

Aplicación de percepción remota para la detección de cambios en la cobertura boscosa de la reserva ecológica Mache-Chindul

Application of remote sensing for the detection of changes in forest cover at the Mache-Chindul ecological reserve

José Luis Muñoz Marcillo¹, Elías Cuasquer Fuel¹, Oscar Moncayo Carreño², Diana Delgado Campuzano¹

¹ Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ)

² Facultad de Ciencias Empresariales de la UTEQ

* **Correspondencia para el autor:** jsmunoz@uteq.edu.ec

Resumen

La Reserva Ecológica Mache-Chindul (REMACH) es una importante área estatal de vegetación natural de la costa norte de Ecuador. Esta investigación tiene como objetivo determinar cambios de la cobertura boscosa entre los años 1998 y 2004 para cuantificar la deforestación, caracterizando paralelamente sus rasgos topográficos de altitud y pendiente. Para este efecto, aplicando el álgebra de mapas, análisis de superficie y geoprocursos de plataformas como el procesador de imágenes y de los Sistemas de Información Geográfica, se realizó la clasificación supervisada a tres imágenes de satélite Landsat7 ETM de 30 m y el geoanálisis del modelo de elevación digital global ASTER GDEM con igual resolución espacial. Los resultados determinaron que en la primera parte del período de análisis existió una marcada deforestación, proceso que disminuyó al final del período, observándose que en las superficies con menor pendiente tuvo lugar la reconversión agrícola, en tanto que en las áreas de mayor pendiente se dio la reconversión pecuaria. Finalmente se contrastaron los resultados obtenidos, por medio de datos de fuentes globales de acceso gratuito en comparación con los de fuentes convencionales, comprobando un importante ajuste entre ambas.

Palabras clave: ASTER GDEM, Landsat 7 ETM, MAXLIKE, REMACH, SIG.

Abstract

The Mache-Chindul Ecological Reserve (REMACH) is an important state-managed area of natural vegetation on the north coast of Ecuador. This study seeks to define changes in forest cover between the years 1998 and 2004 and thus quantify deforestation, in parallel characterizing two topographic features, altitude and slope. To this end, applying map algebra, surface analysis, platform geoprocessing, image processing and Geographic Information Systems, the supervised classification was carried out of three Landsat7 ETM 30 m images, along with geoanalysis of the global digital model of elevation produced by ASTER GDEM with similar spatial precision. The results showed that in the first part of the period under analysis there was marked deforestation, a process which decreased at the end of the period. It was observed that while surfaces with less slope were turned over to agriculture, those with greater slope were given over to pasture. Finally, comparison of the results obtained by means of data taken from free-access global sources against data taken from conventional sources showing a significant fit.

Key words: ASTER GDEM, Landsat 7 ETM, MAXLIKE, REMACH, SIG.



Recibido: 3 de julio, 2015
Aceptado: 4 de abril, 2016

Introducción

Los bosques ocupan actualmente unos 4 000 millones de hectáreas que representan cerca del 31 % de la superficie del planeta (FAO, 2010). La humanidad depende de ellos y está en la obligación de conservarlos para asegurar la biodiversidad, la regulación del clima, contar con aire limpio, conservar los suelos y el agua, disponer de los productos madereros, de los servicios de energía, medicamentos y preservación de determinados valores culturales.

Para fortalecer el Programa de Reducción de las Emisiones derivadas de la Deforestación y Degradación de los Bosques (REDD+), en el acuerdo universal sobre cambio climático que se firmó durante la Convención Marco sobre el Cambio Climático en París (ONU, 2015), se legitimó y repotenció este mecanismo que busca generar incentivos a los países en vías de desarrollo, para que protejan sus recursos forestales usándolos de manera sostenible, reconociendo el rol de los bosques en la lucha contra el cambio climático.

La Reserva Ecológica Mache-Chindul (REMACH) es un área protegida creada el 9 de agosto de 1996, tiene una superficie de 11 999,3 hectáreas. En la Reserva se han inventariado 1 434 especies, distribuidas en 624 géneros y 149 familias. Las familias más abundantes y diversas son: *Araceae*, *Orchidaceae*, *Rubiaceae*, *Fabaceae*, *Gesneriaceae*, *Poaceae*, *Melastomataceae*, *Dryopteridaceae*, *Piperaceae* y *Moraceae*. El 8% de la población, 111 especies, es endémica (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2005).

La REMACH se encuentra entre las áreas protegidas más amenazadas del Ecuador occidental, a causa de la deforestación y otras actividades antropogénicas. La presión que ejercen las empresas madereras en el área de influencia de la Reserva y los frentes de colonización que se están formando, amenazan la conservación de los recursos biológicos además de la preservación de bienes culturales (MAE, 2005).

El Estado ecuatoriano incluyó a la reserva dentro de sus políticas ambientales, hecho significativo considerando que guarda la mayor reserva forestal de la región Costa de Ecuador (REMACH, 2005). Sin embargo, fue establecida con un gran número de centros poblados que se encontraban ya al interior, y otros en proceso de consolidación, lo cual ha originado una progresiva ampliación de la frontera agrícola, disminución de la productividad y aumento en la extracción ilegal de la madera. Según el último Plan de Manejo de la REMACH del año 2005, 6 466 personas viven al interior de la Reserva entre ellos miembros de la nacionalidad Chachi, del pueblo afroecuatoriano y mestizos colonos (MAE 2005).

Actualmente, el único remanente continuado de bosque natural de la Reserva se encuentra dentro del territorio Chachi. Lamentablemente, este bosque es el blanco de invasores que amenazan su integridad ecológica y la soberanía de la nacionalidad Chachi sobre su territorio, situando en posición de riesgo el patrimonio cultural (MAE 2005).

El Plan de Manejo de la REMACH desarrollado por el MAE implicó la realización de un mapa de cobertura vegetal generado en el año 2004, a partir del análisis de una imagen de satélite Landsat 7 ETM, de marzo de 2001, donde se concluye que la cobertura vegetal original de la REMACH ha sido modificada (MAE, 2005). La posibilidad de aplicar técnicas de teledetección o percepción remota por medio de la clasificación supervisada de imágenes de satélite multiespectrales, para luego comparar los datos obtenidos en el inventario de cobertura del suelo del Plan de Manejo de la REMACH de los años 2005 – 2010, permitiría establecer de una manera más precisa el impacto de la evolución y cambio del uso boscoso del suelo.

En la actualidad persiste una creciente necesidad por conocer mejor los ecosistemas boscosos, utilizándose para este propósito metodologías cada vez más depuradas, como las basadas en sensores remotos, las cuales generan información nueva y potente (Wright & Gallant, 2007; Schweitzer *et al.*, 2014).

Durante los últimos cuarenta años, la teledetección facilitó el estudio de la dinámica y distribución espacial de la vegetación. Dentro de los numerosos índices espectrales que permiten resumir la información provista por los sensores remotos. Uno de los más utilizados es el NDVI (Vásquez, Adema & Fernández, 2013).

La teledetección es la técnica que permite obtener información a distancia de los objetos, sin que exista un contacto con ellos (Chuvieco, 2002, p.42). El concepto se extiende al procesamiento e interpretación de los datos. De modo particular, la teledetección registra las características espectrales y texturales de los recursos naturales, sus efectos y las consecuencias de las actividades humanas (Marín & Ninci, 2010). Ofrece ventajas frente a otros medios convencionales como la fotografía aérea o los trabajos de campo (Chuvieco, 2002, p.34). Los sensores ópticos que se incluyen en los satélites captan amplias áreas de la superficie terrestre, de manera continua, en diferentes rangos de frecuencia o longitud de onda del espectro electromagnético (visible e infrarrojo), lo cual permite diferenciar los diferentes elementos de la superficie de la tierra y la extensión que ocupan. También permite recoger información de los elementos de la superficie terrestre mediante la detección y análisis de la energía radiada por ellos. Las imágenes multispectrales proporcionan datos estrechamente relacionados con varios atributos biofísicos y bioquímicos de la vegetación, permitiendo interpolar y extrapolar mediciones de terreno sobre áreas vastas e inaccesibles (Wulder & Franklin, 2003).

La generación de mapas de cobertura del suelo mediante el procesamiento de imágenes de satélite, es una de las aplicaciones más importantes en la teledetección. Con esos mapas se puede analizar los patrones espaciales de la cobertura de vegetación en un territorio (Martínez *et al.*, 2015). El uso de las imágenes de satélite permite estudiar los cambios de la cubierta boscosa acaecidos en el tiempo, haciendo más fácil el manejo de su estructura y dinámica

para ponderar la biodiversidad existente en un territorio (Başkent & Jordan, 1996; Esbah, Deniz & Kara, 2010).

Las técnicas de teledetección tienen muchas ventajas sobre otras técnicas de información basadas solo en trabajo de campo o en el ámbito de los sistemas de información geográfica. A un bajo costo económico se destaca un alcance global de la superficie de la tierra, adquisición de información en zonas no visibles del espectro electromagnético, uso de diferentes escalas de trabajo, alta frecuencia e información homogénea y datos históricos (Chuvieco, 2008; Pôças, Cunha, Marcal, & Pereira, 2011).

Las imágenes Landsat han sido los elementos más usados en teledetección para estudiar la cobertura actual del bosque y medir sus cambios espaciales en el tiempo (Townshend *et al.*, 2012).

Con base en lo señalado, esta investigación tiene como objetivo determinar la pérdida de cobertura boscosa del suelo por deforestación, en un período de seis años, y caracterizar los rasgos topográficos de la REMACH de la provincia de Esmeraldas aplicando técnicas de percepción remota o teledetección.

Materiales y métodos

La REMACH se localiza al suroccidente de la provincia de Esmeraldas y el norte de Manabí, en la extensión norte de la Cordillera de la Costa (Andrade, 2013). Forma parte de las 33 áreas naturales dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), administrado por Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). Abarca una superficie total de 121 376 ha, que incluye a los cantones Quinindé, Atacames, Esmeraldas y Muisne, en la provincia de Esmeraldas, y el cantón Pedernales, en la provincia de Manabí (Figura 1). La extensión de la REMACH en Esmeraldas es de 84 666,36 ha (MAE-IGM, 2016). Su relieve se caracteriza por un gradiente altitudinal que va desde los 200 msnm en el sector occidental, hasta cerca de los 800 msnm en las colinas orientales.

La Dirección Nacional de Avalúos y Catastros ha clasificado suelos de tipo V, VI y VII por lo que toda el área de la Reserva y su zona de influencia no es apta para el uso agrícola (MAE, 2005).

El mapa bioclimático del Ecuador (Cañadas,

1983) establece que la REMACH está emplazada en el área de la Región Húmedo Tropical caracterizada por una altitud de entre los 5 y 600 m de altitud, una temperatura media anual de entre los 23 y 25,5 °C y una precipitación promedio anual de 2 000 a 3 000 mm con más de nueve meses de lluvia al año.

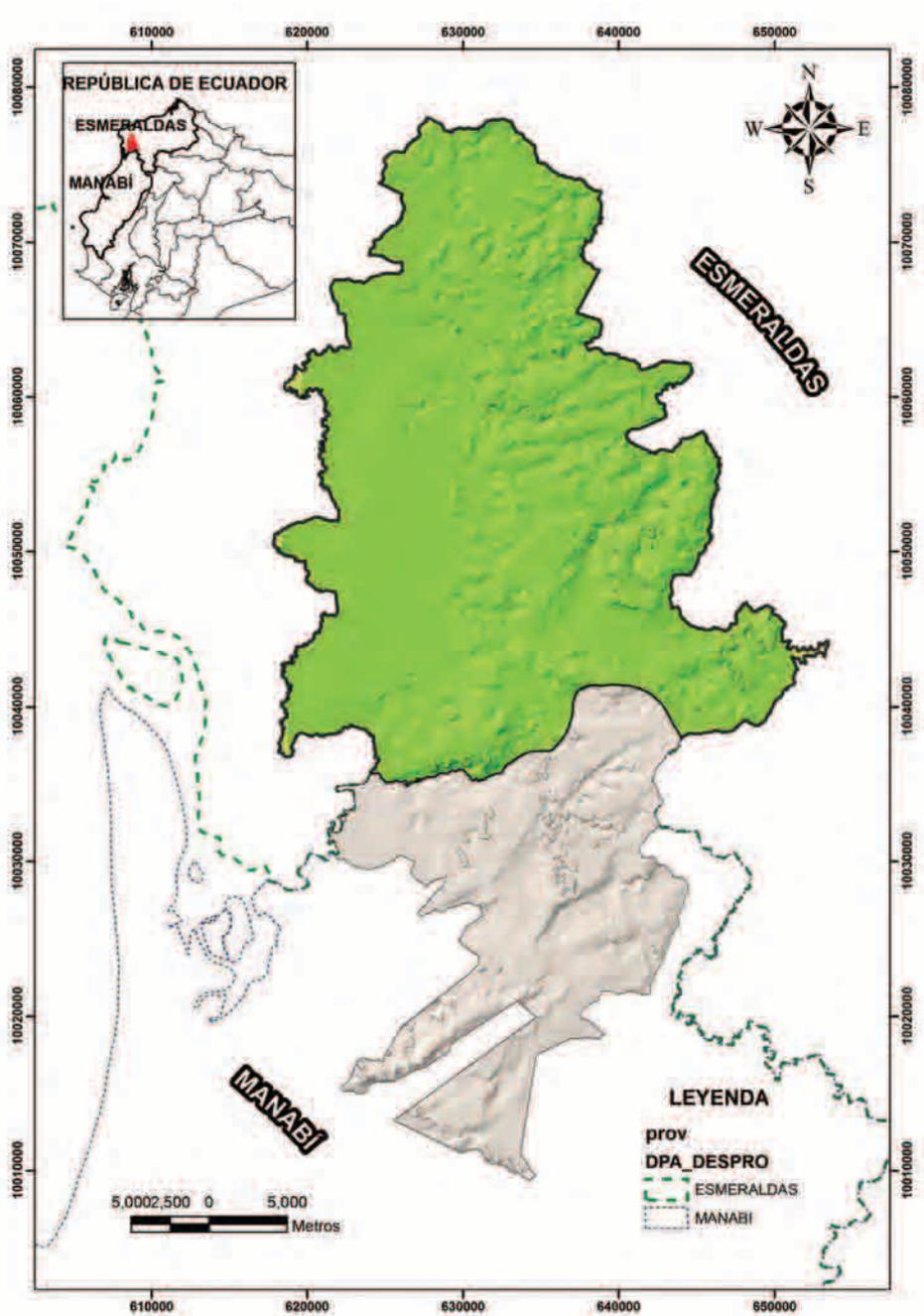


Figura 1. Área de estudio, Reserva Ecológica Mache Chindul (REMACH) Esmeraldas.

La determinación del cambio de la cobertura boscosa de la REMACH de la provincia de Esmeraldas se realizó empleando cuatro imágenes Landsat 7 ETM ortorectificadas, corregidas radiométrica y atmosféricamente. Fueron descargadas en el primer trimestre del año 2016 desde los sitios web especializados autorizados por el Servicio de Geología de los Estados Unidos de Norteamérica, cada una con su respectivo ID que incluye el año de correspondencia:

Imagen 1: LT50110601998170AAA01

Imagen 2: p011r061_7dt20001123_z17

Imagen 3: p011r060_7dt20010331_z17

Imagen 4: LE70110602002093EDC00

Aunque se estableció como tarea principal para el presente trabajo la clasificación supervisada de imágenes multiespectrales Landsat 7 ETM, se realizó en primer lugar una aproximación para la determinación de la cobertura boscosa del suelo de la REMACH para el año 1998, mediante la construcción de una imagen compuesta denominada "falso color o pseudo color" que integra una combinación de bandas de una imagen de satélite multiespectral Landsat 7 ETM en la relación RGB (432), bandas 4 (Infrarrojo), 3 (Rojo), 2 (Verde), lo cual permite diferenciar la vegetación vigorosa, que aparece en tonos rojos con diferentes intensidades (Chuvieco, 2002).

La relevancia de las imágenes multiespectrales es su resolución espacial (30 m por pixel) y su área de cobertura (180x175 Km²) que resulta muy adecuada para cartografiar con precisión en un nivel regional. Una imagen Landsat 7 ETM+ está compuesta por 8 bandas espectrales que incluyen una banda pancromática con resolución de 15 metros y una banda térmica de 60 m. Las bandas del espectro visible y del infrarrojo presentan una resolución espacial de 30 m en los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7 y son las que se emplearán para el presente estudio. Las seis bandas espectro visible y del infrarrojo de la imagen Landsat 7 ETM se distribuyen en las regiones del espectro que son sensibles a la cantidad de vegetación (Labrecque, Fournier, Luther, & Piercey, 2006).

En la determinación de la cobertura boscosa de la REMACH de la provincia de Esmeraldas, correspondiente a los años 1998, 2001 y 2002, se empleó la técnica de percepción remota o teledetección de clasificación supervisada aplicada a imágenes de satélite Landsat 7 ETM. El clasificador utilizado fue el de máxima probabilidad (MAXLIKE). El método de máxima probabilidad es el más lento de las técnicas, pero si las zonas de entrenamiento están bien elegidas es el más exacto.

El método MAXLIKE emplea un algoritmo de máxima verosimilitud que se alimenta de puntos de control (zonas de entrenamiento) a los que considera como parámetros. Para el muestreo y establecimiento de los sitios de entrenamiento se utilizó una cobertura de áreas de control en formato shapefile, tomadas de la cartografía del MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca) del año 1990, donde señalan las coberturas de bosque y agropecuarias que se encontraban en la zona de estudio. Se emplearon 10 sitios de entrenamiento distribuidos en esta área de estudio para las coberturas de bosque y agropecuaria.

Posteriormente, con el procesador de imágenes Idrisi Selva, se seleccionaron los números digitales de las bandas de la matriz satelital a partir de las diferentes combinaciones de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 que permitieron discriminar las áreas con mayor probabilidad de ser cobertura de bosque o agropecuaria, para seguidamente obtener una matriz con agrupación de clústeres, bajo el mismo valor reclasificado.

La determinación del cambio de la cobertura boscosa de la REMACH de la provincia de Esmeraldas entre los años 1998 al 2002, se realizó contrastando los resultados de la clasificación supervisada por el método MAXLIKE con los valores del Índice Vegetal (NDVI) y con datos obtenidos de acuerdo al mapa de cobertura vegetal generado para el año 2004, a partir de una imagen de satélite Landsat 7 ETM de marzo del 2001 (MAE, 2005).

Para la segunda parte de la investigación,

empleando el programa *ArcGis 9.3*, se realizó el análisis topográfico que se concentró en el cálculo de la pendiente a partir de un Modelo de Elevación Digital (ASTER GDEM) con resolución de 30 metros por cada pixel, correspondiente al cuadrante ASTGTM_N00W080(<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>), ubicado dentro de la zona 17N y 17S del Ecuador continental.

El GDEM es un modelo global de elevaciones construido a partir de imágenes ASTER GDEM por la agencia espacial de Estados Unidos y el Ministerio del Interior de Japón. Se caracteriza por presentar una resolución espacial de 30 metros por pixel, lo que significa un gran avance respecto al modelo global anterior, de uso público, cuya resolución espacial era de 90 m por pixel. En cuanto a las mediciones de exactitud respecto a los valores de elevación hechas por los desarrolladores, alcanzan un valor medio cercano a los 9 m.

El ASTER GDEM está elaborado a partir de estéreo-pares de imágenes obtenidas por el sensor VNIR del instrumento ASTER a bordo de la plataforma espacial Terra. El ASTER GDEM se elaboró a partir de 1.2 millones de estéreo-pares (ASTER GDEM Validation Team, 2009)

Mediante el geoprocetamiento de dos capas de información digital del área de estudio, la primera relacionada con los puntos de cota

del terreno en formato vectorial generada por el IGM y la segunda capa en formato raster, correspondiente a la matriz de altitud del ASTER GDEM, se generó una tabla que contiene, para cada valor de altitud del suelo de acuerdo a las cotas del IGM, su correspondiente valor de altitud que contiene el modelo ASTER GDEM. Seguidamente se procedió a aplicar un análisis de regresión lineal para determinar la consistencia del modelo ASTER GDEM en comparación con datos cartográficos convencionales (Figura 2).

La pendiente es uno de los rasgos topográficos más importantes del terreno que limita las actividades agrícolas y silvícolas. Además, la gradiente de la pendiente (ángulo) influye sobre la erosión del suelo (U.S.Department of Agriculture, 1993). Posteriormente y siguiendo a Fernández (2006), la pendiente fue clasificada considerando la limitación de las actividades agrícolas y silvícolas (Tabla 1).

Los datos obtenidos a partir de la aplicación de técnicas de percepción remota o teledetección dirigidos al uso, altitud y pendiente del suelo fueron contrastados con la información proveniente de otras fuentes convencionales como las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) y estudios del Ministerio del Ambiente, pudiendo de este modo confrontar la información para evaluar el grado de precisión obtenido.

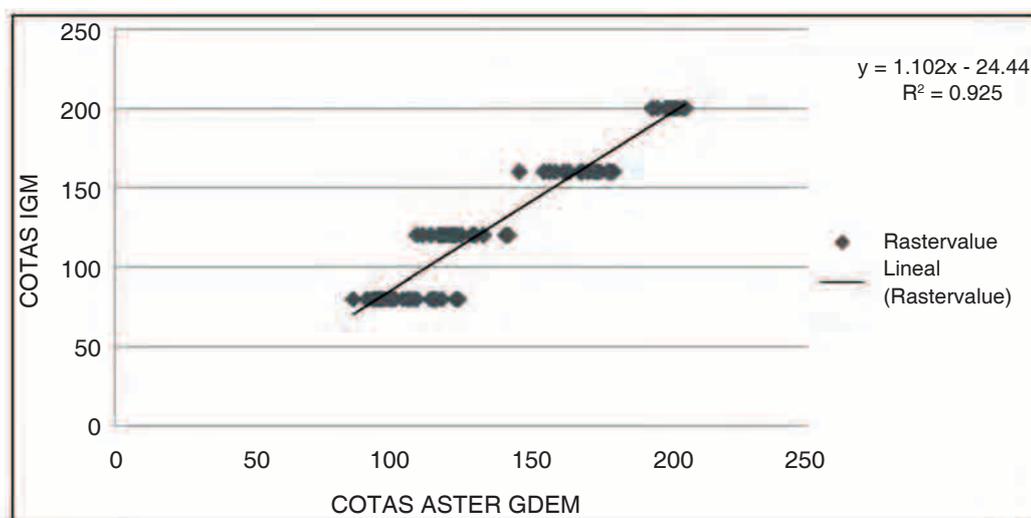


Figura 2. Recta de regresión entre los valores de elevación (metros) de cotas de IGM y ASTER GDEM.

Tabla 1. Pendiente en relación a limitación de actividades silvícolas y agrícolas y umbral geomorfológico.

Rasgos de pendiente (°)	Tipo de pendiente	Actividades	Umbral geomorfológico
0 – 2	Horizontal	Uso agrícola	Erosión nula o leve
2.1 - 5	Suave	Uso agrícola	Erosión débil
5.1 – 10	Moderada	Uso agrícola y forestal	Erosión moderada a fuerte
10.1 - 20	Fuerte	Forestal comercial	Erosión intensa,
20.1 - 30	Moderadamente escarpada	Forestal comercial	Movimientos en masas
30.1 - 45	Muy escarpada	Forestal protección	Movimientos en masas
> 45	Acantilada	No aplica	Desprendimiento, derrumbes

Fuente: Elaboración propia a partir de Fernández (2006)

Resultados

La sobreposición de las bandas de imagen del satélite Landsat 7 ETM de junio del año 1998, en modo de falso color, muestra la distribución de la vegetación de acuerdo a la intensidad de matices rojos en el área de estudio, sección

Esmeraldas de la reserva ecológica Mache-Chindul, REMACH (Figura 3).

La clasificación supervisada aplicando el método de máxima probabilidad (maxlike) al área de estudio, permitió establecer la superficie boscosa existente para el año 1998 (Figuras 4 y 5, Tabla 2).

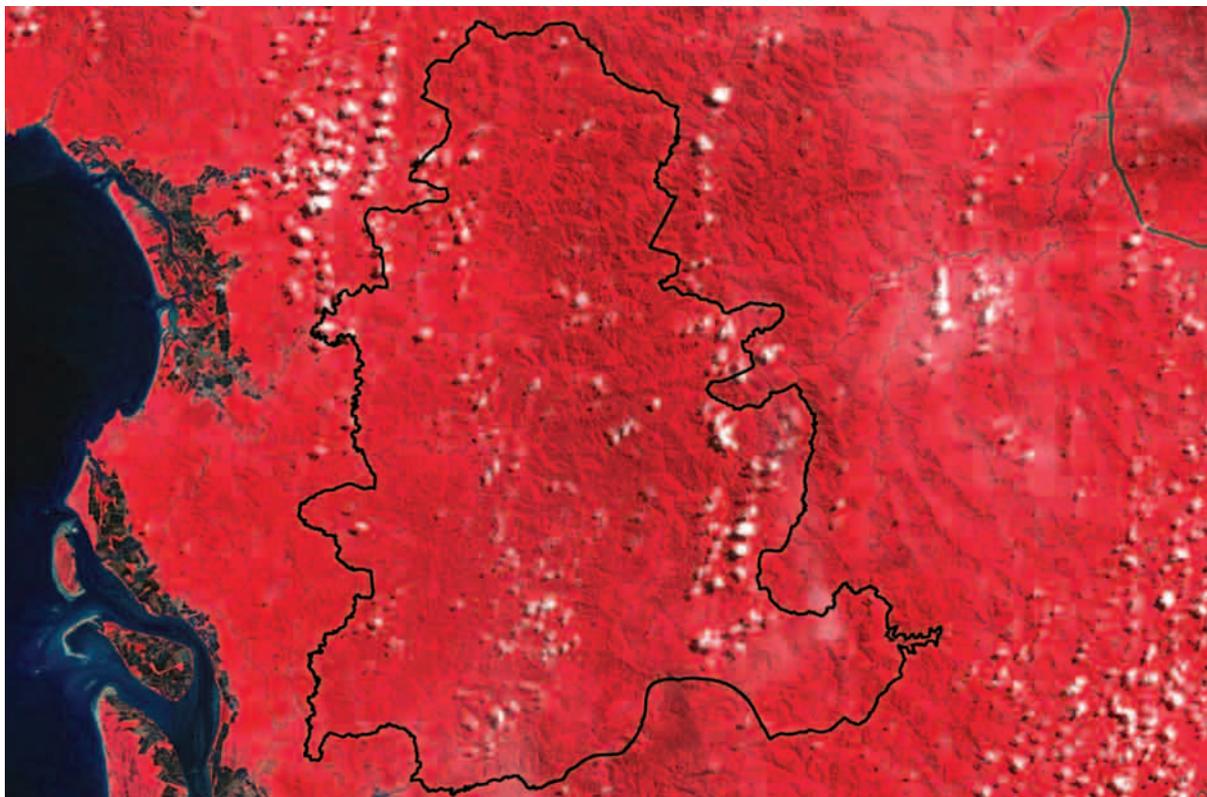


Figura 3. Composición de falso color de REMACH.

Tabla 2. Cobertura del Suelo, año 1998.

Cobertura	Área (ha)	Densidad (%)
Bosque	56 693.95	66.96
Agropecuario	26 118.91	30.85
Nube	1 853.50	2.19
Total	84 666.36	100.00

Elaboración propia en base a Landsat7 ETM

La determinación del Índice Vegetal NDVI para el área de estudio a partir de lo manifestado por Chuvieco (2002), permitió clasificar rangos de densidad vegetal en relación con la cobertura del suelo existente (Figura 6, Tabla 3).

Tabla 3. Cobertura del Suelo por NDVI, año 1998.

Cobertura	Área (Ha)	Densidad (%)
Bosque	48 115.77	56.83
Agropecuaria	30 590.86	36.13
Nubes	5 959.73	7.04
Total	84 666.36	100.00

Elaboración propia en base a Landsat7 ETM

El cálculo del NDVI para la REMACH de la provincia de Esmeraldas sirvió de apoyo para verificar la densidad y vigor de la vegetación del área de estudio, misma que varió en relación con la cobertura obtenida por la clasificación supervisada, en especial con la cobertura de nubes debido a que en los sitios de entrenamiento donde empleó el método MAXLIKE, se redujo el efecto espacial de las nubes que sí considera el Índice Vegetal NDVI.

La aplicación de la matriz de confusión a las coberturas reales del área de estudio contrapuesta a las áreas mapeadas, arrojó porcentajes aceptables de errores de omisión (O) y comisión (C) expresados en proporción, por lo que las coberturas de suelo obtenidas por clasificación supervisada de imágenes Landsat 7 ETM queda validada (Tabla 4).

La clasificación supervisada de imágenes de satélite Landsat 7 ETM en la REMACH de Esmeraldas determinó para el período de estudio la tasa de deforestación (Tabla 5).

Tabla 4. Matriz de confusión

	1	2	3	Total	Error C
1	14 307	4 450	1	18 758	0.2373
2	9 046	58 964	1 216	69 226	0.1482
3	937	536	4 891	6 364	0.2315
Total	24 290	63 950	6 108	94 348	
Error O	0.4110	0.0780	0.1992		0.1716

Tabla 5. Tasa de deforestación de la REMACH de Esmeraldas.

Año	Cobertura de bosques (ha)	Deforestación %	Reconversión
1998	67 374.44	-	-
2001	58 188.68	13.63	agropecuaria
2002	50 671.73	12.92	Agropecuaria
2004	48 618.66	4.05	Agropecuaria

La cobertura de bosque incluida en la REMACH de Esmeraldas para el año 2004, fue tomada del estudio del suelo que realizó el Ministerio del Ambiente del Ecuador como parte de su Plan de Manejo para el período 2005 - 2010.

El análisis topográfico a partir de la modelación del ASTER GDEM de resolución de 30 metros por pixel, permitió la generación de iso curvas de nivel (msnm) a cada 30 metros (Figura7).

El mapa de curvas de nivel del área de estudio determinó una gradiente atitudinal de entre 20 msnm y 720 msnm, correspondiendo la menor altitud al sector occidental de la reserva mientras que los valores más altos se corresponden con el flanco oriental.

El análisis de regresión lineal aplicado a las cotas provenientes de la cartografía convencional del IGM y del ASTER GDEM, mostró una alta correlación entre las dos variables, tal como da cuenta el coeficiente de determinación $R^2=0.925$

El análisis topográfico también implicó la obtención de la pendiente de la Reserva

Ecológica, de tal manera que a partir del ASTER GDEM, empleando herramientas de geoanálisis, se obtuvo el mapa de pendientes (Figura 8) el cual fue reclasificado de acuerdo al umbral geomorfológico y la limitación que este factor ofrece para el establecimiento de cultivos agrícolas y plantaciones forestales (Figura 9, Tabla 6).

Tabla 6. Pendiente reclasificado.

Clase (°)		Área (ha)	Densidad (%)
Horizontal	(0 - 2)	18 062.01	21.37
Suave	(2.1 - 5)	6 445.52	7.63
Moderada	(5.1 - 10)	18 573.41	21.98
Fuerte	(10.1 - 20)	30 556.19	36.16
Moderadamente			
escarpada	(20.1 - 30)	8 969.40	10.61
Muy	(30.1 ^º - 45 ^º)	1 349.80	1.60
escarpada			
Acantilada	(> 45)	547.05	0.65
Total		84 503.38	100.00

Elaboración propia a partir de Fernández (2006)

La modelación de la pendiente expresada en hectáreas dentro del área de estudio indica que prevalecen las categorías de pendiente horizontal, moderada y fuerte, mientras que en menor medida se encuentra la pendiente del tipo acantilada.

Las áreas de la REMACH de Esmeraldas que han sufrido el proceso de cambio de la cobertura vegetal del suelo producto de la deforestación del bosque, en lo que respecta a la superficie del suelo con clase de pendiente horizontal a suave ha sido reconvertida por cultivos agrícolas, mientras que las áreas de suelo con clase de pendiente moderada a fuerte ha sido reemplazada con cultivos pecuarios de pastizales.

Discusión

El empleo de imágenes Landsat 7 ETM para la determinación del cambio de cobertura boscosa en el área de estudio, habría tenido mayor precisión en los resultados de haberse utilizado varias imágenes de satélite por año, lo cual hubiese evitado los efectos de sobrestimación de

la cobertura boscosa, situación que se presenta en el período invernal. Pese a la disponibilidad global gratuita de imágenes de satélite Landsat 7 ETM, la región donde se ubica la REMACH de la provincia de Esmeraldas pasa cubierta por una densa y permanente capa de nubes, que evita disponer de varias imágenes de satélite por año que contengan un porcentaje de nubes menor al 10 % necesario para que las matrices puedan ser empleadas en el estudio de cambio de la cobertura boscosa.

Al trabajar con imágenes de satélite Landsat 7 ETM se debe asegurar que estas cuenten con un nivel mínimo de procesamiento que incluya ortorectificación y corrección radiométrica, atmosférica y porcentaje de nubosidad, caso contrario la imagen debería ser sometida a un tratamiento previo de corrección, para posteriormente utilizarla en estudios de cambios de uso del suelo con un alto nivel de exactitud.

La superposición de curvas de nivel y cotas del Instituto Geográfico Militar (IGM) al ASTER GDEM, permitió observar un buen ajuste ortogonal con la topografía del modelo.

Se acepta que un Modelo de Elevación Digital (MDE) cumple con las condiciones de calidad necesarias, si el mismo permite reproducir una porción de la realidad del terreno a una escala determinada y con un error aceptable para dicha escala; permitiendo modelizar y simular digitalmente procesos reales del medio físico (Sala, Matko, Falk & Grings, 2004).

El análisis de imágenes de satélite ofrece ventajas en comparación con los métodos *in situ*, que muchas veces ameritan mediciones en terreno que pueden resultar prohibitivas a amplias escalas, debido a limitantes de accesibilidad, tiempo y recursos (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2007).

La cartografía generada a través de fotointerpretación y procesamiento digital de una imagen satelital Landsat 7 TM, probó que existen confusiones entre bosques adultos y renovales, principalmente debido a la dificultad de separar

ambas formaciones de manera discreta (Segura & Trincado, 2003).

El Modelo Global ASTER GDEM, expresan Carignano, Cioccale y Martino (2014), permite a través del modelamiento digital del terreno establecer las características morfológicas y morfométricas de una área topográfica irregular.

En trabajos similares, la elaboración de cartografía temática de cobertura boscosa de la Reserva Nacional Valdivia, demostró la factibilidad de utilizar información satelital del tipo Landsat TM en conjunto con información auxiliar, para la generación de una cartografía preliminar con una exactitud aceptable y de bajo costo (Segura & Trincado, 2003). Asimismo, estudios de Soto *et al.* (2011) en el Valle del Aconcagua, señalan que el empleo de imágenes Landsat 7 ETM para establecer patrones de cambio en el uso del suelo en los últimos 35 años, ha dado cuenta de la existencia de impactos ambientales negativos por reconversión productiva de ese territorio.

Pese a lo prometedor de las nuevas tecnologías de percepción remota o teledetección, autores como Ojeda *et al.* (2011) acusan dificultades en la clasificación de los bosques debido a que amplias extensiones se distribuyen en áreas abruptas, además de la incidencia que reviste la presencia de distintas especies arbóreas dominantes en el estrato superior, derivando en confusiones espectrales entre especies forestales. Por tanto, estos mismo autores recomiendan seguir probando nuevas metodologías basadas en sensores remotos, que permitan una mejor caracterización y clasificación de los bosques.

La clasificación supervisada de imágenes de satélite Landsat7 ETM determinó que la REMACH de la provincia de Esmeraldas, en el período comprendido entre los años 1998 y 2004, tuvo una tasa de deforestación de entre el 10.67 % y 1.59 %, situación que coincide con lo contemplado en el PDOT (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial) elaborado por el GAD parroquial rural San Gregorio, para el período 2014-2019.

De acuerdo al MAE (2012) la reserva ecológica Mache-Chindul, alcanza el 2.52 % de las áreas naturales protegidas terrestres del Ecuador mientras que en relación a la superficie ocupada por las áreas naturales protegidas ubicadas dentro del litoral ecuatoriano, la REMACH constituye el 25 % de la superficie regional.

La reserva ecológica REMACH es el único remanente de bosque húmedo tropical del litoral ecuatoriano, cuya deforestación ha sido consecuencia de la extracción maderera industrial descontrolada y la expansión de la frontera agrícola y pecuaria (MAE, 2005).

Conclusiones

Las técnicas de teledetección aplicadas al estudio de la dinámica de la cobertura boscosa del suelo permiten determinar con alta precisión los tipos y extensión de coberturas existentes. Por otra parte, la falta de imágenes de satélite de gran resolución espacial, así como su limitada funcionalidad debido a la presencia de elevados porcentajes de nubosidad en la zona de estudio, se constituye en una limitante durante la aplicación técnicas de teledetección al estudio de la cobertura forestal.

La teledetección, a través de la clasificación supervisada de imágenes de satélite aplicando el método de máxima probabilidad (Maxlike), probó ser un método muy eficiente para la determinación de la extensión de áreas boscosas presentes en décadas pasadas dentro de la REMACH, aunque se haya estudiado únicamente la sección correspondiente a la provincia de Esmeraldas.

El modelo de elevación digital global ASTER GDEM, se constituyó en una fuente de datos de alta precisión considerando la escala de resolución espacial y de trabajo para el cual fuera diseñado, presentando un error medio de un poco más de 9 metros. Con la utilización de herramientas de análisis de superficie de cualquier plataforma SIG, se puede procesar el modelo ASTER GDEM y de este modo se generan isolíneas de nivel y el modelo digital de pendientes con un alto nivel de confiabilidad.

El uso de datos geográficos digitales globales de acceso libre, como parte de políticas y estrategias para la difusión de información científica, se constituyen en una fuente muy económica y funcional de datos especializados que se pueden integrar en diferentes estudios sobre vastas áreas territoriales de carácter regional.

Referencias

- Alonso, C.M. (1996). Análisis Multitemporal de Imágenes LANSAT TM en la Cartografía de las Masas de Hielo y Nieve Aplicada a la Modelización Hidrológica. *Revista Teledetección*, 7, 12.
- Andrade, M. (2013). *Cambio multitemporal de la cobertura vegetal y su permanencia entre los años 1998, 2002, 2005, 2008 y 2012 dentro de la reserva ecológica "Mache-Chindul" (REMACH). Plan de mitigación.* (Tesis de maestría). Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador.
- Başkent, E. Z., & Jordan, G. A. (1996). Designing forest management to control spatial structure of landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 34, 55-74.
- Cañadas, L. (1983). *El Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador*. MAG-PRONAREG. Quito.
- Carignano, C., Cioccale, M., & Martino, R. El megadeslizamiento del cerro Uritorco, ladera occidental de la Sierra chica de Córdoba. *Asociación Geológica Argentina*, 71, 21-32
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona, España: Ediciones Ariel
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio [Environmental remotesensing. Earth observation from space]*. Barcelona: Editorial Ariel, 595 pp.
- Consejo de Planificación del GAD Parroquial Rural De San Gregorio (2015). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial - PDYOT del GAD parroquial rural de San Gregorio 2014-2019: Recuperado de: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/0860020190001_SANGREGORIO-actualizacion1_14-10-2015_11-14-31.pdf
- Esbah, H., Deniz, B., & Kara, B. (2010). Analyzing landscape changes in the Bafa Lake Nature Park of Turkey using remote sensing and landscape structure metrics. *Environmental Monitoring and Assessment*, 165, 617- 632.
- FAO. (2010). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>
- Fernández, R. (2006) Evaluación Espacial de Procesos Erosivos y su Influencia sobre el Corredor de Comercio Las Leñas, VI Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Instituto Geográfico Militar (2016). Cartografía de libre acceso. Quito, Ecuador: Recuperado de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso>
- Labrecque, S., Fournier, R., Luther, J., & Piercey D. (2006). A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. *Forest Ecology and Management*, 226, 129 – 144.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2007). *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York, USA: Wiley.
- Marín, G., & Ninci, C. (2010) Teledetección en las ciencias de la tierra. *Asociación Geológica Argentina*. 66, (4), 555-556
- Martínez, E., García, A., Longares, L., & De Luis, M. (2015). Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo Natural Park (Spain). *Applied Geography* (62) 247 – 255.
- Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) of Japan and the United States National Aeronautics and Space Administration (NASA), (2009). ASTER Global Digital Elevation Map. JP. EU.: Recuperado de <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/index.jsp>

- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP). (2016). Mapas temáticos a nivel provincial. Quito, Ecuador: Recuperado de <http://geoportalmagap.gob.ec/>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (2005). Suia.ambiente: Plan de manejo y gestión participativa de La Reserva Ecológica Mache Chindul 2005 - 2010. Quito, EC. Recuperado de <http://suia.ambiente.gob.ec/documents/10179/242256/09+PLAN+D+E+MANEJO+CHINDUL.pdf/aeb58b23-f095-4514-8213-c69b95b0f18c>
- Ministerio del Ambiente, (2012): Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental, Quito-Ecuador. Recuperado de <http://sociobosque.ambiente.gob.ec/files/Folleto%20mapa-parte1.pdf>
- Ojeda, N., Sandoval, V., Soto, H., Casanova, J., Herrera, M., Morales, L., Espinosa, A., & San Martín, J. (2011). Discriminación de bosques de Araucaria araucana en el Parque Nacional Conguillío, centro-sur de Chile, mediante datos Landsat TM. Bosque (Valdivia), 32(2), 113-125: Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002011000200002&lng=es&tlng=es.10.4067/S0717-92002011000200002.
- ONU (2015). Convención Marco sobre el Cambio Climático, Conferencia de las Partes 21er período de sesiones. Recuperado de <http://unfccc.int/http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109r01s.pdf>
- Pôças, I., Cunha, M., & Pereira, L. S. (2011). Remote sensing based indicators of changes in a mountain rural landscape of Northeast Portugal. Applied Geography, 31, 871 - 880.
- Sala, H., Matko, C., Falk, U., & Grings, F. (2004). Análisis y comparación de dos modelos digitales de elevación en la isla 25 de mayo (King George island), islas Shetland del sur, Antártida. Geoacta. 39, (2), 14-29.
- Segura, R., & Trincado, G.(2003). Cartografía digital de la Reserva Nacional Valdivia a partir de imágenes satelitales Landsat TM. Bosque, 24 (2) 43 - 52: Recuperado de: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071792002003000200005
- Silva Schweitzer, A.M., & Rubio Farinelli, M.L. (2014). Análisis de cambios de uso del suelo en la Delegación Municipal de Ingeniero White (Buenos Aires, Argentina): aplicación de geotecnologías. Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía, 23(1), 133 - 146: Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2014000100011&lng=en&tlng=es.10.15446/rcdg.v23n1.35580.
- Sistema Nacional de Información (2016). Archivos de información geográficas. Quito, Ecuador: Recuperado de <http://sni.gob.ec/coberturas>
- Soto Bäuerle, M.V., Arriagada González, J., Castro Correa, P., Maerker, M., & Rodolfi, G. (2011). Relación entre el cambio de uso del suelo en la cuenca del Aconcagua y su litoral arenoso correlativo: Chile central. Revista de geografía Norte Grande, (50), 187-202: Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022011000300011&lng=es&tlng=es.10.4067/S0718-34022011000300011.
- Townshend, J. R., Masek, J. G., Huang, C., Vermote, E. F., Gao, F., Channan, S., & Song, K. Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges. International Journal of Digital Earth, 5(5),373 - 397. Recuperado de http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050993.pdf
- University of Maryland (2016). Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility. Maryland, E.U.: Recuperado de <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- USGS (2009). Ipdaac.usgs.gov: ASTER Global DEM Validation, Summary Report. New York, EU. Recuperado de: https://ipdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf
- Vázquez, P., Adema, E., & Fernández, B. (2013). Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales

de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. Revista Ecología austral(23), 77-86: Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667782X2013000201
Wright C., & Gallant A. 2007. Improved wetland remote sensing in Yellowstone National

Park using classification trees to combine TM imagery and ancillary environmental data. Remote Sensing of Environment 107(4): 582-605.
Wulder M., & Franklin S. (2003). Remote sensing of forest environments, concepts and case studies. British Columbia, Canadá, 3 – 12

Anexo

Maximum Likelihood Classification

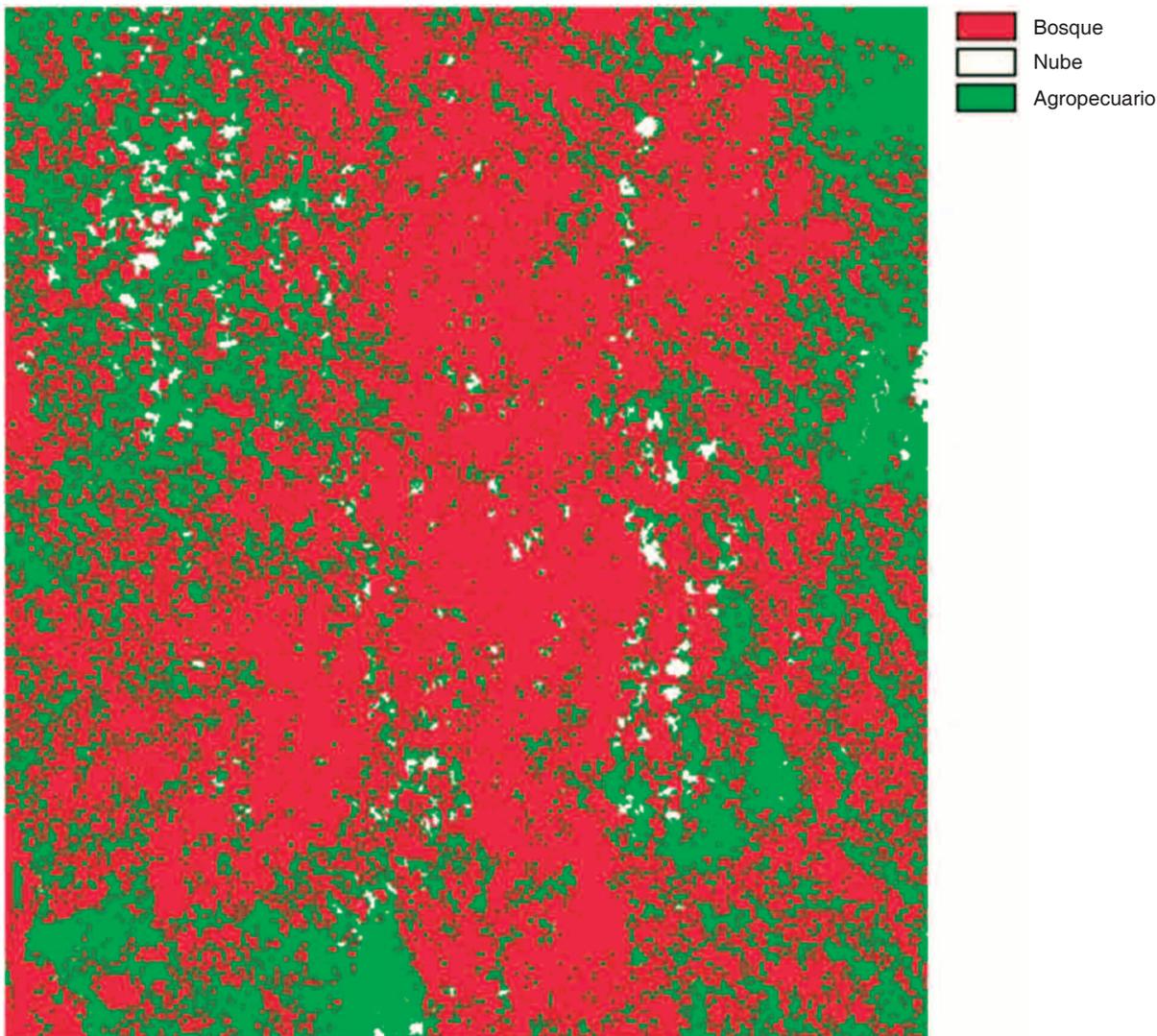


Figura 4. Clasificación supervisada de Landsat7 ETM por método MAXLIKE.

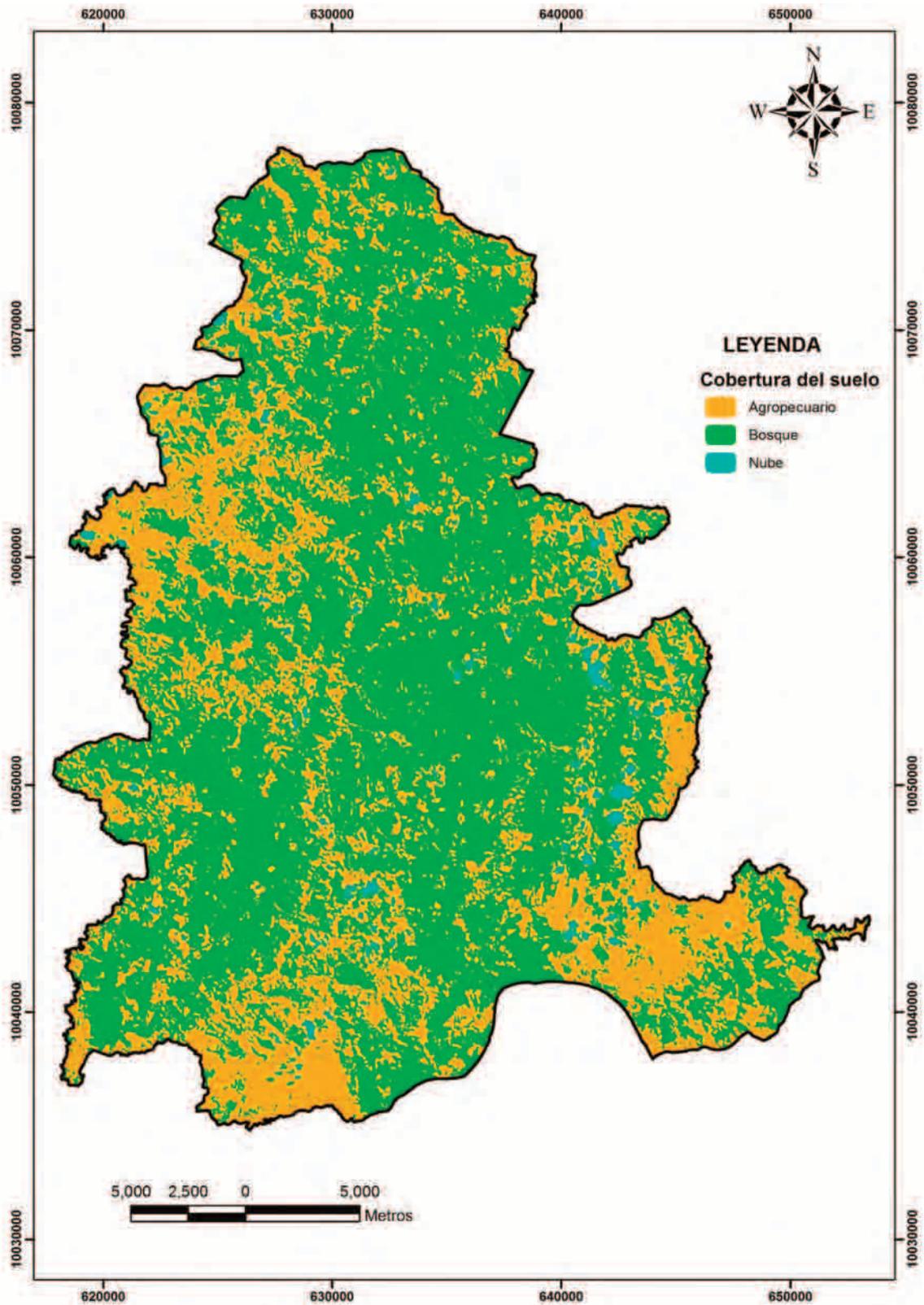


Figura 5. Cobertura del suelo REMACH, provincia de Esmeraldas, año 1998.

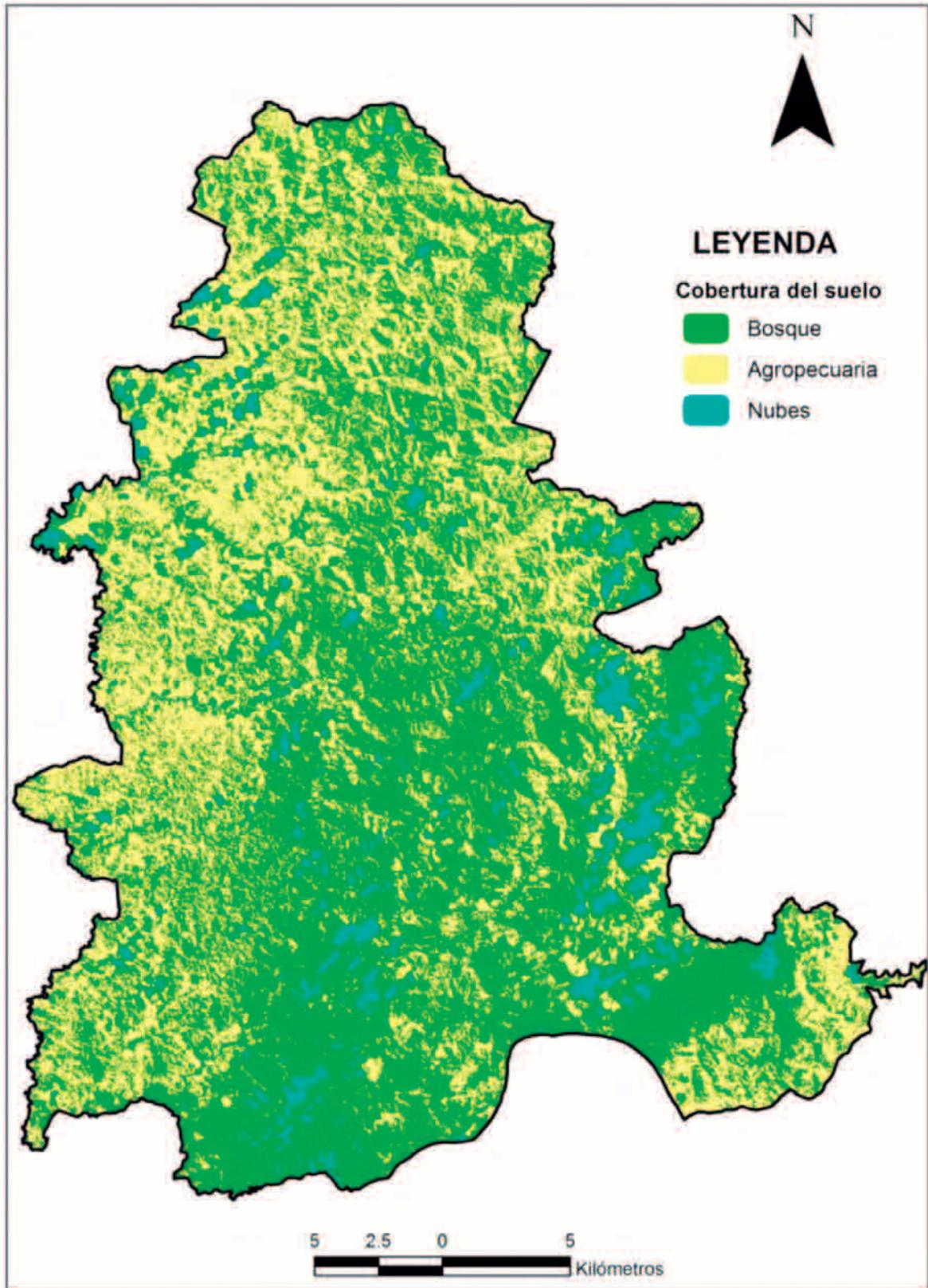


Figura 6. NDVI de la REMACH, provincia de Esmeraldas, año 1998

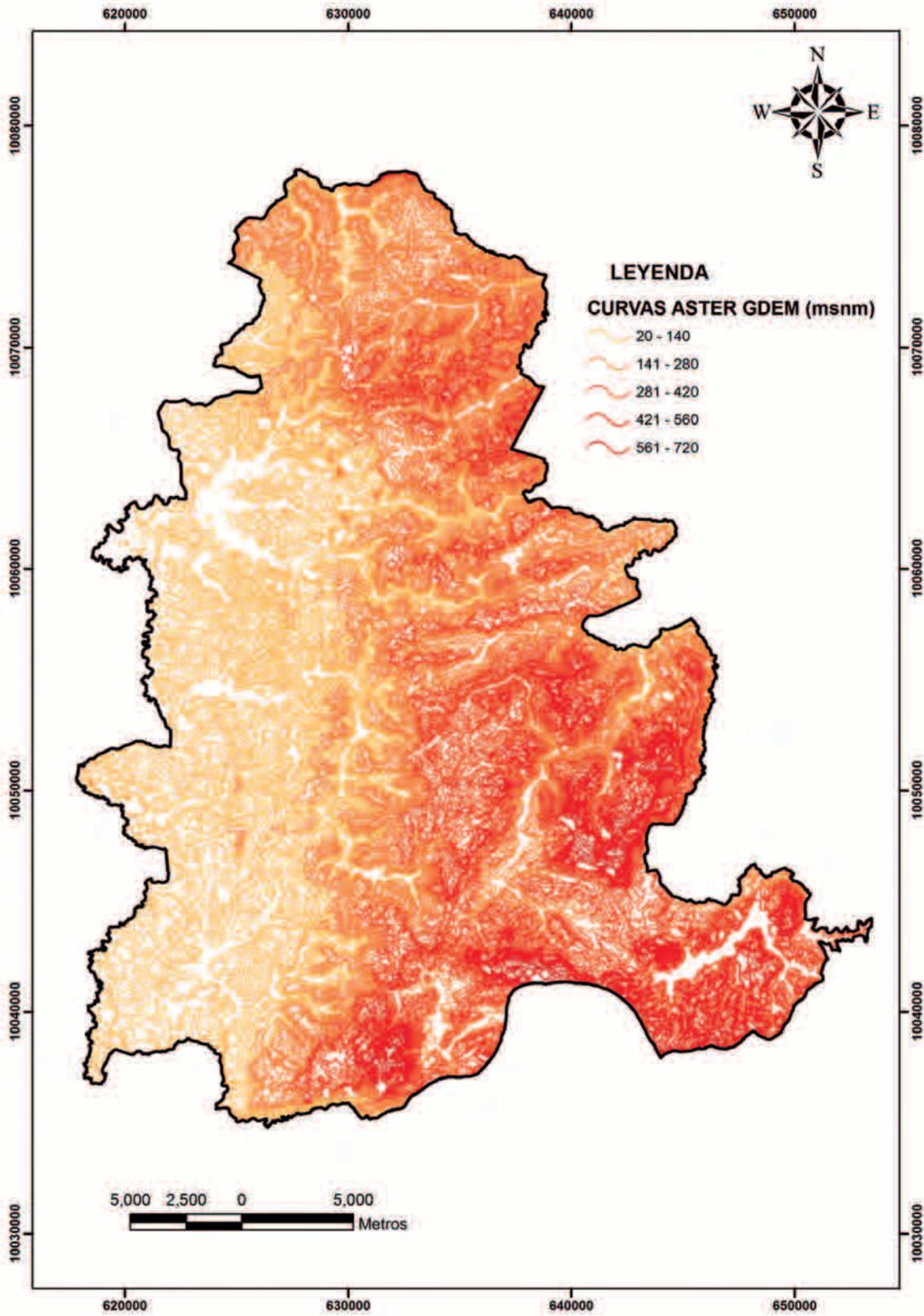


Figura 7. Curvas de nivel (msnm).

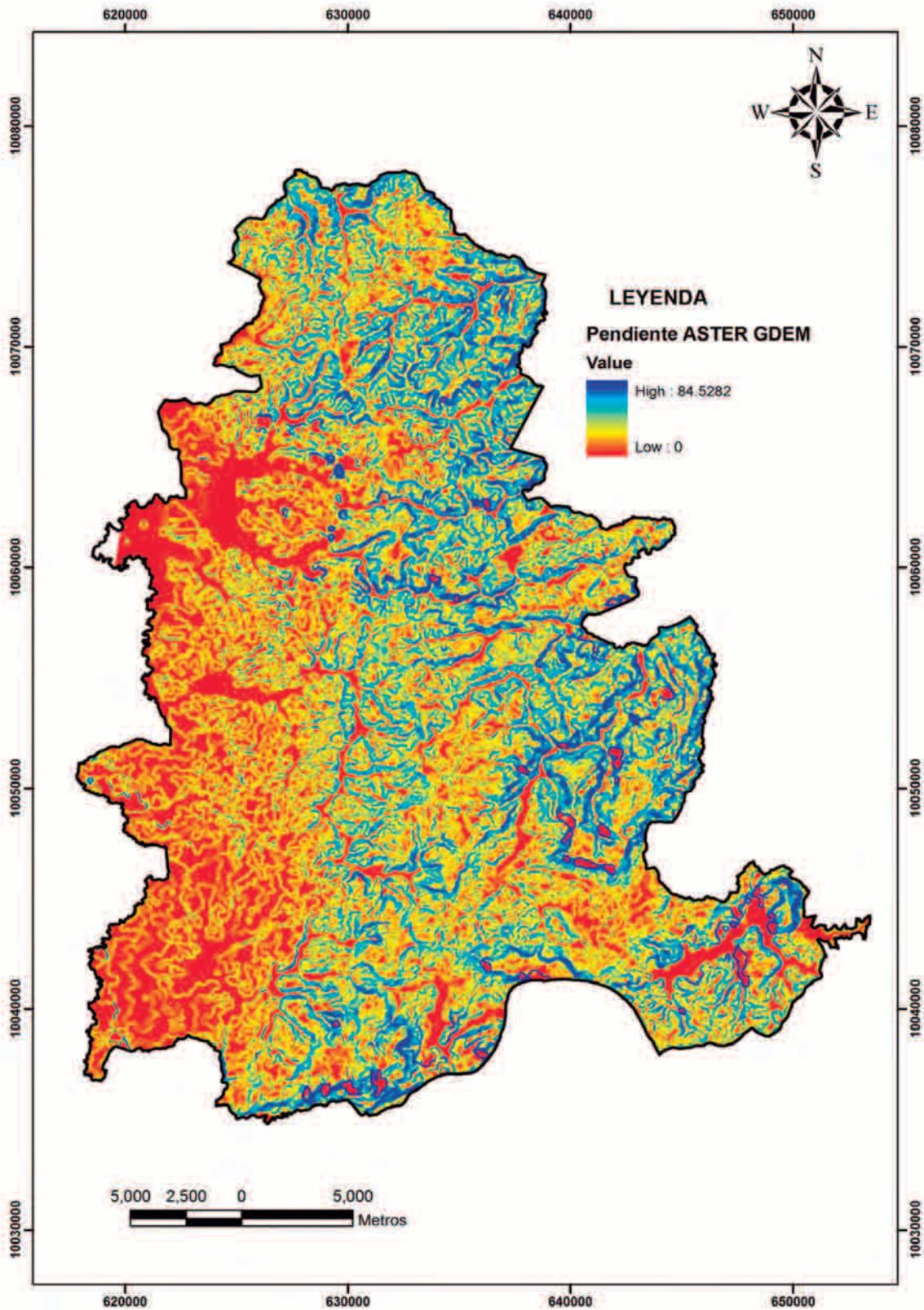


Figura 8. Mapa de pendientes en grados.

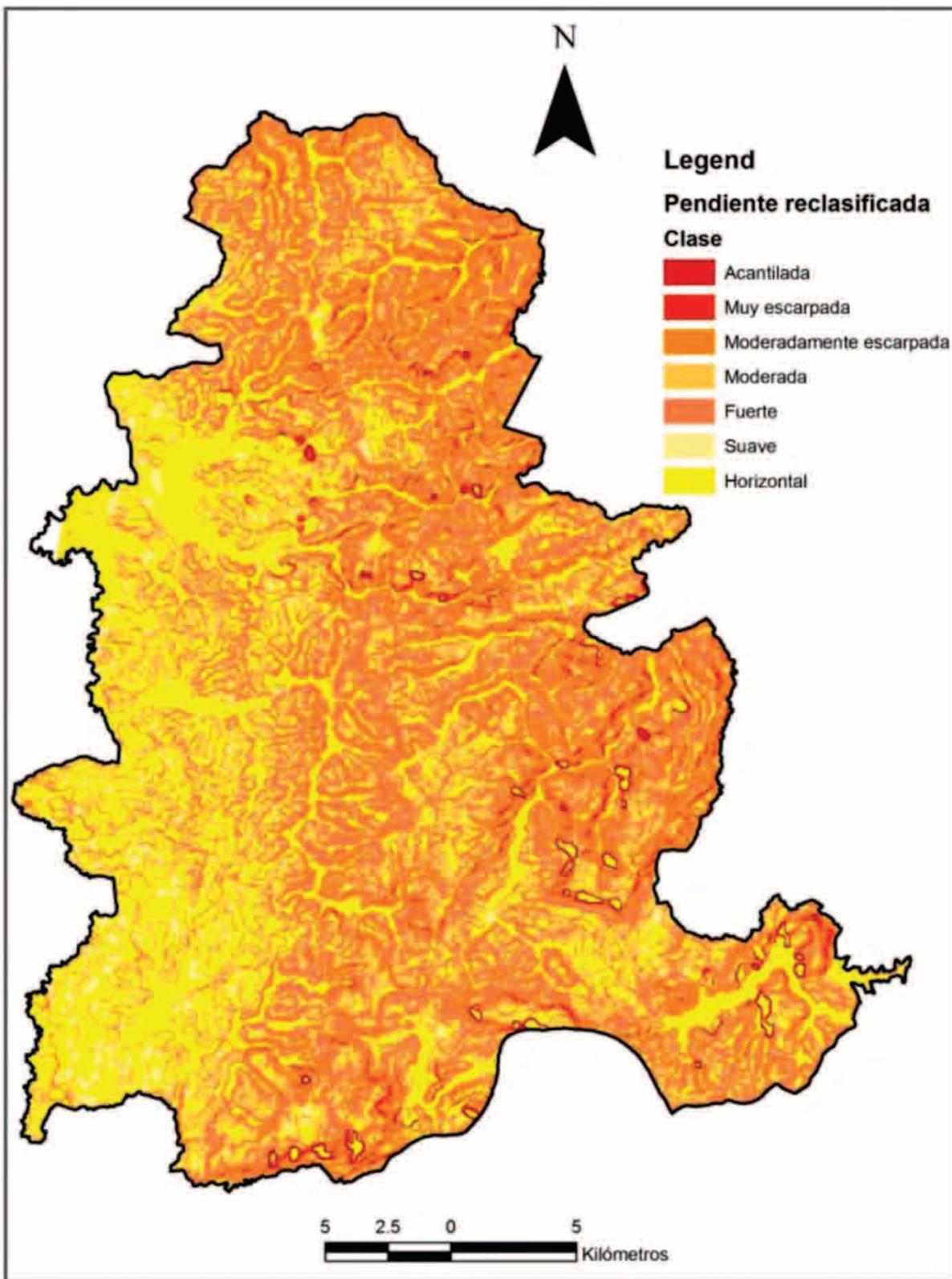


Figura 9. Mapa de pendientes reclasificadas en grados. Elaboración propia a partir de Fernández (2006)