2030. El método de predicción según el promedio anual histórico es el más acertado para proyectar la deforestación. En conclusión, no existe una pérdida neta de formaciones leñosas en el norte de Chile, ya que la reforestación es mayor a la deforestación. Sin embargo, antes del 2040 se podrían agotar las formaciones leñosas si no se establecen medidas para su protección.

Palabras claves: bosque; matorral; teledetección; imágenes satelitales, motores.

ABSTRACT

The formations of forest and scrubland in the north of Chile, although are scarce, are very important for biodiversity and earth cycles. Nevertheless, their evolution and changes have not been sufficiently studied, nor the factors that propitiate their deforestation. In that context, the main objective of this study was to develop a methodology in order to construct the deforestation scenario of woody formations between the years 2003-2013, and between the years 2014-2113, for north of Chile. Landsat 5 and Landsat 8 satellite images were used from 2003, 2008 and 2013 from the Arica and Parinacota, Tarapacá, Antofagasta and Atacama regions. The images were processed and grouped in a mosaic of each year, then zoned according to NDVI and classified into different coverages. The magnitude and distribution of the changes in coverages of wood and scrub was determined. Drivers of deforestation were identified and projected for the period of 2014-2113, along with the deforestation projection. The gross deforestation of woods and scrubs was of about 75.903 ha and 577.338 ha respectively. The reforestation of forest and scrub was of about 110,181 ha and 716,898 ha, respectively. A gross increment of 34.279 ha for forest and of 139.560 ha for scrubs was quantified. Specifically, between the years 2003 and 2013 there was a 1.49% increase in forest area and an increase of 3.23% in scrub between Arica and Parinacota and Atacama regions. The cut down, wood extration and agriculture are the main drivers of deforestation in northern Chile. Agriculture, with a slight growth tendency, should not represent an important motor of deforestation in the future. The surface of forest would be depleted by the year 2038 and the surface of scrubs, by 2030. The prediction method according to the yearly historical average is the most accurate for projecting deforestation. In conclusion, there is no net loss of woody formations in northern Chile, since reforestation is greater than deforestation. However, before 2040, woody formations could be depleted if no measures were put in place for their protection.

Key words: forest; scrubland; teledetection; satellite images; drivers.

1 INTRODUCCIÓN

Los bosques y matorrales son fuente de bienes como madera, fibras, leña, plantas comestibles y medicinales, además de proveer de servicios ecosistémicos, ayudar a la conservación de la biodiversidad, a la protección de las cuencas hidrográficas y ser responsables de la mayor parte de los flujos de carbono entre la tierra y la atmósfera, a través de la fotosíntesis y la respiración (Leith y Whittaker, 1975; Franquis e Infante, 2003). Aproximadamente el 90% de la biomasa acumulada en la tierra, se encuentra en los bosques en forma de troncos, ramas, hojas, raíces y materia orgánica (Raev *et al.*, 1996). La Ley sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, define bosque a un lugar cubierto por formaciones vegetacionales con una superficie mínima de 0,5 hectáreas y un ancho de 40 metros como mínimo, en el que predominan especies arbóreas, y cuya cobertura de copa debe superar el 10% de la superficie total en condiciones áridas y semiáridas (Ley N° 20.283, 2008).

La deforestación es la pérdida de superficie boscosa, entendida también como el cambio del uso de suelo forestal a no forestal (IPCC, 2000). Las causas directas de la deforestación son principalmente de origen antrópico, y están asociadas a la tala y/o quema de los bosques, lo que promueve el cambio de uso de suelo, pasando de cobertura arbórea a uso agrícola o urbano, en beneficio del desarrollo humano, dando paso al crecimiento de actividades económicas y expansión de asentamientos (FAO, 2012). Se estima que en los últimos 10 años, a nivel mundial, se han perdido cerca de 5,2 millones de hectáreas de bosques al año, a una tasa de 0,13% anual, la cual se ha mantenido en el tiempo (FAO, 2010). En Chile la deforestación ha sido tal, que desde el inicio del siglo XVI la superficie de bosque nativo ha disminuido un 46,6% (Del Pozo, 2013). Sin embargo, la tasa anual de deforestación fue de 0,1%, entre el año 1990 y 2000, considerando un aumento del 0,37% en la superficie de plantaciones forestales (FAO, 2001; FAO 2010).

Se sostiene que la pérdida de cobertura forestal, contribuye entre un 16% a 18% a las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Arriaga, 2012). La deforestación contribuye al calentamiento global y el aumento de los bosques representa una oportunidad para capturar el carbono contenido en la atmósfera (Arriaga, 2012). También la deforestación es una de las causas de la desertificación, estimándose que más de 100 millones de hectáreas en América del Sur han sido degradadas debido a la deforestación (Morales, 2005).

En el norte de Chile, entre el paralelo 17° sur hasta el 32° sur, un 0,48% de la superficie corresponde a bosque, un 0,41% a plantaciones, y un 26,6% corresponde a matorral (Universidad Austral de Chile *et al.*, 1999). Esto da cuenta que las formaciones de matorral son el principal tipo de vegetación presente en el norte de Chile, y su importancia radica en el rol que cumplen para mantener la biodiversidad, en el control de la erosión de los suelos, y con esto en el posterior control de la desertificación, además de ser la principal fuente de secuestro de carbono debido a su condición leñosa (Gutiérrez y Squeo, 2004; FAO, 2005). Sin embargo, la pérdida de cobertura de matorrales no se considera deforestación y no tiene asociadas medidas destinadas a su seguimiento (IPCC, 2000).

Los principales métodos para estimar la deforestación están basados en teledetección, donde se realizan análisis multitemporales de imágenes satelitales, con las cuales se estima la pérdida de las cubiertas de interés. Las principales diferencias entre los estudios son la escala geográfica y los métodos para determinar a qué cobertura corresponde cada zona de la imagen, siendo posible utilizar índices de vegetación, como Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), *Tasseled Cap*, Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII, por sus siglas en inglés), clasificación supervisada u otros (Segura y Trincado, 2003; Salazar, 2009; Centro Geo, 2010).

En el año 1997 se realizó el Catastro de Recursos Vegetacionales para el Norte Grande de Chile (Universidad Austral de Chile et al., 1999). Sin embargo, debido a la falta de temporalidad en la realización del catastro, no se permite monitorear el estado de la vegetación en el norte de país.

En el presente trabajo se estimó la deforestación en el norte de Chile utilizando teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), considerando las formaciones leñosas de bosque, plantaciones y matorrales, lo que se enmarca dentro del proyecto “Elaboración de Insumos Técnicos y Metodológicos para el Desarrollo de la Tipología de Proyectos Forestales de Captura de Carbono mediante Manejo, Forestación y Conservación en Zonas Áridas con Fines de Producción de Bioenergía y Bonos de Carbono en el Norte Grande (TP1)”, Corporación Nacional Forestal (CONAF) 633-83-LP13.

1.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para construir el escenario de deforestación de formaciones leñosas entre los años 2003-2013, y entre los años 2014-2113, para el norte de Chile.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la deforestación de formaciones leñosas en el norte de Chile, para el período 2003-2013.
- Estimar la deforestación bruta y deforestación neta en el norte de Chile.
- Identificar motores de deforestación en el norte de Chile y proyectarlos para el período 2014-2113.
- Predecir el escenario de deforestación de formaciones leñosas en el norte de Chile, para el período 2014-2113.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Caracterización de los recursos naturales del norte de Chile

A continuación, se presentan las características de los componentes naturales del norte de Chile considerados relevantes para el desarrollo de este estudio.

Clima

El clima del norte de Chile es determinado por sus características geográficas, donde se destaca la presencia de la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia, la Cordillera de Los Andes y el Altiplano (Seyfried *et al.* 1998; INE, 2006), además la presencia de los fenómenos de la corriente de Humboldt, el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS) y el Cinturón de Vientos del Oeste (Juliá *et al.*, 2008). La combinación de estos factores determina la alta presencia de nubosidad en la zona costera (camanchaca), la extrema aridez en la zona interior y la influencia de clima tropical en verano en el altiplano (invierno boliviano; Zulantay *et al.*, 2013).

Según la clasificación climática de W. Köppen, el norte de Chile posee 4 tipos de climas distribuidos longitudinalmente, de oeste a este; clima árido con nublados abundantes (BWn), en el cual se registran temperaturas relativamente bajas, con una baja amplitud térmica diaria y anual, presencia de camanchaca y escasas precipitaciones; el clima árido o desértico normal (BWk), donde es constante la ausencia de lluvias y la alta amplitud térmica diaria; el clima árido muy frío (BWk'), en el cual las temperaturas no alcanzan los 13 °C, y además se caracteriza por la presencia de lluvias en verano por la influencia del invierno boliviano; y frío de tundra por altura (ETH), donde el mes más cálido no supera los 10 °C (INE, 2006; Juliá *et al.*, 2008; Rioseco y Tesser, 2007).

Di Castri y Hajek (1976) proponen que el norte de Chile se caracteriza por ser parte de la zona de tendencia tropical, la cual se divide en tres sub-regiones: costera, desierto interior y puna. El Desierto de Atacama corresponde al desierto más árido del mundo, en este se han registrado decenas de años sin presencia de precipitaciones (Mckay *et al.*, 2003).

Otro fenómeno importante es El Niño, Oscilación del Sur (ENOS), el cual consta de la fase cálida y la fase fría, denominados El Niño y La Niña respectivamente. Cuando se da el fenómeno de El Niño, se registran precipitaciones extremas, las cuales incluso en ocasiones se dejan caer en el Desierto de Atacama (SHOA, 2014).

Vegetación

Debido a las condiciones climáticas del norte de Chile, y a la poca disponibilidad de agua, la vegetación es escasa. Lo principal es la presencia de formaciones xerofíticas en las cuales conviven cactáceas, arbustos y praderas (Ley 20.283, 2008; Trivelli, 2014). Sin embargo, en los valles transversales, humedales, salares, altiplano y en el sector costero aumenta la presencia de vegetación, debido a la mayor, aunque aún escasa, disponibilidad de agua (Trivelli, 2014).

Si bien la distribución de la vegetación responde a una actitud longitudinal acorde a los tipos de clima asociado a las condiciones topográficas, latitudinalmente también tiene una característica, desde Chañaral (ciudad de la Región de Atacama) al sur, comienza a aumentar la densidad de estepas y formaciones arbustivas (INE, 2006).

En la clasificación vegetacional realizada por Gajardo (1994), se propone que la vegetación natural del norte de Chile se agrupa en la región del Desierto, la cual incluye las sub-regiones del Desierto Absoluto, Desierto Andino, Desierto Costero y Desierto Florido. La región del Desierto del Pacífico incluye la sub-región del Desierto del Pacífico, y la región de la Estepa Altoandina a las sub-regiones de los Andes Mediterráneos y del Altiplano y de la Puna.

Por su parte, Luebert y Pliscoff (2006), postulan que las formaciones vegetacionales presentes en el norte de Chile corresponden al desierto absoluto, matorral desértico, matorral bajo desértico, matorral bajo de altitud, herbazal de altitud y bosque espinoso.

Según Trivelli (2014) las formaciones vegetacionales características del norte de Chile son seis: los pajonales, donde predominan pastos o “pajas”; los bofedales, donde la vegetación se agrupa formando cojines extensos y compactos como un tipo de pantano; llaretales, donde predomina la especie *Azorella compacta* (llareta); queñoales, caracterizados por presencia de *Polylepis tarapacana* (queñoa de altura), la cual habita sobre los 4.000 m de altura (Orrego, 2011); tolar del altiplano, correspondiente a una formación de matorral que crece entremezclado con gramíneas cespitosas; y lampayal, donde domina la especie *Lampaya medicinalis* (lampayo).

Algunas especies arbustivas presentes en el norte de Chile son: *Prosopis tamarugo* (tamarugo), *Geoffroea decorticans* (chañar), *Schinus molle* (pimiento), *Pluchea absinthioides* (brea), *Atriplex atacamensis* (cachiyuyo), *Fabiana ramulosa* (quipa), *Diplostephium meyenii*, *Baccharis boliviensis*, *Polylepis tarapacana* (queñoa de altura), *Parastrephia lucida* (tola), *Parastrephia quadrangularis* (tola), *Baccharis tola*, *Skytanthus acutus* (cuerno de cabra), *Euphorbia lactiflua* (lechero), *Balsamocarpon brevifolium* (algarrobilla) y *Cordia decandra* (carbonillo; Trivelli, 2014)

Las especies cactáceas predominantes son: *Browningia candelaris* (cactus candelabro), *Eulychnia iquiquensis* (copao) y *Opuntia ignescens* (puskayo), además de la presencia de los géneros *Copiapoa* y *Eriogyne* (Trivelli, 2014).

Entre las herbáceas se pueden nombrar: *Lycopersicon chilense* (tomatillo), *Cistanthe celosioides*, *Distichlis spicata* (grama salada), *Nolana spp.* (suspiros), *Azorella compacta* (llareta), *Senecio nutans* (chachacoma), *Encelia canescens* (coronilla del fraile), *Frankenia chilensis* (hierba del salitre), *Rhodophiala phycelloides* (añañuca roja), *Cristaria sp.* (malvilla), entre otras (Trivelli, 2014).

Otro aspecto relevante de la vegetación del desierto es un evento único en el mundo denominado Desierto Florido, donde la vegetación existente representa esencialmente semillas y bulbos de geófitas que emergen durante años lluviosos asociados al fenómeno de El Niño (Ulloa y Ortiz, 1989; Gajardo 1994).

En cuanto a la cuantificación de la vegetación del norte de Chile, el Catastro de Recursos Vegetacionales realizado el año 1999 por CONAF, dio como resultado que en conjunto las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, albergan aproximadamente 7.300 hectáreas de bosque, 30.386 hectáreas de plantaciones y 5.061.448 hectáreas de matorral, equivalente al 0,14% de bosque, 0,6% de plantaciones, y a un 19,25% de matorral en relación al área cubierta por las cuatro primeras regiones (Universidad Austral de Chile *et al.*, 1999).

2.2 Caracterización de la deforestación

Definición de deforestación

La deforestación es la pérdida de superficie boscosa, entendida también como el cambio del uso de suelo forestal a no forestal (IPCC, 2000). Si se tala un bosque, y en éste se volverá a plantar o se dará un uso forestal al terreno, entonces no constituye deforestación (IPCC, 2000).

Cuando en un bosque se generan cambios que merman su capacidad para ofrecer productos o servicios, por ejemplo, perder la capacidad de capturar carbono debido a la disminución de su masa arbórea se habla de degradación (Angelsen *et al.*, 2009). Esto no constituye deforestación, debido a que el área de bosque sigue siendo la misma, aunque se encuentre degradado.

Por lo tanto, solo cuando el cambio de uso de suelo es efectivo, es decir, cuando el bosque deja de ser bosque según su definición, se trata de deforestación.

Para aplicar la definición de deforestación al norte de Chile, se considera la definición de bosque y la de matorral, lo cual se detalla a continuación.

Bosque

Se define como bosque el conjunto de árboles en una superficie determinada, sin embargo existen diversas definiciones legales y/o conceptuales que se deben considerar.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) define bosque como la superficie mínima de tierras de entre 0,05 y 1,0 hectáreas (ha), con una cubierta de copas (o una densidad de población equivalente) que excede del 10% al 30% y con árboles que pueden alcanzar una altura mínima de entre 2 y 5 metros (m) a su madurez in situ. Un bosque puede consistir en formaciones forestales densas, donde los árboles de diversas alturas y el sotobosque cubren una proporción considerable del terreno, o bien en una masa boscosa clara. Se consideran bosques también las masas forestales naturales y todas las plantaciones jóvenes que aún no han alcanzado una densidad de copas de entre el 10% y el 30% o una altura de los árboles de entre 2 y 5 m, así como las superficies que normalmente forman parte de la zona boscosa pero carecen temporalmente de población forestal a consecuencia de la intervención humana, por ejemplo, de la explotación, o de causas naturales, pero que se espera vuelvan a convertirse en bosque (CMNUCC, 2002. p. 61).

La Ley sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, define bosque como un sitio poblado con formaciones vegetales en las que predominan árboles y que ocupa una superficie de por lo menos 5.000 metros cuadrados, con un ancho mínimo de 40 metros, con cobertura de copa arbórea que supera el 10% de la superficie total en condiciones áridas y semiáridas y el 25% en circunstancias más favorables (Ley N° 20.283, 2008. Artículo 2°).

Los autores del Catastro de Recursos Vegetacionales (Universidad Austral de Chile *et al.*, 1999), definen bosque como el estrato arbóreo, constituido por especies nativas, con una altura mayor o igual a 2 m y una cobertura de copas mayor o igual al 25%. En el caso de las Macroregiones I, Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado Norte (SNASPE Norte), V y parte de la Macroregión Ila el valor de cobertura mínima para los árboles es de 10%. También definieron plantación, como un bosque cuyo estrato arbóreo está dominado por especies exóticas o nativas plantadas (CONAF y CONAMA, 1995).

El componente principal de un bosque es un árbol, que corresponde a una planta de fuste generalmente leñoso, que en su estado adulto y en condiciones normales de hábitat puede alcanzar, a lo menos, cinco metros de altura, o una menor en condiciones ambientales que limiten su desarrollo (Ley N° 20.283, 2008. Artículo 2°).

Matorral

No existe una definición legal en Chile sobre lo que es un matorral. Sin embargo, se entiende como una formación donde predominan arbustos, lo cual tampoco se describe legalmente. Aun así, se concibe arbusto como una especie leñosa que no supera los 5 metros de altura, la cual no forma un tronco principal si no que produce ramificaciones desde su base (CEA, 2014).

Una definición legal importante de considerar es formación xerofítica, que corresponde a una formación vegetal constituida por especies autóctonas, preferentemente arbustivas o suculentas, de áreas de condiciones áridas o semiáridas ubicadas entre las Regiones I y VI, incluidas la Metropolitana y la XV y en las depresiones interiores de la Regiones VII y VIII (Ley N° 20.283, 2008. Artículo 2°).

2.3 Motores de deforestación

Los motores de deforestación corresponden a las causas de ésta, las cuales pueden ser de origen natural o antrópico. Las causas naturales escapan al alcance del ser humano. Las causas antrópicas se dividen en causas subyacentes y causas directas, estas se encuentran ligadas, ya que las causas directas están dadas por las subyacentes (Angelsen y Kaimowitz, 1999; Geist y Lambin, 2001; ONF International, 2010).

Los factores subyacentes o indirectos corresponden a factores demográficos, económicos, tecnológicos, culturales, políticos e institucionales, que se pueden dar a nivel nacional o regional. Estos propician la aparición de las causas directas. Algunos ejemplos de factores subyacentes pueden ser el aumento del precio de un producto agrícola, aumento de la pobreza, de la falta de acceso a la energía, la densidad demográfica, las políticas de desarrollo económico, etc. (ONF Internacional, 2010).

Los factores directos corresponden a las actividades responsables de que ocurra la deforestación como tal, son aquellas que reemplazan la cobertura forestal, la cual se realiza por los agentes de deforestación, correspondiente a quienes ejecutan directamente la acción de deforestar (Geist y Lambin, 2001; Kanningen *et al.*, 2007; ONF International, 2010; FAO, 2012). Algunos ejemplos de agentes de deforestación son agricultores, los explotadores de bosques o minas, los usuarios de recursos leñosos, los gobiernos que invierten en infraestructuras, etc. (ONF International, 2010).

Geist y Lambin (2001) proponen una lista empírica de causas directas de la deforestación a nivel mundial, en el Cuadro 1 se presenta un resumen de ello. Allí los “otros factores” influyen en la aparición de las otras causas directas, pero actúan como causas subyacentes, aunque siguen siendo causas directas (Geist y Lambin, 2001).

Por otro lado, Cenamo *et al* (2011) proponen que la degradación de un bosque puede llegar a ser un motor indirecto de deforestación, si esta se va dando progresivamente.

Cuadro 1. Causas directas de la deforestación a nivel mundial.

Ampliación de las infraestructuras	Transporte (carreteras, líneas férreas)
	Mercados (públicos y privados por ejemplo aserraderos)
	Hábitat (rural, urbano)
	Obras públicas (abastecimiento de agua, saneamiento, red eléctrica)
	Empresas privadas (hidroelectricidad, minas, hidrocarburos)
Expansión de la agricultura	Cultivos permanentes (gran escala frente a pequeña escala, subsistencia frente a comercial)
	Agricultura itinerante (tala y quema frente a tradicional)
	Ganadería (gran escala frente a pequeña escala)
Explotación forestal	Colonización (migraciones, proyectos de reubicación)
	Comercial (privada, estatal)
	Explotación artesanal (formal frente a informal)
	Leña (uso doméstico)
Otros factores	Carbón vegetal (uso comercial frente a uso doméstico)
	Oferta medioambiental (calidad de los suelos, topografía, fragmentación del bosque)
	Factores biofísicos (sequía, incendios, inundaciones, plagas)
	Factores sociales (guerras desorden social, desplazamientos de la población, crisis económica y política)

Fuente: Elaboración propia, en base a Geist y Lambin (2001).

Los motores de deforestación si bien suelen ser similares a nivel mundial, varían según las condiciones ambientales, sociales, políticas y económicas de cada país, incluso varían dentro del mismo territorio. En países de América Latina tales como Perú y Colombia, son causas de deforestación los cultivos ilícitos de coca, una realidad netamente local (Cenamo *et al*, 2011). En la Amazonía la principal causa directa de deforestación sería la ganadería, ya que se deforesta con el objetivo de aumentar la calidad y biomasa de los pastos (Cenamo *et al*, 2011). En países como Bolivia, Ecuador, Perú y Venezuela la extracción de petróleo y/o gas

natural es un importante factor subyacente; y la minería (especialmente oro) en Ecuador, Perú, Surinam y Venezuela (Cenamo *et al*, 2011).

Motores de deforestación a nivel nacional

La diversidad de ecosistemas y condiciones climáticas en Chile trae consigo diversas actividades económicas, de acuerdo al área geográfica. De esta manera se define, por mencionar algunos ejemplos, principalmente minería en el norte, actividad forestal y agrícola en el centro-sur, y la presencia de salmoneras en el sur.

Históricamente la expansión de la minería en el norte, la exportación de trigo y la colonización del sur fueron las principales causas de deforestación en el país a mediados del siglo XIX (O'Brien, 2009; MMA, 2011). La colonización de Aysén, la crisis del salitre y la ocurrencia de grandes incendios de tierras cubiertas de alerce en la Cordillera de la Costa fueron los motores protagonistas en el siglo XX (MMA, 2011).

Actualmente, los bosques de la zona centro-sur son los más amenazados, principalmente por la expansión urbana y su consecuente habilitación y creación de caminos y carreteras, la expansión de cultivos agrícolas y la instalación de empresas forestales (Aguayo *et al*, 2009; Salazar, 2009; FAO 2011). Con respecto a las causas probables de deforestación en la actualidad en el norte de Chile, no se encontró información.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

Recursos digitales

- 42 imágenes satelitales Thematic Mapper (TM) Landsat 5, 20 para el año 2003 y 22 para el año 2008 (Anexo I).
- 20 imágenes satelitales Operational Land Imager (OLI) Landsat 8, para el año 2013 (Anexo I).
- 43 azulejos de Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) de Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER).
- Imágenes satelitales de alta resolución BingMap de ArcGis.
- Imágenes satelitales de alta resolución Google Earth.

Software de procesamiento

- ArcMap 10.1.
- Exelis Visual Information Solutions (ENVI) 5.0.
- Interface Data Language (IDL) 8.2.

Capas temáticas

- Catastro de Recursos Vegetacionales.
- Centros Poblados.
- Ciudades.
- Cuerpos de agua.
- Formaciones vegetacionales de Gajardo.
- Inventario Nacional de Humedales 2012.
- Límites urbanos de las comunas del área de estudio.
- Límites regionales.

3.1.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. Se extiende desde los 17°29' hasta los 29°32' de latitud sur y 66°59' hasta los 71°31' de longitud oeste (Figura 1), y abarca una superficie de 260.324,4 km² (INE, 2013).

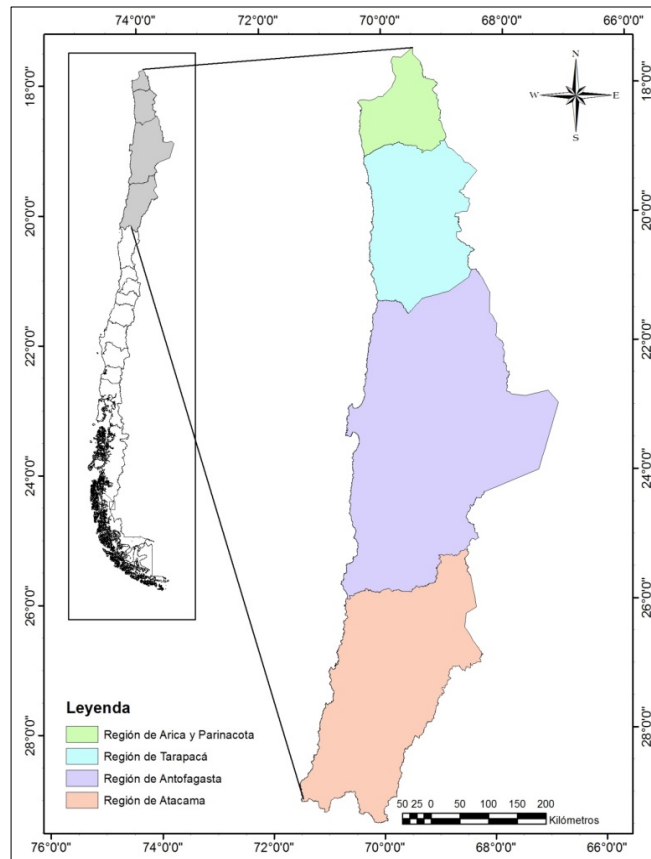


Figura 1. Área de estudio en UTM 19 Sur, Datum WGS 84. Incluye las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, con dimensión nacional como referencia. El área de estudio corresponde a cerca de un 30% del territorio nacional.

3.2 Metodología

El presente estudio se compuso de 4 secciones principales: el procesamiento de imágenes satelitales, la caracterización de la deforestación de formaciones leñosas, la identificación y proyección de motores de deforestación y la predicción del escenario de deforestación. A continuación se presenta la metodología utilizada en cada una de las secciones.

3.2.1 Procesamiento de imágenes satelitales

Se utilizaron en total 62 imágenes satelitales, 42 del sensor TM a bordo del satélite Landsat 5 y 20 del sensor OLI a bordo del satélite Landsat 8. El uso de imágenes provenientes de dos sensores se debió a la disponibilidad de imágenes en los años de interés. La misión Landsat 5 fue dada de baja el 5 de junio de 2013, pero dejó de estar operativo en noviembre del 2011.

La misión Landsat 8 fue lanzada el 11 de febrero de 2013, y tiene datos disponibles desde mayo del 2013 (USGS, 2014a). No se utilizaron imágenes del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) del satélite Landsat 7, ya que a partir del año 2003 sufre del fallo en su sistema Scan Line Corrector (SLC), lo que provoca un bandeo o efecto gaps en la imagen (USGS, 2013a).

Las imágenes utilizadas se fueron seleccionando tomando el mes de noviembre como prioridad, con el propósito de que no existiera alta presencia de nubes por efecto del invierno boliviano, y que se viera disminuido, si fuera el caso, el fenómeno del Desierto Florido. Se escogieron las escenas cuidando que tuvieran un bajo porcentaje de nubes, si no existía ninguna escena con esas condiciones en el mes de noviembre, se escogía la de la fecha más cercana, anterior o posterior, con bajo porcentaje de nubes, si la fecha se alejaba del mes de referencia, se escogieron dos escenas, con la finalidad de cubrir la zona con nubes que la escena principal no cubría (el Anexo 1 contiene el listado y detalle de las escenas utilizadas).

3.2.1.1 Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Cada escena se pre-procesó con 6 bandas del espectro electromagnético, las cuales abarcan una longitud de onda levemente diferente entre los sensores TM y OLI, el Cuadro 2 muestra las bandas utilizadas y las diferencias entre ellas.

Cuadro 2. Bandas utilizadas y su respectivo rango de longitud de onda según sensor y satélite.

Banda	Landsat 5 TM	Landsat 8 OLI
Azul	0,45 a 0,52	0,45 a 0,51
Verde	0,52 a 0,60	0,53 a 0,59
Roja	0,63 a 0,69	0,64 a 0,67
NIR	0,76 a 0,90	0,85 a 0,88
SWIR 1	1,55 a 1,75	1,57 a 1,65
SWIR 2	2,08 a 2,35	2,11 a 2,29

Fuente: Elaboración propia, en base a USGS (2014b).

A las imágenes se les realizó la extracción de las nubes presentes con la finalidad que no incurrieran en errores en el pre-procesamiento y/o en la clasificación equívoca de otra cubierta. Se estandarizó cada una de las escenas a través del pre-procesamiento, el cual consta de conversión a reflectividad (Chender *et al.*, 2009; USGS, 2013b), corrección atmosférica (Chavez, 1996) y corrección topográfica (Telliet *et al.*, 1982). Esto se realizó en base a lo

propuesto por Hantson *et al.* (2011), y permitió trabajar con escenas de diferentes fechas y *Path Row* (identificación única de ubicación geográfica de imágenes Landsat; ver Figura 2).

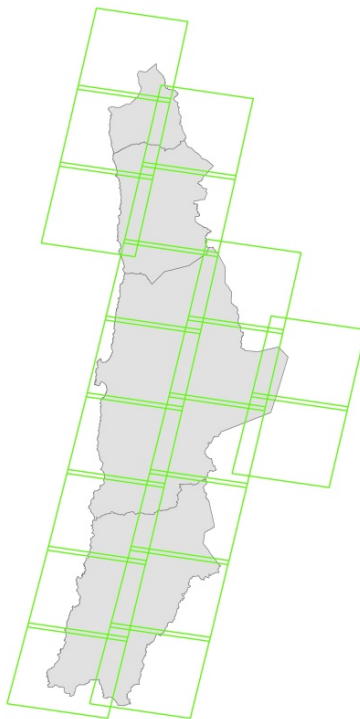


Figura 2. Red de 19 *Path Row* (identificación única de ubicación geográfica de imágenes de la misión Landsat), que cubren el área de estudio. Corresponden a las 19 escenas que se procesaron por cada año, para cubrir por completo el área de estudio.

Conversión a reflectividad

Las imágenes satelitales contienen la información para cada pixel en forma de Nivel Digital (ND), estos no tienen un significado en sí mismo, ya que es una forma de comprimir la información obtenida por el sensor, correspondiente a la reflectividad al tope de la atmósfera (Chuvieco, 2008). Si bien a estos valores se les puede dar una interpretación visual, es necesario convertirlos en una medida física e interpretable como radiancia, reflectancia o reflectividad, para procesar imágenes satelitales de diferentes lugares y fechas (Chuvieco, 2008).

Se utilizó el método planteado por Chender *et al.* (2009) para Landsat 5 (Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3).

$$\rho(k) = D \pi \frac{L_{\text{sen}(k)}}{E_{0(k)} \cdot \cos \theta}$$

Ecuación 1

Donde,

- $\rho(k)$: Reflectividad aparente de la cubierta en la banda k
 D : Factor corrector de la distancia Tierra-Sol, (Ecuación 2)
 $L_{\text{sen}(k)}$: Radiancia de la banda k $\left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m \cdot sr \cdot ND} \right]$, (Ecuación 3)
 $E_{0(k)}$: Irradiancia solar al tope de la atmósfera para la banda k $\left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right]$
 θ : Ángulo cenital solar [grados]

$$D = \left(1 + 0,0167 \left(\left(\sin \frac{2\pi(n - 93,5)}{365} \right) \right) \right)^2$$

Ecuación 2

Donde,

- D : Factor corrector de la distancia Tierra-Sol
 n : Día juliano en que fue obtenida la imagen

$$L_{\text{sen}(k)} = a_{0(k)} + a_{1(k)} + ND_{(k)}$$

Ecuación 3

Donde,

- $L_{\text{sen}(k)}$: Radiancia de la banda k $\left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m \cdot sr \cdot ND} \right]$
 $a_{0(k)}$ y $a_{1(k)}$: Coeficientes de calibración para la banda k
 $ND_{(k)}$: Niveles Digitales de la banda k

Para las escenas Landsat 8 se utilizó el método expuesto por USGS (2013b; Ecuación 4).

$$\rho(k) = M_{\rho} * ND_{(k)} + A_{\rho}$$

Ecuación 4

Donde,

- $\rho(k)$: Reflectividad aparente de la cubierta en la banda k
 $ND_{(k)}$: Nivel digital de la banda k
 M_{ρ} : Factor multiplicativo de re-escalamiento específico de cada banda
 A_{ρ} : Factor aditivo de re-escalamiento específico de cada banda

Corrección atmosférica

La corrección atmosférica consiste en eliminar el efecto de los componentes de la atmósfera los cuales poseen características de absorción y dispersión modificando los valores de reflectividad de las cubiertas (Chavez, 1996).

Existen diversos métodos de corrección atmosférica que pueden ser en base a datos de la propia imagen, datos de terreno, en base a imágenes de otro sensor o en base a modelos físicos (Chuvieco, 2008). Se utilizó el método propuesto por Chavez (1996), el cual utiliza datos de la propia imagen para la corrección, siendo el más simple ya que no requiere información adicional. Este método asume que los cuerpos de agua y/o las zonas de sombras deberían tener reflectividad cercana a cero, lo que en la práctica siempre es mayor, atribuyéndose esto al efecto de la atmósfera, por lo tanto, al restar el valor mínimo de reflectividad de la escena correspondiente a la del cuerpo de agua o zona de sombra, se estaría eliminando la influencia de la atmósfera.

Corrección topográfica

La reflectividad de la superficie terrestre se ve afectada en zonas con relieve debido al efecto de las sombras que se producen por el ángulo de elevación del sol en el momento en que se adquiere la imagen (Chuvieco, 2008).

Con el propósito de identificar el método más adecuado de corrección topográfica para el área de estudio, se realizaron tres pruebas en una escena utilizando los métodos del coseno y el método de corrección C, ambos propuestos por Teillet *et al.* (1982), este último con dos variantes; regresión en la escena completa y regresión en una zona con la misma proporción de sombra y luz en una misma cubierta.

Se calculó el ángulo de incidencia para ambos métodos, según la Ecuación 5, correspondiente a la imagen de iluminación (Chuvieco, 2008).

$$\cos \gamma_i = \cos \theta_i \cos \theta_p + \sin \theta_i \sin \theta_p \cos (\phi_a - \phi_o)$$

Ecuación 5

Donde,

$\cos \gamma_i$: Coseno del ángulo de incidencia del sol
θ_i	: Ángulo cenital solar [grados]
θ_p	: Pendiente del terreno [grados]
ϕ_a	: Ángulo acimutal solar [grados]
ϕ_o	: Ángulo de exposición del terreno con respecto al norte [grados]

El método del coseno se realizó según la Ecuación 6 (Teillet *et al.*, 1982).

$$\rho_{(h,i)} = \rho_{(i)} \left(\frac{\cos\theta}{\cos\gamma_i} \right)$$

Ecuación 6

Donde,

- $\rho_{(h,i)}$: Reflectividad en un píxel i en el terreno horizontal (h)
 $\rho_{(i)}$: Reflectividad en el píxel i en el terreno en pendiente
 θ : Ángulo cenital solar [grados]
 $\cos\gamma_i$: Coseno del ángulo de incidencia del sol

El método de corrección C , agrega una constante empírica propia de cada banda (Ecuación 7), la cual se obtiene a partir de los coeficientes de la regresión entre la banda k y la imagen de iluminación (Ecuación 8; Teillet *et al*, 1982).

$$C_k = \frac{b_k}{m_k}$$

Ecuación 7

Donde,

- C_k : Coeficiente C para la banda k
 b_k : Intercepto de la línea de regresión para la banda k
 m_k : Pendiente de la línea de regresión para la banda k

$$\rho_{(i)} = m_k \cos\gamma_i + b_k$$

Ecuación 8

Donde,

- $\rho_{(i)}$: Reflectividad en el píxel i en el terreno en pendiente
 $\cos\gamma_i$: Coseno del ángulo de incidencia del sol
 m_k : Pendiente de la línea de regresión para la banda k
 b_k : Intercepto de la línea de regresión para la banda k

Una vez obtenido la constante C se aplica la Ecuación 9, la cual otorga la corrección topográfica (Teillet *et al*, 1982).

$$\rho_{(h,i)} = \rho_{(i)} \left(\frac{\cos\theta + C_k}{\cos\gamma_i + C_k} \right)$$

Ecuación 9

Donde,

- $\rho_{(h,i)}$: Reflectividad en un píxel i en el terreno horizontal (h)
 $\rho_{(i)}$: Reflectividad en el píxel i en el terreno en pendiente
 θ : Ángulo cenital solar [grados]

$\cos\gamma_i$: Coseno del ángulo de incidencia del sol

Mosaico

En la última etapa del procesado se cortaron cada de una de las 62 escenas, con la forma del área de estudio y se eliminaron los bordes que vienen por defecto con valores nulos.

Con las escenas convertidas a reflectividad, corregidas atmosférica y topográficamente, sin valores nulos y con la forma del área de estudio, se realizó la combinación de las escenas por cada año, ajustando el histograma de una de ellas respecto a otra de referencia, tomando en cuenta solo el área de solape entre las imágenes, lo que después se aplicó a toda la imagen. Todo esto se realizó con la herramienta Mosaico del software ArcGis. De esta manera se obtuvieron los mosaicos con las imágenes satelitales para los años 2003, 2008 y 2013.

3.2.1.2 Identificación de coberturas

Las principales coberturas a identificar fueron bosque y matorral para estimar deforestación. Las otras coberturas presentes también se identificaron para detectar motores de deforestación. La identificación de las diferentes coberturas del área de estudio se realizó en dos partes; en primera instancia la identificación de la vegetación, mediante una zonificación con NDVI y clasificación supervisada, y en segunda instancia la identificación de las otras coberturas mediante clasificación supervisada e información complementaria correspondiente a las capas temáticas mencionadas en el ítem 3.1.

Identificación de vegetación

Debido a la magnitud del área de estudio (26.032.440 ha) y la dificultad que esto conlleva para el tratamiento de información digital, fue necesario extraer el área donde no es posible que exista vegetación. Para esto se realizó una zonificación utilizando NDVI (Ecuación 10), al cual se le determinó un valor umbral correspondiente al límite de NDVI desde donde no es posible que exista vegetación (Chuvieco, 2008; Castro *et al.*, 2014).

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Ecuación 10

Donde,

$NDVI$: Índice de vegetación de diferencia normalizada
 IRC : Banda del infrarrojo cercano
 R : Banda roja

Para identificar el valor umbral se realizó una inspección visual tomando como referencia valores utilizados en bibliografía, en lugares con características similares al área de estudio.

Se generó una máscara donde los valores válidos fueron aquellos píxeles que, en al menos uno de los tres años presentaran un valor de NDVI mayor o igual al valor umbral, mientras que los valores no válidos correspondieron a aquellos píxeles de NDVI con valores menores al valor umbral. Esta máscara se aplicó al mosaico pre-procesado de cada año.

La zonificación elimina el área donde no es probable encontrar vegetación, por lo tanto, restringe el área donde si es probable que se encuentre vegetación. Sin embargo en esta zonificación también quedan otras coberturas representadas. Para identificar las coberturas que quedaron dentro de la zonificación y separar de ellas las zonas con bosque y matorral, se realizó una clasificación supervisada, la cual consta de tres etapas:

- **Fase de entrenamiento:** corresponde a la definición digital de las coberturas y consiste en identificar áreas en las cuales se conozca la ubicación de estas.

Se utilizaron áreas de entrenamiento de coberturas representadas en la zonificación, estas se ubicaron espacialmente mediante la digitalización de polígonos en base a información proporcionada por CONAF, correspondiente a datos tomados en terreno. Estos se complementaron con fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución espacial de distintos años en el software Google Earth, imágenes satelitales de alta resolución BingMap de ArcGis y con el Catastro de Recursos Vegetacionales (Universidad Austral de Chile *et al.*, 1999).

El tamaño de cada área de entrenamiento se determinó en base a lo que propone Mather (1999), quién indica que se deben usar para cada cobertura al menos 30 píxeles por cada banda de la imagen satelital que se emplee en la clasificación supervisada.

Para evitar la auto-correlación espacial se priorizó la digitalización de varios polígonos pequeños ante la de uno o pocos polígonos grandes cuando fue posible, según recomienda Chuvieco (2008).

- **Fase de asignación:** corresponde a la agrupación de los píxeles de las imágenes en una de las coberturas, es decir, identificar los píxeles que cumplan con el mismo comportamiento espectral de las áreas de entrenamiento para agruparlos en la cobertura indicada.

La asignación de las coberturas a cada pixel se realizó mediante la Clasificación de Máxima probabilidad en ArcGis 10.1.

- **Comprobación y verificación de resultados:** Este trabajo no consideró esta etapa ya que no se contaba con datos de terreno para los años de estudio.

De la clasificación supervisada se rescataron las coberturas de vegetación leñosa correspondientes a bosque y matorral, para estimar sobre estas la deforestación.

Identificación de otras coberturas

Las coberturas a identificar se escogieron según las presentes en el área de estudio, tomando como referencia aquellas propuestas por Penman *et al.* (2003) y a las consideradas en el Catastro de Recursos Vegetacionales (Universidad Austral de Chile *et al.*, 1999).

De las coberturas obtenidas en base a clasificación supervisada, se escogieron aquellas que tuvieran un comportamiento coherente entre los años. Para esto se examinaron visualmente los resultados, comparándolos con imágenes satelitales de alta resolución y con información validada como el Inventario Nacional de Humedales 2012 (MMA y CEA, 2012), Catastro de Recursos Vegetacionales (Universidad Austral de Chile *et al.*, 1999) y otras capas temáticas mencionadas en el ítem 3.1.

Las coberturas presentes en el área de estudio que no fueron escogidas en base a clasificación supervisada, fueron obtenidas de catastros oficiales, capas temáticas, o estimación según correspondiera.

Las coberturas de nieve y agua se estimaron en base al Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI, por sus siglas en inglés; Ecuación 11), el cual si bien es un índice de agua también algunos autores como Riggs *et al.* (1994) lo utilizan para identificar nieve (Xu, 2006).

$$\text{MNDWI} = \frac{G - \text{IRM}}{G + \text{IRM}}$$

Ecuación 11

Donde,

MNDWI : Índice de agua diferencia normalizada modificado

G : Banda verde

IRM : Banda del infrarrojo medio

Riggs *et al.* (1994) proponen que dentro de lo que se identificó como nieve o agua, existe un valor umbral en la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano que diferencia lo que es agua de nieve, el cual se determinó por inspección visual complementado con imágenes satelitales de alta resolución.

Al tener identificadas las coberturas para los tres años se contabilizó la superficie cubierta por cada una de ellas y se obtuvo la Carta de Ocupación de Tierras (COT), incluyendo las formaciones leñosas.

3.2.2 Caracterización de la deforestación de las formaciones leñosas

La deforestación de formaciones leñosas se estimó para el período 2003-2008 y 2008-2013. Para esto se calculó el área de las coberturas de bosque y matorral obtenidas mediante clasificación supervisada, para los años 2003, 2008 y 2013. Se estimó la deforestación bruta, reforestación y la deforestación neta.

Se consideró deforestación bruta al total del área que perdió vegetación leñosa y se estimó mediante la Ecuación 12 (Angelsen *et al.*, 2009).

$$DB_p = A_2 - A_1$$

Ecuación 12

Donde,

DB_p : Deforestación bruta para el período p .
 A_1 : Área de cobertura en el tiempo 1
 A_2 : Área de cobertura en el tiempo 2

La reforestación corresponde a la ampliación de superficies de formaciones leñosas. La deforestación neta considera la deforestación bruta y la reforestación, y se estimó mediante la Ecuación 13 (Angelsen *et al.*, 2009).

$$DN_p = DB_p + R_p$$

Ecuación 13

Donde,

DN_p : Deforestación neta para el período p .
 DB_p : Deforestación bruta para el período p .
 R_p : Reforestación para el período p .

3.2.3 Identificación y proyección de motores de deforestación

Los motores de deforestación corresponden a actividades que causan directamente deforestación. Se consideró que si una actividad se realizaba en el área de estudio y además era causa de deforestación en algún lugar del mundo, esta no necesariamente constituía un motor de deforestación del área de estudio, ya que para ser a un motor de deforestación tiene que darse cierto dinamismo entre la actividad y las coberturas leñosas en el lugar.

La identificación de motores de deforestación se realizó de dos maneras: mediante revisión bibliográfica y mediante la identificación de coberturas diferentes de bosque y matorral, utilizando teledetección.

- **Revisión bibliográfica:**
 - ✓ 1. Identificación de motores de deforestación mediante la búsqueda de información bibliográfica.
 - ✓ 2. Identificación de motores de deforestación en el área de estudio, mediante la búsqueda de información bibliográfica de actividades realizadas en el norte de Chile, tomando como base los motores identificados en el paso 1. Se consideraron

aquellas actividades de importancia en términos de extensión y frecuencia, en concordancia con la magnitud y escala del área de estudio.

- **Identificación de coberturas:** de la COT obtenida según el ítem 3.2.1.2 (identificación de coberturas) del presente estudio, se estimó el cambio de uso de suelo con la finalidad de establecer una dinámica de reemplazo de alguna cubierta por sobre vegetación leñosa, identificando así, si correspondía a un motor de deforestación. Para esto se estimó un valor de cambio de uso de suelo, obtenido en base al cálculo pixel a pixel de la variación de una cobertura a otra.

La proyección de los motores de deforestación se realizó mediante la caracterización de su evolución histórica dentro del periodo de referencia (2003 a 2013), en base al cambio de uso de suelo (VCS, 2013a) y a revisión de los instrumentos de planificación territorial.

3.2.4 Predicción del escenario de deforestación en el período 2014-2113

Se realizaron dos escenarios de deforestación, como los propone la Verified Carbon Standar (VCS, 2013b), según la tendencia lineal histórica y el promedio anual histórico. Ambos métodos se pueden aplicar con datos de tres puntos de tiempo, con una separación mínima de tres años (VCS, 2013b).

3.2.4.1 Tendencia lineal histórica

Se realizó una regresión lineal tomando como variable independiente los años y como variable dependiente el total de área bruta deforestada para cada período de 5 años, dividido por 5, luego se estimó el área proyectada bruta de deforestación para el año t (Ecuación 14; VCS, 2013b).

$$A_t = m * t + b$$

Ecuación 14

Donde,

A_t	:	Área proyectada de línea base de formación leñosa bruta deforestada para el año t [ha]
m	:	Pendiente de la regresión entre la superficie anual bruta deforestada versus el tiempo [ha · año ⁻¹]
b	:	Constante de la regresión entre la superficie anual bruta deforestada versus el tiempo [ha]
t	:	Años transcurridos desde el inicio del período de referencia histórico (1, 2, 3...) [año]

3.2.4.2 Promedio anual histórico

Se estimó el área proyectada afectada por la deforestación bruta de las formaciones leñosas, dividiendo el total de área deforestada bruta en todo el período de referencia por el tiempo abarcado por el período de referencia (10 años; Ecuación 15; VCS, 2013b).

$$A_t = \frac{A_T}{T}$$

Ecuación 15

Donde,

- A_t : Área proyectada de línea base de formación leñosa bruta deforestada para el año t [ha]
- A_T : Área total afectada por la deforestación bruta de las formaciones leñosas durante el período de referencia histórico (T) [ha].
- T : Período de referencia histórico (1, 2, 3...) [año]

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesamiento de imágenes satelitales

Se utilizaron 62 imágenes satelitales, 42 imágenes del sensor TM a bordo del satélite Landsat 5 (USGSa, 2014) y 20 imágenes del sensor OLI a bordo del satélite Landsat 8 (USGSa, 2014). En la Figura 3, se muestran 19 escenas que abarcan la totalidad del área de estudio en el año 2008, correspondientes a escenas crudas (en ND) y sobrepuestas donde se aprecian nubes en el borde costero y los bordes de cada escena que debieron ser extraídos para ser pre-procesadas.

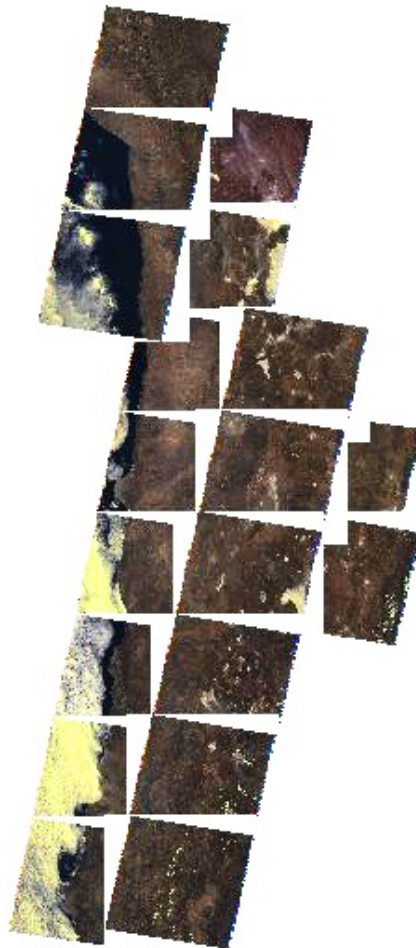
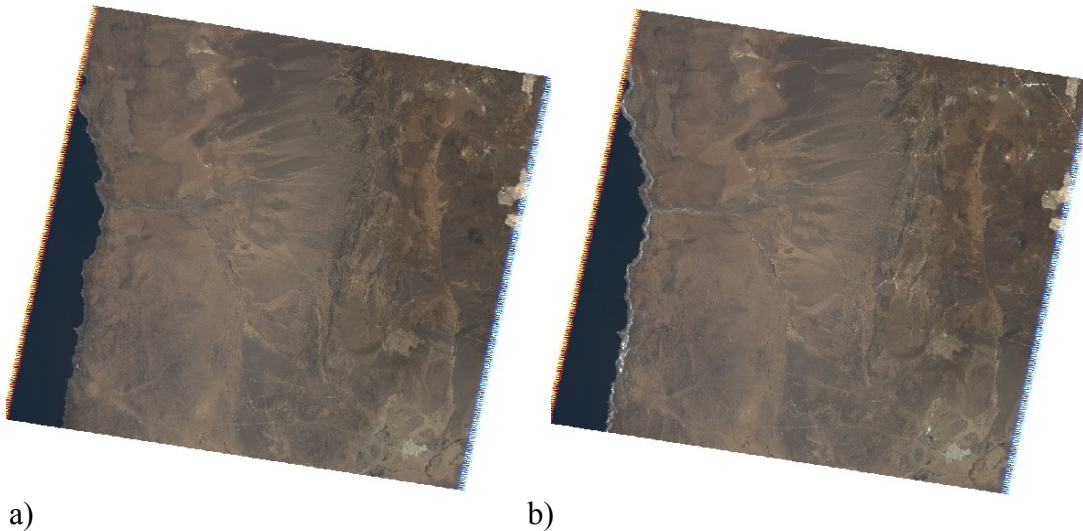


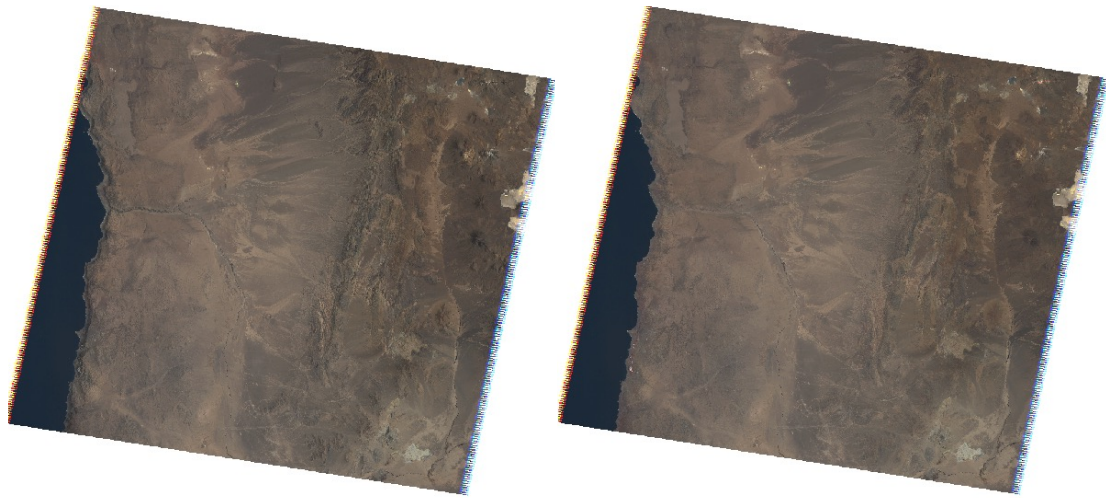
Figura 3. Imágenes satelitales crudas (en ND) en combinación de verdadero color, del año 2008, obtenidas por el sensor TM a bordo del satélite Landsat 5 (USGSa, 2014), sobrepuestas cubriendo el área de estudio, antes de ser pre-procesadas.

4.1.1 Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Se realizó la conversión de los valores de las imágenes satelitales crudas (ND), a valores de reflectancia mediante la calibración radiométrica. Se efectuó la corrección atmosférica eliminando el valor más bajo de la imagen al resto de ella, corrigiendo el efecto de la atmósfera sobre la imagen. Ambos procesos generan cambios en los valores de las escenas lo cuales no se pueden apreciar visualmente.

En la Figura 4 se muestra el resultado de las correcciones topográficas realizadas. En la imagen de entrada a las correcciones topográficas (a), se observa como las zonas montañosas y con relieve tienen sectores más oscuros correspondientes a la sombra dada por la elevación del sol, esto es lo que se busca corregir. En la imagen (b) correspondiente al método del Coseno, se observa como se sobreexpone la escena, es decir, aquellas zonas con presencia de sombra se les da valores de luminosidad sobredimensionados, contrarrestando con la sombra inicial y con el resto de la imagen. El método de corrección C con la regresión realizada en toda la escena (c) da resultados de mayor sombra que el método de corrección C con la regresión realizada en un polígono de sombra y luz (d), este último es el que mostró mejores resultados ya que atenúa las zonas con sombra y se puede apreciar la escena mas uniforme. El método aplicado en el procesamiento de todas las escenas fue el de corrección C con polígonos de sombra y luz.





- c)
 d)
 Figura 4. a) Escena con corrección atmosférica, utilizada como entrada a la corrección topográfica; b) Método del Coseno, se observa sobreexposición a la luz en zonas con relieve; c) Método de corrección C, con regresión en escena completa, se observa una corrección poco eficiente, se siguen apreciando zonas con sombras en relieves; d) Método de corrección C, con regresión en polígono de sombra y luz, se observa escena uniforme, eliminando el efecto de las sombras en zonas con relieve.

Mosaico

En la Figura 5 se presentan los mosaicos resultantes para los años 2003, 2008, 2013, se encuentran con la misma visualización para poder compararlos. En ellos se puede observar en ciertas escenas la disparidad de color, la cual no fue posible normalizar. El mosaico resultante para el año 2013, es el que muestra mayores diferencias entre las escenas del mismo año, y es posible apreciar escenas que presentan niveles de reflectividad más altos que los de las escenas contiguas. Estas diferencias no tienen mayor influencia en los resultados posteriores obtenidos en base al mosaico.

Se identificó que las imágenes satelitales del año 2008 se encontraban corridas en 5 píxeles aproximadamente con respecto a las imágenes satelitales de los años 2003 y 2013, esto debió ser corregido mediante una corrección geográfica, pero no se realizó debido a que se generaba un error mayor al georreferenciar un archivo de la extensión de los mosaicos generados (26.032.440 ha).

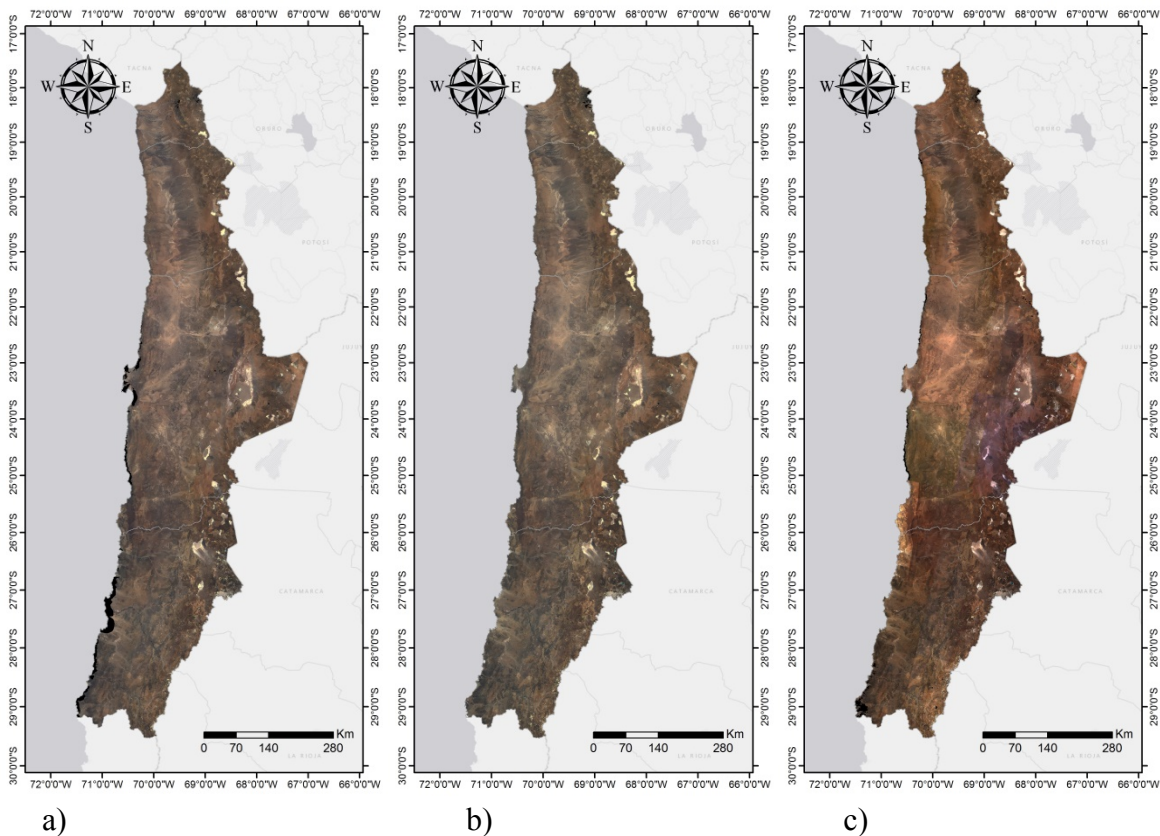


Figura 5. Mosaicos resultantes para los años a) 2003, b) 2008, c) 2013. En este último se puede observar la disparidad en los tonos de las escenas que componen el mosaico.

4.1.2 Identificación de coberturas

Identificación de vegetación

Se realizó una zonificación de la vegetación en base a valores de NDVI. Los valores umbrales de NDVI, fueron 0,1 para Landsat 5 (años 2003 y 2008) y 0,14 para Landsat 8 (año 2013). Todo los valores menores al valor umbral indican que no hay vegetación (Chuvieco, 2008; Castro *et al.*, 2014).

Fue necesario utilizar valores umbrales de NDVI diferentes para Landsat 5 y Landsat 8, debido a que se identificó que al utilizar el mismo valor umbral de Landsat 5 en Landsat 8, el área que quedaba dentro de la zonificación en Landsat 8 era mayor, y además se identificó vegetación en zonas donde se conoce que no existe vegetación (Figura 6).

Xu y Guo (2013) y Roy *et al.* (2016) observaron que en zonas con poca vegetación, por ende con menores niveles de NDVI, los valores de NDVI son más altos con Landsat 8 que con Landsat 7, y Landsat 7 es equivalente a Landsat 5, ya que cada banda abarca el mismo rango del espectro electromagnético, a diferencia del Landsat 8 que varía en micrómetros con los otros dos sensores mencionados (Cuadro 2; USGS, 2014b). Por lo tanto, utilizar diferentes

valores umbrales de NDVI esta acorde con lo que proponen Xu y Guo (2013) y Roy *et al.* (2016), ya que también aplica para Landsat 5 comparado con Landsat 8. Además, Ferral *et al.* (2013) al buscar un valor umbral para diferenciar tierra de agua, este fue diferente para Landsat 5 y Landsat 8, lo que confirma

En la Figura 6 se presenta el área resultante de la zonificación para los años de estudio, donde se aprecia que la zonificación por NDVI coincide a modo general para los tres años, luego se aplica la corrección del valor umbral para el año 2013.

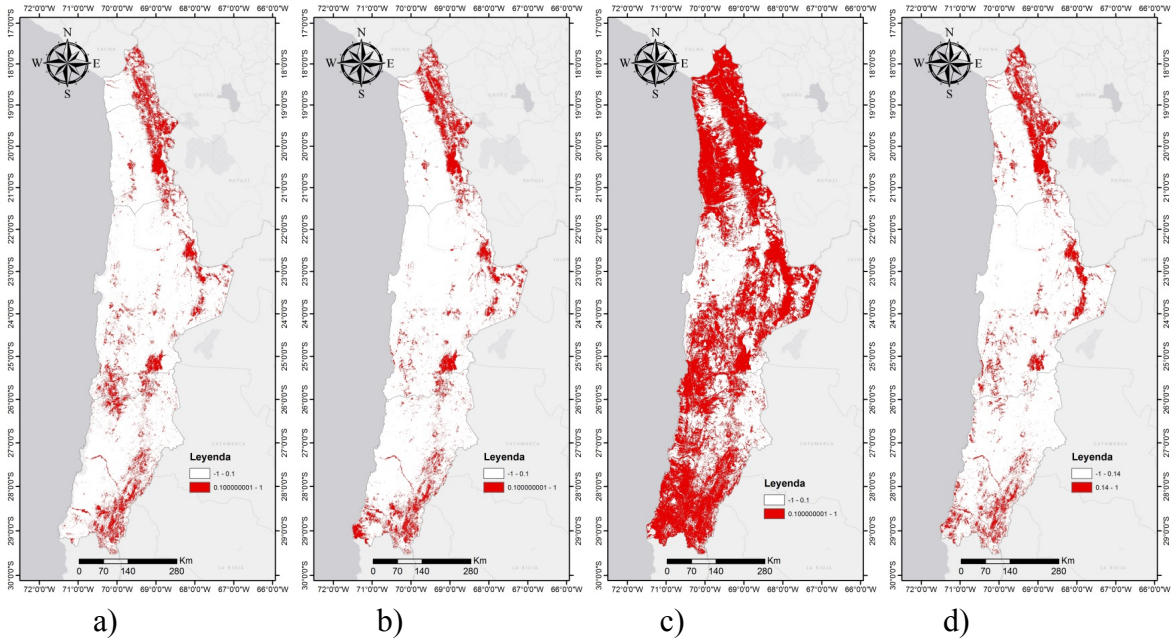
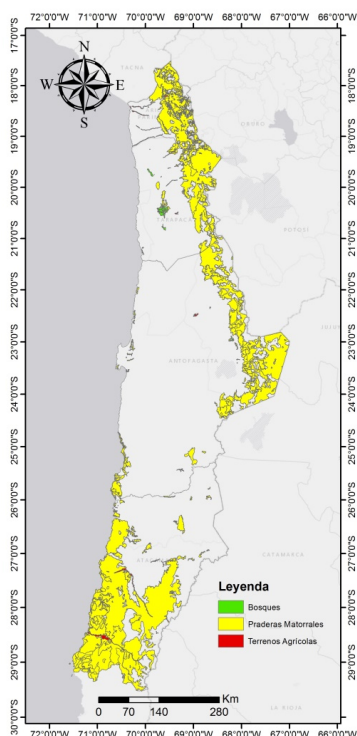


Figura 6. Mapas de zonificación utilizando NDVI; a) Año 2003, valor umbral NDVI 0,1; b) Año 2008, valor umbral NDVI 0,1; c) Año 2013, valor umbral NDVI 0,1; d) Año 2013, valor umbral NDVI 0,14. Se observa a modo general que la zonificación coincide espacialmente en los años de estudio, luego de aplicada la corrección del valor umbral en el año 2013.

Se puede observar en la Figura 7 que la distribución de las zonas probables donde exista vegetación (Figura 6) coincide con la distribución observada en el Catastro de Recursos Vegetacionales (Universidad Austral de Chile *et al.*, 1999), lo cual le da sustento al valor umbral utilizado para la zonificación usando NDVI.



Fuente: Universidad Austral de Chile *et al.* (1999)

Figura 7. Bosques, praderas matorrales y terrenos agrícolas en el Catastro de Recursos Vegetacionales del año 1997. Se puede observar que la distribución de la vegetación de interés coincide con la zonificación realizada con NDVI (Figura 6).

Las coberturas representadas en la zonificación con NDVI fueron agricultura, agua, bosque, humedal, matorral, salar y suelo desnudo. Se le agregó una cobertura de frutales que tiene comportamiento similar a bosque pero su uso es agrícola, por lo tanto, al unirse a una de las dos coberturas (bosque o agricultura) otorga resultados erróneos, por lo que se clasificó como cobertura frutales, y se sumó posteriormente a la cobertura de agricultura.

Para el caso de la cobertura humedal no se utilizó área de entrenamiento en la clasificación final, ya que al hacer pruebas de clasificación supervisada utilizando área de entrenamiento de humedal se obtenía información errónea, principalmente que la cobertura de bosque era identificada como humedal, probablemente por la poca densidad de la vegetación. Finalmente para esta cobertura se empleó el Inventario Nacional de Humedales del año 2012 (MMA y CEA, 2012).

En el Cuadro 3 se observa la superficie y cantidad de polígonos de las áreas de entrenamiento usados para cada cobertura. Se estimó el mínimo de píxeles para cada cobertura en 180, debido a la utilización de 6 bandas de la imagen satelital, cumpliendo con lo que Mather (1999) propone como el mínimo que se debe utilizar para conseguir resultados confiables.

Cuadro 3. Coberturas utilizadas para la clasificación supervisada, indicando número de polígonos, superficie y píxeles de las áreas de entrenamiento por cobertura.

Cobertura	Nº polígonos	Área (Ha)	Píxeles
Agricultura	30	1.155,89992	12.843,33246
Agua	2	216,388937	2.404,321519
Bosque	8	2.425,338460	26.948,205150
Frutales	2	105,467832	1.171,864800
Matorral	16	1.164,751890	12.941,687640
Salar	5	701,435393	7.793,726584
Suelo desnudo	10	9.032,817040	100.364,633700

En la Figura 8 se presentan las clasificaciones supervisadas resultantes para los años 2003, 2008 y 2013, según las áreas de entrenamiento utilizadas (Cuadro 3). De estas se rescataron las coberturas de bosque y matorral y sobre ellas se estimó la deforestación.

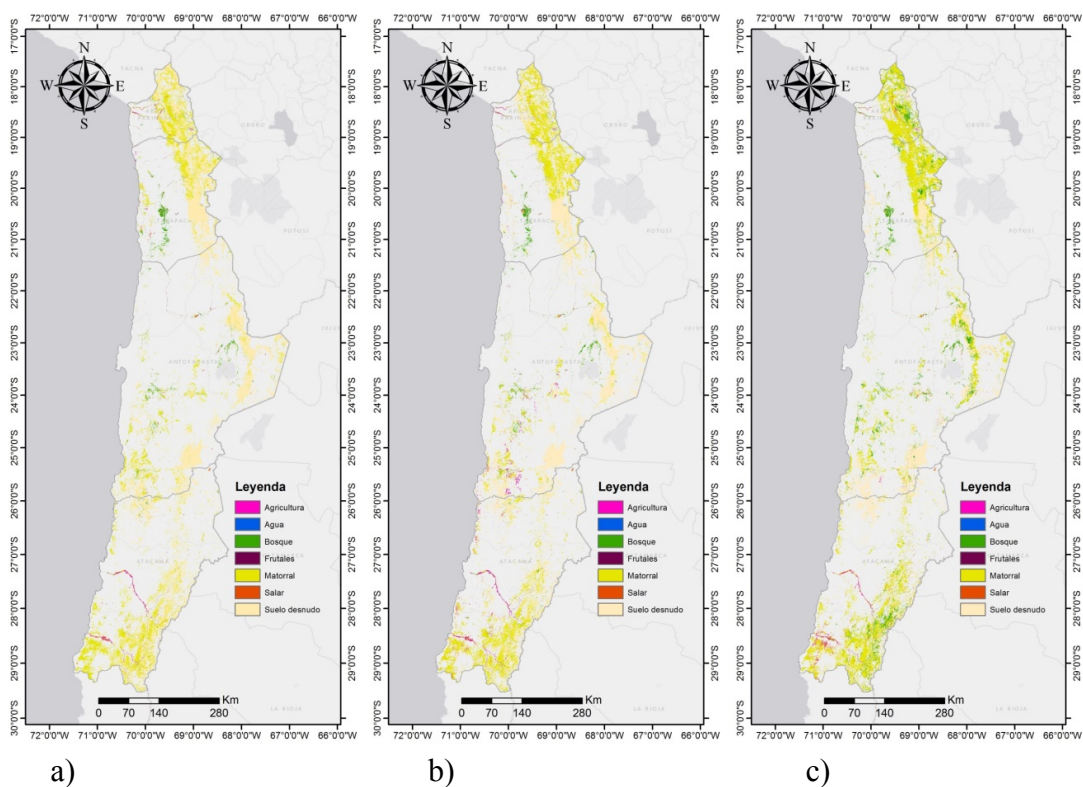


Figura 8. Clasificación supervisada en zonificación con NDVI, sin considerar las coberturas de cuerpos de agua ni salar, a) Año 2003; b) Año 2008; c) Año 2013.

Identificación de otras coberturas

Las coberturas salar, cuerpos de agua y suelo desnudo, que fueron obtenidas en la clasificación supervisada se encontraban dentro de la zonificación por NDVI, pero en el área de estudio total también existían otras zonas con esas coberturas, lo que no fue identificado por clasificación supervisada. Además, la clasificación supervisada entregó resultados incoherentes, como por ejemplo, que se clasificaban áreas urbanas en medio del suelo desnudo. Estos resultados respondían con grandes cambios a pequeñas modificaciones en las áreas de entrenamiento. Por lo anterior, se decidió rescatar de la clasificación supervisada las coberturas de bosque, agricultura y matorral, y descartar el resto por contener errores.

Los resultados obtenidos al analizar las coberturas sugirieron que para completar la COT debía utilizarse información oficial obtenida de las capas temáticas. Sin embargo, esta información no está disponible para cada año de estudio, por lo que se utilizaron como base las coberturas de salar, humedal y área urbana. Las dos últimas se consideraron invariables para los tres años. La cobertura de salar sí presentó variaciones ya que sobre esta se consideraron como prioritarias las coberturas de bosque, matorral y agricultura, al momento de unir las capas, y estas sí presentan variación en los años.

Las coberturas agua y nieve se definieron con el valor umbral de MNDWI de 0,3, donde todo valor mayor a este podría ser nieve o agua. Luego, de esa máscara se diferenció agua de nieve con los valores de reflectividad de la banda del infrarrojo cercano donde se identificó que todo valor mayor a 0,24 es nieve y menor o igual a 0,24 es agua (Riggs *et al.*, 1994; Xu, 2006).

El análisis de la información y los datos obtenidos permitió definir las siguientes coberturas, de las que se detalla su descripción y fuente:

- **Agricultura:** zonas destinadas a la producción agrícola, están incluidas áreas de cultivos frutales, cereales, horticultura y pasturas. Obtenido en base a clasificación supervisada.
- **Área no reconocida:** píxeles correspondientes a nubes o valores anómalos proveniente de las imágenes satelitales de los tres años.
- **Área urbana:** sectores ocupados por asentamientos humanos. Obtenido en base a límites urbanos de las comunas del área de estudio, en su defecto aquellos que no se encontraban disponibles en formato shape se digitalizaron con ayuda de Google Earth e imágenes de Bing Map.
- **Bosque:** ecosistema de origen natural o antrópico en el que predominan árboles de al menos 2 metros de altura y cobertura de copa de al menos un 10%. Obtenido en base a clasificación supervisada.

- **Cuerpo de agua:** río, lago, laguna o embalse no considerado en la cobertura de humedales. Obtenido en base a lo propuesto por Riggs *et al.* (1994) y Xu (2006).
- **Humedales:** variedad de hábitat tales como pantanos, turberas, llanuras, de inundación, ríos y lagos, y áreas costeras tales como marismas, manglares y praderas de pastos marinos, pero también arrecifes de coral y otras áreas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros, así como humedales artificiales tales como estanques de tratamiento de aguas residuales y embalses. Obtenido de Inventario Nacional de Humedales 2012 (MMA y CEA, 2012).
- **Matorral:** Tierras cubiertas por vegetación leñosa que no clasifica como bosque. Obtenido en base a clasificación supervisada.
- **Nieve:** Se incluye en esta categoría zonas cubiertas por nieve, nieves eternas, glaciares y campos de hielo. Obtenido en base a lo propuesto por Riggs *et al.* (1994) y Xu (2006).
- **Salar:** Lago superficial en el que se depositan sales, las que se acumulan por la mayor evaporación respecto a la entrada de agua a la cuenca. Obtenido en base a salares del Catastro de Recursos Vegetacionales (Universidad Austral de Chile *et al.*, 1999) y capa temática de Cuerpos de agua.
- **Suelo desnudo:** Cubierta que no corresponde a ninguna de las otras coberturas.

En la Figura 9 se presentan las COT para los años 2003, 2008 y 2013. Se puede apreciar que la superficie de bosque y matorral aumenta del año 2008 al 2013, principalmente en el área del altiplano, en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y la mitad inferior de la Cordillera de los Andes en Atacama. Se observa actividad agrícola en el límite de las regiones de Antofagasta y Atacama, desde el año 2008 la cual disminuye nuevamente al 2013.

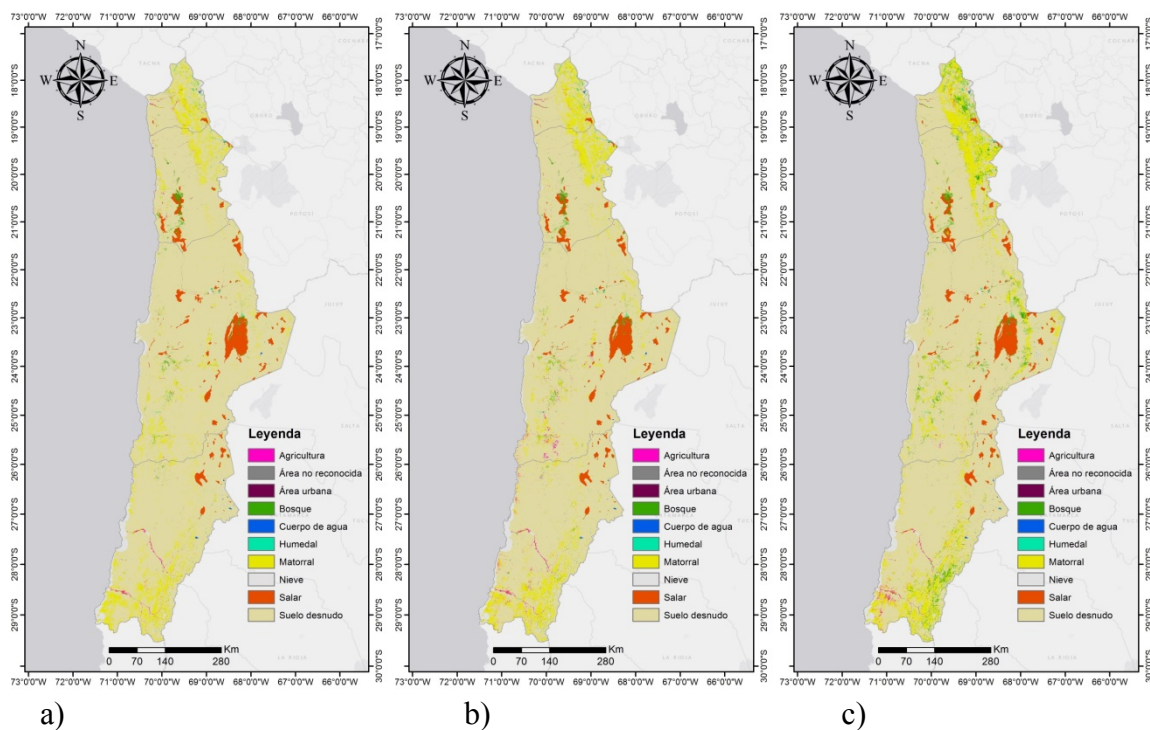


Figura 9. Carta de ocupación de tierras a) Año 2003; b) Año 2008; c) Año 2013.

4.2 Caracterización de la deforestación de las formaciones leñosas

La deforestación de formaciones leñosas se estimó para los períodos 2003-2008 y 2008-2013.

En el Cuadro 4 se muestran las superficies de vegetación para los años 2003, 2008 y 2013. Las coberturas de bosque y matorral presentan una tendencia al alza entre los años 2003 y 2013. La tendencia al alza en la cobertura de bosque, y matorral, coincide con las superficies reforestadas y forestadas entre los años de estudio (Cuadro 5). Sin embargo, los valores estimados por la clasificación supervisada son mil veces mayor a los plantados según CONAF (2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 y 2014). Esta diferencia puede deberse al cambio del sensor utilizado, las imágenes satelitales del año 2003 y 2008 pertenecen al Landsat 5 y las del año 2013 al Landsat 8. Aunque se aplicó un valor umbral distinto para ambos sensores, la diferencia del rango del espectro electromagnético abarcado por las bandas podría inducir a errores en la clasificación, utilizando las mismas áreas de entrenamiento. Las imágenes satelitales utilizadas en el año 2013, permiten identificar una cobertura de bosque que duplica a la existente al año 2008, lo que no resulta congruente con los programas estatales para el área de estudio en el período 2008-2013.

Cuadro 4. Superficie de bosque y matorral, en hectáreas y porcentaje para los años 2003, 2008 y 2013.

	Ha			%		
	2003	2008	2013	2003	2008	2013
Bosque	185.187	219.465	599.471	0,71	0,84	2,30
Matorral	1.867.437	2.006.986	2.708.520	7,17	7,71	10,40

Cuadro 5. Superficie de plantaciones forestales (forestación y reforestación), para las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, para los períodos 2004-2008 y 2009-2013, en hectáreas, según cifras oficiales de CONAF.

Período	Región de Arica y Parinacota	Región de Tarapacá	Región de Antofagasta	Región de Atacama	Total
2004-2008	55	138	293	1.040	1.526
2009-2013	104	12	103	293	512
Total	159	150	396	1.333	2.038

Fuente: Elaboración propia; en base a CONAF, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 y 2014.

En el Cuadro 6 se aprecian los cambios en la cobertura vegetal. Se observa que tanto para el período 2003-2008, como para el período 2008-2013 se perdió vegetación, pero más se reforestó. La deforestación neta es negativa, lo que significa que en concreto la superficie de ambas coberturas esta aumentando y no disminuyendo.

La pérdida bruta de matorral fue mayor que la de bosque para los períodos 2003-2008 y 2008-2013, representando un 2,21% y un 1,63% respectivamente, junto con un 0,29% y 0,35% para el período 2008-2013. En lo que respecta a reforestación, nuevamente el matorral presenta mayor porcentaje, con un 2,75% y un 4,32% respectivamente para ambos períodos, contrastado con un 0,42% y 1,81% de reforestación de bosque para ambos períodos respectivamente.

Cuadro 6. Cambios en la cobertura vegetal de formaciones leñosas, en hectáreas y porcentaje, para los períodos 2003-2008 y 2008-2013¹.

	Ha		%	
	2008-2003	2013-2008	2008-2003	2013-2008
Deforestación bruta bosque	75.903	91.200	-0,29	-0,35
Deforestación bruta matorral	577.338	424.480	-2,21	-1,63
Reforestación bosque	110.181	471.205	0,42	1,81
Reforestación matorral	716.898	1.126.003	2,75	4,32
Se mantiene como bosque	109.284	128.266	0,42	0,49
Se mantiene como matorral	1.290.089	1.582.506	4,95	6,07
Deforestación neta bosque	-34.279	-380.005	0,13	1,46
Deforestación neta matorral	-139.560	-701.523	0,54	2,69

4.3 Identificación y proyección de motores de deforestación

Para la identificación de motores mediante revisión bibliográfica se consideraron los motores de deforestación propuestos por Geist y Lambin (2001), presentados en el Cuadro 1. Se tomaron en cuenta solo los factores antrópicos y directos, no así los indirectos, por ejemplo la sequía, ya que este proviene de otras actividades antrópicas por ejemplo agricultura o minería, además por factores naturales como falta de lluvia.

Espinoza *et al.* (1991) identifica como un problema ambiental en la Región de Tarapacá la tala indiscriminada de tamarugos, aunque ya controlada por la aplicación del DL 701 (1974) con el funcionamiento de planes de manejo y la protección del tamarugo en la Reserva Nacional Pampa del Tamarugal. Para la Región de Atacama, Santander (2003) señala que la tala fue una actividad de mayor importancia en el pasado debido al uso de la leña como combustible para satisfacer la creciente industria minera, sin embargo actualmente persiste este uso en la pequeña minería de lo cual existen escasas estadísticas (Morales, 2005). Por lo tanto la tala es considerada como motor de deforestación (CONAMA y DGA, 2009). Sin embargo, no se encontró información de tala comercial para las regiones de Arica y Parinacota, y Antofagasta.

¹ Los valores de deforestación positivos indican pérdida de cobertura vegetal. Los valores de deforestación negativos indican aumento de cobertura vegetal.

La extracción de madera esta considerada como un motor de deforestación presente en toda el área de estudio (Orellana, 2013; Orrego *et al.*, 2013; Morales, 2012; Orrego, 2011; CONAMA y DGA, 2009; Muñoz y Serra, 2006; Espinoza *et al.*, 1991). Si bien las comunidades indígenas extraen madera desde hace cientos de años, es con los nuevos patrones de manejo de recursos introducidos tras la colonización europea que se genera una sobre explotación de las poblaciones de árboles y arbustos nativos, especialmente asociado a la actividad minera, la construcción y cocina (Camus, 2004; Marquet *et al.*, 1998). En la actualidad la extracción de madera se realiza principalmente con fines energéticos (uso como combustible), también se tiene evidencia del uso medicinal, religioso, estético (como tinte de fibras textiles), entre otros (Orrego *et al.*, 2013; Morales, 2012; Orrego, 2011). Algunos de los géneros afectados por esta actividad son *Prosopis*, *Polylepis*, *Azorella*, *Geofroea*, *Berberis*, entre otros (Orrego *et al.*, 2013; Marquet *et al.*, 1998).

Con respecto a otras actividades realizadas en el área de estudio, no se encontró información suficiente para considerarlas como motor de deforestación en el norte de Chile.

La escasa información de motores de deforestación en zonas áridas, así como en el norte de Chile, es una desventaja a la hora de querer enfocar esfuerzos en controlar dichas actividades. Aunque, la realidad actual del norte de Chile, no es la pérdida abrumadora de superficie de bosque y matorral, cualquier lugar donde esta se encuentre requiere de medidas para asegurar su supervivencia, principalmente por la escasa presencia y densidad y debido su importancia en los procesos ecosistémicos. La proyección del comportamiento de los motores de deforestación también se hace difícil debido a su escasa información, sobre todo, debido a que no se cuenta con datos históricos ni del presente de dichas actividades.

En el Cuadro 7 y Cuadro 8, se presentan los cambios de uso de suelo correspondiente al cambio de una cobertura a otra, los datos que se encuentran marcados en naranja claro corresponden a valores que varían en algún porcentaje distinto de cero.

Entre el año 2003 y el año 2008, la pérdida de superficie de bosque fue principalmente debido al crecimiento de matorral con un 0,153%, luego con la transformación a suelo desnudo con un 0,096%, posteriormente por la expansión de la agricultura con un 0,034%, y finalmente con la transformación a salar con un 0,006%. Con respecto a la pérdida de superficie de matorral, un 1,551% se transformó en suelo desnudo, un 0,399% en agricultura, un 0,247% a bosque, un 0,005% a salar, un 0,002% a nieve y un 0,001% a cuerpos de agua.

Entre el año 2008 y el 2013, la pérdida de superficie de bosque fue principalmente debido al crecimiento de matorral con un 0,236%, luego por la transformación a suelo desnudo con un 0,067%, luego por la expansión de la agricultura con un 0,025%, luego un 0,017% se transformó en salar y finalmente un 0,001% a nieve. Con respecto a la pérdida de superficie de matorral, un 0,939% se transformó en bosque, un 0,472% se convirtió en suelo desnudo, un 0,201% en agricultura, un 0,008% a salar, y finalmente un 0,004% a nieve.

Si bien la principal cobertura que reemplaza al bosque, es matorral, y también se presenta en mayores porcentajes el reemplazo de matorral por bosque, esto no se considera deforestación ya que sigue siendo cobertura leñosa.

El cambio de bosque y matorral a suelo desnudo se presenta en ambos periodos, sin embargo, se desconoce la causa de la transformación, por lo que no se puede considerar como un motor de deforestación. El cambio de las coberturas leñosas a salar, nieve y cuerpos de agua también esta presente, lo que tampoco se considera como motor de deforestación ya que son causas naturales.

Con respecto a la agricultura, si se considera como motor de deforestación, ya que es una actividad antrópica, que reemplaza las coberturas leñosas por tierras de cultivo. La expansión de áreas urbanas se consideró como un potencial motor de deforestación, sin embargo, no se pudo confirmar como tal, ya que se asumió como una superficie sin cambios para los 3 años.

Cuadro 7. Cambio de uso de suelo del año 2003 al 2008, en porcentaje. Se entiende como el porcentaje de la cobertura en el año 2003 que pasó a ser otra cobertura en el año 2008.

2003/2008	Agricultura	Área no reconocida	Área urbana	Bosque	Cuerpo de agua	Humedal	Matorral	Nieve	Salar	Suelo desnudo
Agricultura	0,144	0,000	0,000	0,045	0,000	0,000	0,099	0,000	0,001	0,051
Área no reconocida	0,000	1,591	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Área urbana	0,000	0,000	0,104	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Bosque	0,034	0,000	0,000	0,418	0,000	0,000	0,153	0,000	0,006	0,096
Cuerpo de agua	0,000	0,000	0,000	0,000	0,042	0,000	0,001	0,002	0,000	0,025
Humedal	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,208	0,000	0,000	0,000	0,000
Matorral	0,399	0,000	0,000	0,247	0,001	0,000	4,942	0,002	0,005	1,551
Nieve	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	0,001	0,031	0,000	0,070
Salar	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,009	0,000	3,509	0,000
Suelo desnudo	0,032	0,000	0,000	0,111	0,021	0,000	2,482	0,058	0,000	83,491

Cuadro 8. Cambio de uso de suelo del año 2008 al 2013, en porcentaje. Se entiende como el porcentaje de la cobertura en el año 2008 que pasó a ser otra cobertura en el año 2013.

2008/2013	Agricultura	Área no reconocida	Área urbana	Bosque	Cuerpo de agua	Humedal	Matorral	Nieve	Salar	Suelo desnudo
Agricultura	0,127	0,000	0,000	0,083	0,000	0,000	0,301	0,001	0,001	0,097
Área no reconocida	0,000	1,591	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Área urbana	0,000	0,000	0,104	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Bosque	0,025	0,000	0,000	0,491	0,000	0,000	0,236	0,001	0,017	0,067
Cuerpo de agua	0,000	0,000	0,000	0,000	0,034	0,000	0,002	0,002	0,000	0,028
Humedal	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,208	0,000	0,000	0,000	0,000
Matorral	0,201	0,000	0,000	0,939	0,000	0,000	6,063	0,004	0,008	0,472
Nieve	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	0,002	0,032	0,000	0,055
Salar	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,016	0,000	3,495	0,000
Suelo desnudo	0,052	0,000	0,000	0,770	0,026	0,000	3,750	0,172	0,000	80,514

El estudio realizado permitió identificar los siguientes motores de deforestación en el área en el norte de Chile:

- Tala
- Extracción de madera
- Agricultura

No se encontraron cifras oficiales de tala y extracción de leña que puedan servir para la proyección de esos motores. Con respecto a la agricultura, se puede apreciar que el porcentaje de cambio de formaciones leñosas a agricultura, disminuyó en ambos periodos para bosque y matorral. En el Cuadro 9 se muestra la superficie de agricultura para los tres años, al 2008 aumentó la superficie, pero al año 2013 disminuyó, sin embargo se mantiene al alza al compararlo con el año 2003.

Cuadro 9. Superficie de agricultura en los años 2003, 2008 y 2013. En hectáreas y porcentaje.

Año	Ha	%
2003	88.510	0,34
2008	158.798	0,61
2013	106.733	0,41

Las Estrategias Regionales de Desarrollo (ERD), para las 4 regiones del área de estudio, mencionan a la agricultura en sus lineamientos estratégicos, fomentando su innovación tecnológica, agregando valor a la actual agricultura, diversificación, optimización de espacios y recursos, entre otros, no priorizando necesariamente la expansión territorial de ésta (GORE Atacama, 2007; GORE Antofagasta, 2009; GORE Arica y Parinacota, 2009; GORE Tarapacá, 2011).

A modo de proyección de los motores de deforestación se puede mencionar que la superficie de agricultura tiene una leve tendencia al alza, sin embargo, los instrumentos de desarrollo regionales no propician su expansión en áreas con matorral o agricultura, se podría entender que si bien la agricultura es una actividad creciente, esta podría ir desarrollándose en lugares con suelo desnudo y no fomentando así la deforestación. Por lo tanto, si bien la agricultura ha sido un motor de deforestación (como lo demuestra el cambio de uso de suelo en ambos periodos de estudio), se espera que en los próximos años no represente una importante actividad que reemplace el uso del suelo de formaciones leñosas.

4.4 Predicción del escenario de deforestación en el período 2014-2113

La predicción del escenario de deforestación para el período 2014-2113, se realizó con los datos de deforestación bruta de bosque y matorral.

La regresión lineal obtenida según el método de tendencia lineal histórica, resultó con una pendiente positiva para bosque, y negativa para matorral, ambas con un coeficiente de correlación (r^2) de 0,76, lo cual está por sobre el mínimo de 0,75 que la VCS (2013b) considera como significativo. La Ecuación 16 y Ecuación 17 presentan el resultado de regresión lineal para bosque y matorral respectivamente.

$$A_t = 463,55 * t + 14161$$

Ecuación 16

$$A_t = -4632,1 * t + 125658$$

Ecuación 17

Donde,

A_t : Área proyectada de formación leñosa bruta deforestada al año t [ha]
 t : Año a estimar [año]

La tasa de deforestación anual obtenida según el método del promedio histórico anual, resultó ser de 16.710,3 ha/año para bosque, y 100.181,8 ha/año para matorral.

En la Figura 10 y Figura 11 se muestra la superficie de bosque y matorral deforestada acumulada, respectivamente, para el período 2014-2113, con el método de tendencia lineal histórica y el promedio anual histórico (el Anexo 2 contiene los datos). En ambos se muestra la superficie de la formación leñosa en el año 2013.

Esta predicción, en el escenario que no se considera la posible reforestación o crecimiento de formaciones leñosas, proyecta que la superficie de bosque se terminaría el año 2031 según el método tendencial y para el año 2038 según promedio anual histórico. Mientras que la superficie de matorral se acabaría al año 2025 según el método tendencial y para el año 2030 según el promedio anual histórico.

Se considera que los escenarios obtenidos con el método de tendencia lineal histórica sobreestiman los valores de deforestación, siendo el promedio anual histórico el más conservador, ya que tiene una pendiente menos pronunciada, y una deforestación menos acelerada, lo que se considera más aceptable para este estudio. Se debe considerar que los resultados fueron obtenidos en base a los datos de deforestación bruta sin considerar los valores de crecimiento de bosque y matorral, si estos se hubiesen considerado no se obtendrían valores de una deforestación total en el área de estudio, ya que como lo muestra el Cuadro 6, los valores de reforestación son mayores a los de deforestación, lo que resulta en una deforestación neta negativa, es decir, sin pérdida de cobertura vegetal.

Figura 10. Superficie de bosque deforestada acumulada para el período 2014-2113 (ha)

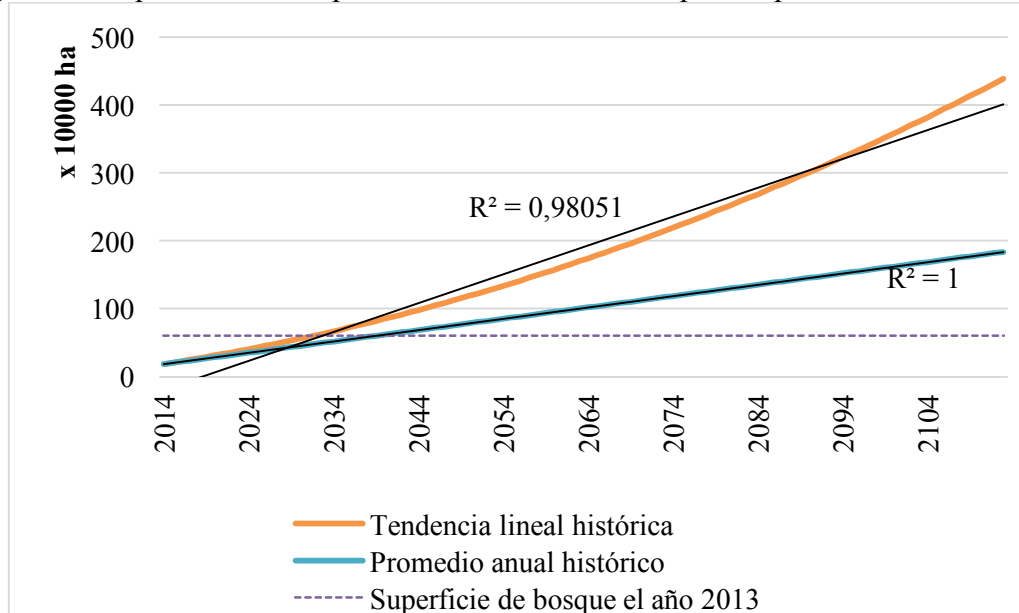
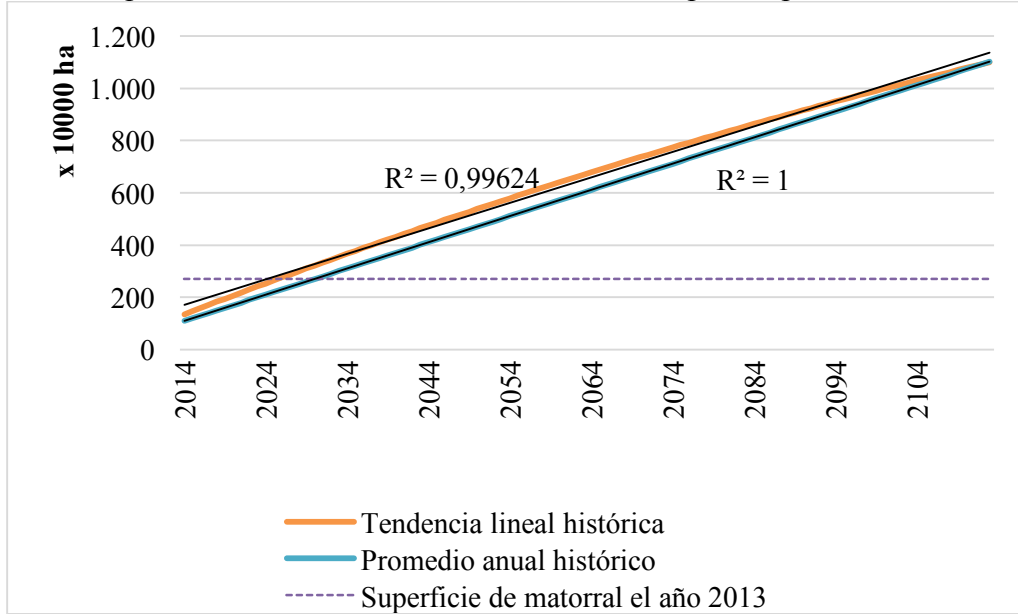


Figura 11. Superficie de matorral deforestada acumulada para el período 2014-2113 (ha)



Es preciso mencionar que si bien la metodología propuesta por VCS (2013b) permite establecer una tendencia con 3 años, su proyección a 100 años es sólo referencial; para contar con datos más concluyentes se deberían utilizar mayor cantidad de datos al establecer la regresión y la tasa de deforestación, incorporando también otras variables que pudieran afectar el estado fenológico de las formaciones leñosas, por ejemplo, temperatura, precipitaciones, etc., así se cuenta con un mejor sustento estadístico al realizar la proyección.

5 CONCLUSIONES

La metodología desarrollada para construir el escenario de deforestación de formaciones leñosas entre los años 2003-2013, y entre los años 2014-2113, para el norte de Chile, constituye una aproximación a la caracterización del estado del bosque y matorral y su evolución pasada y futura, considerando las principales causas de su deforestación.

La formaciones leñosas del norte de Chile están constituidas principalmente por matorral y en menor medida por bosque. Entre el año 2003 y 2013 la superficie de ambas coberturas tuvo una tendencia al alza, lo que coincide con las iniciativas de reforestación de la CONAF.

En el norte de Chile se produjo una deforestación bruta tanto para bosques como matorrales, pero los procesos de reforestación han sido mayores que la pérdida de formaciones leñosas. Por lo tanto, la deforestación de las formaciones leñosas en el norte de Chile no es una realidad vigente en términos netos, debido a que las iniciativas de forestación en el país revierten los procesos de pérdida de superficie de bosque y matorral, sin embargo, no hay que dejar de tener en cuenta que si esta perdiendo vegetación leñosa.

La tala, la extracción de madera y la agricultura, son motores de deforestación en el norte de Chile, específicamente la tala en las regiones de Tarapacá y Atacama, y la extracción de madera y agricultura en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. Si bien son actividades que se desarrollan a micro escala, es necesario su control, principalmente de las dos primeras. Con respecto a la agricultura y su proyección, es una actividad de desarrollo potencial en el norte de Chile, sin embargo se debe tener especial cuidado que esta no se desarrolle sobre superficies actuales de bosque y matorral, los que si bien se encuentran en lugares potenciales para el desarrollo de la agricultura, el uso y desarrollo de tecnología para poder realizar agricultura en otras zonas, tal como lo proyectan las Estrategias Regionales de Desarrollo, es una herramienta que se debe considerar para no propiciar la deforestación.

Se estimó que para el año 2040 la deforestación alcanzará a la totalidad de superficie cubierta con formaciones leñosas obtenidas al año 2013, sin considerar las superficies reforestadas. Es por esto la relevancia de la protección de los bosques y matorrales existentes, considerando su importancia para la mantención de la biodiversidad y los ciclos de la tierra, manteniendo presente que su pérdida total es una realidad probable.

6 BIBLIOGRAFÍA

Aguayo, M; A. Pauchard; G. Azócar y O. Parra. 2009. Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. [en línea]. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82: 361-374. Recuperado en: <http://www2.udec.cl/~pauchard/Aguayo_et_al_2009.pdf> Consultado el: 21 de octubre de 2014.

Angelsen, A. y D. Kaimowitz. 1999, feb. Rethinking the Causes of Deforestation: Lessons from Economic Models. *The World Bank Research Observer*, 14: 73-98.

Angelsen, A; S. Brown; C. Loisel; L. Peskett; C. Streck y D. Zarin. 2009. Reducción de Emisiones de la deforestación y la degradación de bosques (REDD): reporte de evaluación de opciones. Washington, Estados Unidos: Meridian Institute. 108p.

Arriaga, V. 2012. Reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques (REDD+) en los países de América Latina: requerimientos institucionales y jurídicos para su implementación. Santiago, Chile: DDSAH; CEPAL. 175p.

Camus, P. 2004. Los bosques y la minería del Norte Chico, S. XIX: Un mito en la representación del paisaje chileno. *Historia (Santiago)*, 37: 289-310.

Castro, C; A. Montaña; C. Pattillo y A. Zúñiga. 2014, may. Detección del área con desierto florido en el territorio del Mar de Dunas de Atacama, mediante percepción remota. *Revista de geografía Norte Grande*, 57: 103-121. Recuperado en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022014000100008&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-34022014000100008> Consultado el: 15 de septiembre de 2014.

Cenamo, M.; A. Garzón; M. Pavan; M. Sandoval y M. Stern. Nov-2011. Análisis de REDD+ en ocho países de la Cuenca Amazónica. Articulación Regional Amazónica.

CEA (Centro de Estudios Agrarios y Ambientales). 2014. Glosario de términos. [en línea]. Chile: CEA Ediciones. Recuperado en: <<http://www.ceachile.cl/bosquenativo/glosario.htm>> Consultado el 10 de septiembre de 2014.

Centro Geo. 2010. Modelo de análisis tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el suelo de conservación del distrito federal. México: PAOT. 223p.

Chander, G; B. Markham y D. Helder. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MMS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensor. *Remote Sensing of Environment*. 113 (2009): 893-903.

Chavez, P. 1996, Sep. Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62 (9): 1025-1036.

Chuvieco, E. 2008. Teledetección Ambiental. 3º ed. Barcelona, España: Editorial Ariel S.A. 595p.

CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático). (7º, 29 de octubre a 10 de noviembre de 2001, Marrakech, Marruecos). 2002. Informe de la conferencia de las partes sobre su séptimo período de sesiones, celebrado en Marrakech del 29 de octubre al 10 de noviembre de 2001. [en línea]. Marrakech , Marruecos: Naciones Unidas. 73p. Recuperado en: < <http://unfccc.int/resource/docs/spanish/cop7/cp713a01s.pdf>> Consultado el 7 de septiembre de 2014.

CONAF (Corporación Nacional Forestal), Chile y CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente), Chile. 1995. Manual de Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile 1995. Chile. 53p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2005. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2004, Informe Técnico 2005. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2006. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2005, Informe Técnico 2006. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2007. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2006, Informe Técnico 2007. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2008. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2007, Informe Técnico 2008. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2009. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2008, Informe Técnico 2009. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2010. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2009, Informe Técnico 2010. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2011. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2010, Informe Técnico 2011. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2012. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2011, Informe Técnico 2012. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2013. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2012, Informe Técnico 2013. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2014. Plantaciones forestales efectuadas durante el año 2013, Informe Técnico 2014. Santiago, Chile: Gerencia de Fomento y Desarrollo Forestal, Departamento de Plantaciones Forestales.

CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente), Chile y DGA (Dirección General de Aguas), Chile. 2009. Plan de gestión para la cuenca del Río Copiapó: Estrategia Nacional de Gestión Integradas de Cuencas Hidrográficas. Chile: CONAMA y DGA. 178p.

Del Pozo, S. 2013. Historia de los bosques naturales y forestales de Chile. Chile. 90p.

DL 701. Decreto Ley 701: Fija régimen legal de los terrenos forestales o preferentemente aptos para la forestación, y establece normas de fomento sobre la materia. [en línea]. 15 de octubre de 1974. Santiago, Chile: 28 de octubre 1974. Recuperado en: <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=6294>> Consultado el: 27 de noviembre de 2014.

Di Castri, F. y E. Hajek. 1976. Bioclimatología de Chile. Santiago, Chile: Imprenta Editorial de la Universidad Católica de Chile. 128p.

Espinoza, G.; P. Gross y E. Hajek. 1991. Problemas Ambientales de Chile. [en línea]. Santiago, Chile: CONAMA. Recuperado en: <<http://www.ecolyma.cl/documentos/Problemas-ambientales-de-Chile-1990-1.pdf>> Consultado el: 22 de diciembre de 2014.

FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura). 2001. Causas y Tendencias de la Deforestación en América Latina: Documento de Trabajo 52. Programa de Evaluación de los Recursos Forestales. Roma, Italia: Departamento de Montes, FAO. 91p.

FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura). 2005. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. Chile: Informe Nacional 156. Roma, Italia: Departamento Forestal de la FAO. 59 p.

FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura). 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal 163. Roma, Italia: Departamento de Montes, FAO. 381p.

FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura). 2011. Situación de los bosques del mundo 2011. Roma, Italia: FAO. 176p.

FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura). 2012. El estado de los bosques del mundo. Roma, Italia: FAO. 50p.

Ferral, A.; A. Aleksinkó; E. Plomer; A. Orueta; N. Cossano; I. Bernasconi; *et al.* 2013. Detección de cambios temporales de superficie inundada en la zona de la Laguna de Mar Chiquita mediante imágenes satelitales. (pp. 44 - 53). En: Congreso Internacional de Ambiente y Energías Renovables, I Jornada Nacional de Biomasa (3ª).

Franquis, F. y A. Infante. 2003. Los Bosques y su importancia para el suministro de servicios ambientales. *For. Lat.*, 34:17-20.

Gajardo, R. 1994. La vegetación natural de Chile. Santiago, Chile: Editorial Universitaria. 143p.

Geist H. and E. Lambin. 2001. What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence. LUCR Report Series No.4. Belgica: University of Louvain. 116p.

Gobierno Regional de Antofagasta (GORE Antofagasta). 2009. Estrategia Regional de Desarrollo 2009-2020, Participa, imagina, construye. Antofagasta, Chile: GORE Antofagasta. 119 pp.

Gobierno Regional de Arica y Parinacota (GORE Arica y Parinacota). 2009. Estrategia Regional de Desarrollo, Región de Arica y Parinacota, Diversidad, Historia, Integración, Cultura, Turismo, Unidad. 2009. Arica y Parinacota, Chile: GORE Arica y Parinacota. 69 pp.

Gobierno Regional de Atacama (GORE Atacama). 2007. Estrategia Regional de Desarrollo de Atacama 2007-2017. Atacama, Chile: GORE Atacama. 89 pp.

Gobierno Regional de Tarapacá (GORE Tarapacá). 2011. Estrategia Regional de Desarrollo Región de Tarapacá 2011-2020. Tarapacá, Chile: GORE Tarapacá. 80 pp.

Gutiérrez, J y F. Squeo. 2004, ene. Importancia de los arbustos en los ecosistemas semiáridos de Chile. *Ecosistemas*, 13 (1): 36-45.

Hantson, S.; E. Chuvieco; X. Pons; C. Domingo; C. Cea; G. Moré. *et al.* 2011, Oct. Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36:51-61.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2006. Compendio estadístico 2006. [en línea]. Recuperado en: <http://www.ine.cl/canales/publicaciones/compendio_estadistico/pdf/2006/compendio2006.pdf> Consultado el: 02 de octubre de 2014.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2013. Compendio Estadístico 2013 [en línea]. Recuperado en: <http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/COMPENDIO_2013.pdf> Consultado el: 26 de septiembre de 2014.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2000, may. Resumen para responsables de políticas. Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura: Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC. Canadá: IPCC. 30p.

Juliá, C.; S. Montecinos y A. Maldonado. 2008. Características Climáticas de la Región de Atacama (cap 3, 25-42). En: Squeo, F.A.; G. Arancio y J.R. Gutiérrez (Eds). Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena.

Kanninen, M.; D. Murdiyarso; F. Seymour; A. Angelsen; S. Wunder y L. German. 2007. ¿Crecen los árboles sobre el dinero? Implicaciones de la investigación sobre deforestación en las medidas para promover la REDD. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR). 62p.

Leith H. and R. Whittaker. 1975. Primary productivity of the biosphere. Ecological Studies. New York. v.14., 10p.

Ley N° 20.283. Ley sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal. [en línea]. 11 de julio de 2008. Santiago, Chile: 30 de julio 2008. Recuperado en: <<http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=274894>> Consultado el: 30 de noviembre de 2014.

Luebert, F. y P. Pliscoff. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Santiago, Chile: Editorial Universitaria. 316p.

Marquet, P.; F. Bozinovic; G. A. Bradshaw; C. Cornelius; H. Gonzalez; J. R. Gutierrez; *et al.* 1998. Los ecosistemas del desierto de Atacama y área andina adyacente en el norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71: 593-617.

Mather, P. 1999. Computer processing of remotely-sensed images. An introduction. 2° edition. New York, USA: John Wiley & Sons, Chichester. 292p.

McKay, C.; E. Friedmann; B. Gomez-Silva; L. Carceres-Villanueva; D. Andersen and R. Landheim. 2003. Temperatura and moisture conditions for life in the extreme arid region of

the Atacama Desert: Four years of observation including the Niño of 1997-1998: *Astrobiology*, 3: 393-406.

MMA (Ministerio del Medio Ambiente). 2011. Suelos para uso silvoagropecuario. (Cap 9, 371-397). En: Informe del estado del medio ambiente. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente.

MMA (Ministerio del Medio Ambiente), Chile y CEA (Centro de Ecología Aplicada), Chile. 2011. Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Santiago, Chile: Ministerio de Medio Ambiente. 164p.

Morales, B. 2012. Estudio compilatorio de flora y fauna presente en las áreas silvestres protegidas de la Región de Tarapacá. Chile: CONAF. 227p.

Morales, C. 2005. Pobreza, desertificación y degradación de tierras (cap. 1, pp. 25-58). En: Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Santiago, Chile: CEPAL. 267p.

Muñoz, M. y MT. Serra. 2006. Documento de Trabajo. Estado de Conservación de Plantas de Chile, MNHN-CONAMA. 6p.

O'Brien, J. 2009. El descomedido Desierto de Atacama y su gente: visto por viajeros del siglo XIX. (pt.1, pp.29-43). En: ENAMI (Empresa Nacional de Minería). Chile Minero: ENAMI en la historia de la pequeña y mediana minería chilena. Primera edición. Santiago, Chile: Ocho Libros Editores. 341p.

ONF International (Office National des Forets). 2010. REDD+ at Project scale – Evaluation and development guide. Paris, France. 215p.

Orellana, L. 2013. Caracterización de humedales altoandinos para una gestión sustentable de las actividades productivas del sector norte del país: Flora y vegetación XV Región de Arica y Parinacota. [s.l.]: SAG. 31p.

Orrego, F. 2011. Queñoa: árbol de las alturas. Santiago, Chile: Gerencia de Medio Ambiente de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi y Jack Stern y Cía. 113p.

Orrego, F. (ed.); J. Watson; A. Flores y G. Rojas. 2013. Flores silvestres de Chile: Flores del Norte Grande. Santiago, Chile: MNHN. 325p.

Penman J.; M. Gytarsky; T. Hiraishi; T. Krug; D. Kruger; R. Pipatti *et al.* 2003. Panorámica general. (cap.1, 628p). En: IPCC. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas para UTCUTS. Hayama, Japón: IGES. 628p.

Raev, I.; U. Asan y O. Grozev. 1996. Acumulación de CO₂ en la parte aérea de la biomasa de los bosques de Turquía y Bulgaria en las últimas décadas. XI Congreso Mundial Forestal. Antalya, Turquía. v1., 123-130 pp.

Riggs, G.; D. Hall and V. Salomonson. 1994. A snow index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. (7^a, pp. 1942 - 1944). En: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. (8, 9, 10, 11 y 12 de agosto de 1994, Pasadena, CA). IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation., International. California, Estados Unidos.

Rioseco, R. y C. Tesser. 2007. Cartografía interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado en: <http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/> Consultado el 28 de octubre de 2014.

Roy, D.P.; V. Kovalskyy; H.K. Zhang; E.F. Vermote, L.; Yan, S.S.; Kumar y A. Egorov. 2016. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote sensing of environment*, 185: 50 – 57.

Salazar, F. 2009. Deforestación del Bosque Nativo en el Cordón de Cantillana: Causas y escenarios futuros. Magister en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 90p.

Santander, A. 2003. Norte Chico (Chile): Consumo de combustibles en el procesamiento de los minerales de cobre y su impacto sobre los recursos arbóreos y arbustivos: 1601-1900. (cap. 4, pp. 159-177). En: Livenais, P. y X. Aranda (eds.). Dinámicas de los sistemas agrarios en el Chile árido: la Región de Coquimbo. Santiago, Chile: LOM Ediciones. 502p.

Segura, R. y G. Trincado. 2003. Cartografía digital de la Reserva Nacional Valdivia a partir de imágenes satelitales Landsat TM. [en línea]. *Bosque (Valdivia)*, 24(2): 43-52. Recuperado en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002003000200005&lng=es&tlng=es.10.4067/S0717-92002003000200005> Consultado el: 11 de abril de 2014.

Seyfried, H.; G. Worrier; D. Uhlig; I. Kohler y C. Calvo. 1998. Introducción a la geología y morfología de los Andes en el Norte de Chile. [en línea]. *Chungará*, 30:7-39. Recuperado en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=s0717-73561998000100002&script=sci_arttext> Consultado el: 20 de mayo de 2014.

SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada). 2014. ENOS, El Niño Oscilación del Sur. [en línea]. Santiago, Chile: SHOA. Recuperado en <<http://www.shoa.cl/servicios/enos/principal.htm>> Consultado el: 25 de septiembre de 2014.

Telliet, P.; B. Guindon, and D. Goodeonugh. 1982, Dic. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2): 84-106.

Trivelli, MA. 2014. Reseña de la Vegetación de Chile Servicio Agrícola y Ganadero. División de protección de los Recursos Naturales Renovables. Sub-departamento de Vida Silvestre. Chile: SAG. 32p.

Ulloa, R. y P. Ortiz de Zárate. 1989. Geografía III Región de Atacama. Colección Geografía de Chile. Santiago, Chile: Ediciones instituto geográfico militar. 206p.
Universidad Austral de Chile; Pontificia Universidad Católica de Chile y Universidad Católica de Temuco. 1999, mar. Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile, Informe Regional Primera a Cuarta Región. Chile: CONAF; CONAMA; MINAGRI. 224p.

USGS (United States Geological Survey). 2013a. Using Landsat 7. [en línea]. Estados Unidos: United States Geological Survey. Recuperado en: <http://landsat.usgs.gov/using_Landsat_7_data.php> Consultado el 10 de abril de 2014.

USGS (United States Geological Survey). 2013b. Using the USGS Landsat 8 product. [en línea]. Estados Unidos: United States Geological Survey. Recuperado en: <http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php> Consultado el: 10 de septiembre de 2014.

USGS (United States Geological Survey). 2014a. Mission headlines 2013. [en línea]. Estados Unidos: United States Geological Survey. Recuperado en: <http://landsat.usgs.gov/mission_headlines2013.php> Consultado el: 15 de mayo de 2014.

USGS (United States Geological Survey). 2014b. What are the band designations for the Landsat satellites?. [en línea]. Estados Unidos: United States Geological Survey. Recuperado en: <<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>> Consultado el 20 de mayo de 2015.

VCS (Verified Carbon Standard). 2013a, oct. Jurisdictional and Nested REDD+ (JNR) Requirements. v.3. 57p.

VCS (Verified Carbon Estándar). 2013b. VCS Module VMD0007. REDD Methodological Module: Estimation of baseline carbon stock changes and greenhouse gas emissions from unplanned deforestation (BL-UP). v.3.2. 47p.

Xu H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3025-3033.

Xu, D. and X. Guo. 2014. Compare NDVI extracted from Landsat 8 imagery with that from Landsat 7 imagery. *American Journal of Remote Sensing*, 2(2): 10-14.

Zulantay, M.; C. Román-Figueroa; J.M. Uribe; C. Celis; R. Moyano y M. Paneque. 2013. Biomasa en el desierto de Chile. Santiago: Universidad de Chile. 128p.

7 ANEXOS Y APÉNDICES

7.1 Anexo 1. Imágenes satelitales utilizadas, con su *Path Row*, nombre y fecha de adquisición.

ID	Path	Row	Nombre	Día	Mes	Año
1	1	73	LT50010732003290COA00	17	Octubre	2003
2	1	74	LT50010742003306CUB00	2	Noviembre	2003
3	1	75	LT50010752003322COA01	18	Noviembre	2003
4	1	76	LT50010762003322COA01	18	Noviembre	2003
5	1	77	LT50010772003354COA00	20	Diciembre	2003
6	1	78	LT50010782003258CUB00	15	Septiembre	2003
7	1	79	LT50010792003322COA01	18	Noviembre	2003
8	1	80	LT50010802003322COA01	18	Noviembre	2003
9	2	72	LT50020722003345CUB00	11	Diciembre	2003
10	2	72	LT50020722003329CUB00	25	Noviembre	2003
11	2	73	LT50020732003329CUB00	25	Noviembre	2003
12	2	74	LT50020742003345CUB00	11	Diciembre	2003
13	232	76	LT52320762003340CUB00	6	Diciembre	2003
14	232	77	LT52320772003340CUB00	6	Diciembre	2003
15	233	75	LT52330752003283CUB02	10	Octubre	2003
16	233	76	LT52330752003299COA00	26	Octubre	2003
17	233	77	LT52330762003347COA00	13	Diciembre	2003
18	233	78	LT52330782003315CUB00	11	Noviembre	2003
19	233	79	LT52330792003363CUB00	29	Diciembre	2003
20	233	80	LT52330802003347COA00	13	Diciembre	2003
21	1	73	LT50010732008320COA00	15	Noviembre	2008
22	1	74	LT50010742008320COA00	15	Noviembre	2008
23	1	75	LT50010752008320COA00	15	Noviembre	2008
24	1	76	LT50010762008320COA00	15	Noviembre	2008
25	1	77	LT50010772008336CUB00	1	Diciembre	2008
26	1	77	LT50010772009002COA02	2	Enero	2009
27	1	78	LT50010782008352CUB00	17	Diciembre	2008
28	1	78	LT50010782009034COA02	3	Febrero	2009
29	1	79	LT50010792008352CUB00	17	Diciembre	2008
30	1	79	LT50010792009018COA02	18	Enero	2009
31	1	80	LT50010802008288CUB00	14	Octubre	2008

ID	Path	Row	Nombre	Día	Mes	Año
32	2	72	LT50020722008327CUB00	22	Noviembre	2008
33	2	73	LT50020732008327CUB00	22	Noviembre	2008
34	2	74	LT50020742008327CUB00	22	Noviembre	2008
35	232	76	LT52320762008322COA00	17	Noviembre	2008
36	232	77	LT52320772008322COA00	17	Noviembre	2008
37	233	75	LT52330752008329COA01	24	Noviembre	2008
38	233	76	LT52330762008329COA01	24	Noviembre	2008
39	233	77	LT52330772008329COA01	24	Noviembre	2008
40	233	78	LT52330782008329COA01	24	Noviembre	2008
41	233	79	LT52330792008329COA01	24	Noviembre	2008
42	233	80	LT52330802008329COA01	24	Noviembre	2008
43	1	73	LC80010732013333LGN00	29	Noviembre	2013
44	1	74	LC80010742013333LGN00	29	Noviembre	2013
45	1	75	LC80010752013333LGN00	29	Noviembre	2013
46	1	76	LC80010762013317LGN00	13	Noviembre	2013
47	1	77	LC80010772013317LGN00	13	Noviembre	2013
48	1	78	LC80010782013349LGN00	15	Diciembre	2013
49	1	78	LC80010782013365LGN00	31	Diciembre	2013
50	1	79	LC80010792014016LGN00	16	Enero	2014
51	1	80	LC80010802014016LGN00	16	Enero	2014
52	2	72	LC80020722013292LGN00	19	Octubre	2013
53	2	73	LC80020732013324LGN00	20	Noviembre	2013
54	2	74	LC80020742013308LGN00	4	Noviembre	2013
55	232	76	LC82320762013319LGN00	15	Noviembre	2013
56	232	77	LC82320772013335LGN00	1	Diciembre	2013
57	233	75	LC82330752013310LGN00	6	Noviembre	2013
58	233	76	LC82330762013310LGN00	6	Noviembre	2013
59	233	77	LC82330772013310LGN00	6	Noviembre	2013
60	233	78	LC82330782013326LGN00	22	Noviembre	2013
61	233	79	LC82330792013326LGN00	22	Noviembre	2013
62	233	80	LC82330802013326LGN00	22	Noviembre	2013

7.2 Anexo 2. Escenarios de deforestación 2014-2113 (Ha)

Año	Bosque		Matorral	
	Tendencia lineal histórica	Promedio anual histórico	Tendencia lineal histórica	Promedio anual histórico
2014	186.365	183.813	1.351.644	1.102.000
2015	206.089	200.524	1.471.739	1.202.182
2016	226.276	217.234	1.591.371	1.302.363
2017	246.927	233.944	1.710.539	1.402.545
2018	268.041	250.655	1.829.244	1.502.727
2019	289.619	267.365	1.947.485	1.602.909
2020	311.660	284.075	2.065.263	1.703.091
2021	334.165	300.785	2.182.577	1.803.272
2022	357.134	317.496	2.299.428	1.903.454
2023	380.566	334.206	2.415.815	2.003.636
2024	404.461	350.916	2.531.738	2.103.818
2025	428.820	367.627	2.647.198	2.204.000
2026	453.643	384.337	2.762.194	2.304.181
2027	478.929	401.047	2.876.727	2.404.363
2028	504.679	417.758	2.990.796	2.504.545
2029	530.892	434.468	3.104.402	2.604.727
2030	557.569	451.178	3.217.544	2.704.909
2031	584.709	467.888	3.330.223	2.805.090
2032	612.313	484.599	3.442.438	2.905.272
2033	640.381	501.309	3.554.189	3.005.454
2034	668.912	518.019	3.665.477	3.105.636
2035	697.906	534.730	3.776.302	3.205.818
2036	727.365	551.440	3.886.662	3.305.999
2037	757.286	568.150	3.996.560	3.406.181
2038	787.672	584.861	4.105.994	3.506.363
2039	818.520	601.571	4.214.964	3.606.545
2040	849.833	618.281	4.323.470	3.706.727
2041	881.609	634.991	4.431.513	3.806.908
2042	913.848	651.702	4.539.093	3.907.090
2043	946.551	668.412	4.646.209	4.007.272
2044	979.718	685.122	4.752.861	4.107.454
2045	1.013.348	701.833	4.859.050	4.207.636
2046	1.047.441	718.543	4.964.776	4.307.817
2047	1.081.999	735.253	5.070.038	4.407.999

Año	Bosque		Matorral	
	Tendencia lineal histórica	Promedio anual histórico	Tendencia lineal histórica	Promedio anual histórico
2048	1.117.019	751.964	5.174.836	4.508.181
2049	1.152.504	768.674	5.279.170	4.608.363
2050	1.188.451	785.384	5.383.042	4.708.545
2051	1.224.863	802.094	5.486.449	4.808.726
2052	1.261.738	818.805	5.589.393	4.908.908
2053	1.299.076	835.515	5.691.874	5.009.090
2054	1.336.878	852.225	5.793.891	5.109.272
2055	1.375.144	868.936	5.895.444	5.209.454
2056	1.413.873	885.646	5.996.534	5.309.635
2057	1.453.066	902.356	6.097.160	5.409.817
2058	1.492.722	919.067	6.197.323	5.509.999
2059	1.532.842	935.777	6.297.022	5.610.181
2060	1.573.425	952.487	6.396.258	5.710.363
2061	1.614.472	969.197	6.495.030	5.810.544
2062	1.655.983	985.908	6.593.339	5.910.726
2063	1.697.957	1.002.618	6.691.184	6.010.908
2064	1.740.394	1.019.328	6.788.565	6.111.090
2065	1.783.295	1.036.039	6.885.483	6.211.272
2066	1.826.660	1.052.749	6.981.937	6.311.453
2067	1.870.488	1.069.459	7.077.928	6.411.635
2068	1.914.780	1.086.170	7.173.455	6.511.817
2069	1.959.535	1.102.880	7.268.519	6.611.999
2070	2.004.754	1.119.590	7.363.119	6.712.181
2071	2.050.436	1.136.300	7.457.256	6.812.362
2072	2.096.582	1.153.011	7.550.929	6.912.544
2073	2.143.192	1.169.721	7.644.138	7.012.726
2074	2.190.265	1.186.431	7.736.884	7.112.908
2075	2.237.801	1.203.142	7.829.167	7.213.090
2076	2.285.802	1.219.852	7.920.985	7.313.271
2077	2.334.265	1.236.562	8.012.341	7.413.453
2078	2.383.193	1.253.273	8.103.233	7.513.635
2079	2.432.583	1.269.983	8.193.661	7.613.817
2080	2.482.438	1.286.693	8.283.625	7.713.999
2081	2.532.756	1.303.403	8.373.126	7.814.180
2082	2.583.537	1.320.114	8.462.164	7.914.362
2083	2.634.782	1.336.824	8.550.738	8.014.544
2084	2.686.491	1.353.534	8.638.848	8.114.726

Año	Bosque		Matorral	
	Tendencia lineal histórica	Promedio anual histórico	Tendencia lineal histórica	Promedio anual histórico
2085	2.738.663	1.370.245	8.726.495	8.214.908
2086	2.791.298	1.386.955	8.813.679	8.315.089
2087	2.844.398	1.403.665	8.900.399	8.415.271
2088	2.897.960	1.420.376	8.986.655	8.515.453
2089	2.951.987	1.437.086	9.072.447	8.615.635
2090	3.006.476	1.453.796	9.157.777	8.715.817
2091	3.061.430	1.470.506	9.242.642	8.815.998
2092	3.116.847	1.487.217	9.327.044	8.916.180
2093	3.172.727	1.503.927	9.410.983	9.016.362
2094	3.229.071	1.520.637	9.494.458	9.116.544
2095	3.285.879	1.537.348	9.577.469	9.216.726
2096	3.343.150	1.554.058	9.660.017	9.316.907
2097	3.400.885	1.570.768	9.742.101	9.417.089
2098	3.459.083	1.587.479	9.823.722	9.517.271
2099	3.517.745	1.604.189	9.904.879	9.617.453
2100	3.576.870	1.620.899	9.985.573	9.717.635
2101	3.636.459	1.637.609	10.065.803	9.817.816
2102	3.696.512	1.654.320	10.145.570	9.917.998
2103	3.757.028	1.671.030	10.224.873	10.018.180
2104	3.818.007	1.687.740	10.303.712	10.118.362
2105	3.879.450	1.704.451	10.382.088	10.218.544
2106	3.941.357	1.721.161	10.460.000	10.318.725
2107	4.003.727	1.737.871	10.537.449	10.418.907
2108	4.066.561	1.754.582	10.614.434	10.519.089
2109	4.129.858	1.771.292	10.690.956	10.619.271
2110	4.193.619	1.788.002	10.767.014	10.719.453
2111	4.257.843	1.804.712	10.842.609	10.819.634
2112	4.322.531	1.821.423	10.917.740	10.919.816
2113	4.387.683	1.838.133	10.992.407	11.019.998