10.15446/rcdg.v28n1.63130

Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía

Dinámica espaciotemporal de los procesos de desertificación y revegetalización natural en el enclave seco de La Tatacoa, Colombia

Carlos Andrés Rojas-Marín [1]
Uriel Pérez-Gómez [2]
Fernando Fernández-Méndez [3]

Resumen

En el desierto de La Tatacoa, la degradación del suelo y la pérdida de productividad son atribuidas a factores ambientales y antrópicos. En este artículo se evalúa la dinámica espaciotemporal de coberturas en un periodo no continuo de 23 años (1987-2001-2010) identificando áreas de pérdida y de recuperación de vegetación. Se aplicaron correcciones geométricas y radiométricas, además, se realizó un análisis cuantitativo aplicando clasificación supervisada a las imágenes Landsat. Las dinámicas espaciotemporales se identificaron a través de matrices de cambio y el índice Kappa. El análisis multitemporal mostró disminución de las áreas de suelos degradados (16,7%) y aumento de la cobertura vegetal (13,4%), lo que evidencia un proceso de recuperación a una tasa de 124 ha/año. Las áreas de vegetación natural estables y de mayor variación positiva de vegetación natural están localizadas en el norte, nororiente y oriente; la variación negativa se observa en la región adyacente al río Magdalena. Estos resultados son la base para nuevas investigaciones sobre los factores bióticos, abióticos y socioeconómicos que han generado la recuperación de áreas de vegetación natural en algunos sectores y la desertificación en otros, y se encaminan a plantear medidas sectorizadas como la restauración ecológica, los sistemas silvopastoriles y agroforestales acordes con la problemática social y ambiental en un contexto de cambio climático.

Palabras clave: bosque muy seco tropical, desertificación, índice Kappa, imágenes Landsat, matriz de transición, proceso de revegetalización.

Ideas destacadas: artículo de investigación sobre la dinámica de las coberturas en el enclave seco de la Tatacoa con aplicaciones sig a partir de imágenes Landsat para determinar el proceso de desertificación y la revegetalización natural que ha tenido lugar en un periodo de 23 años.

RECIBIDO: 6 DE MARZO DE 2017. | EVALUADO: 8 DE JUNIO DE 2018. | ACEPTADO: 31 DE OCTUBRE DE 2018.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Rojas-Marín, Carlos Andrés, Uriel Pérez-Gómez, y Fernando Fernández-Méndez. 2019. "Dinámica espaciotemporal de los procesos de desertificación y revegetalización natural en el enclave seco de La Tatacoa, Colombia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 28 (1): 134-151. doi: 10.15446/rcdg.v28n1.63130.

1 Universidad del Tolima, Ibagué - Colombia. ✉ carojasm@ut.edu.co – ORCID: 0000-0002-7181-9852.
2 Universidad del Tolima, Ibagué - Colombia. ✉ uperez@ut.edu.co – ORCID: 0000-0002-4656-9716.
3 Universidad del Tolima, Ibagué - Colombia. ✉ fmendez@ut.edu.co – ORCID: 0000-0001-8693-790X.

✉ Correspondencia: Fernando Fernández-Méndez, Laboratorio de Dendrología, Bloque 26-13, Universidad del Tolima, Ibagué - Colombia, Barrio Santa Helena Parte Alta, Código Postal 730006299.

Spatiotemporal Dynamics of the Processes of Desertification and Natural Revegetation in the Dry Enclave of La Tatacoa, Colombia

Abstract

Soil degradation and diminished production in the desert of La Tatacoa are attributed to both environmental and anthropic factors. This article assesses the spatiotemporal dynamics of soil coverage in a discontinuous period of 23 years (1987-2001-2010), identifying areas of loss and recovery of vegetation. Geometric and radiometric corrections were applied, in addition, a quantitative analysis was performed by applying supervised classification to Landsat images. Spatiotemporal dynamics were identified through change matrices and the Kappa index. Multitemporal analysis showed a decrease in the areas of degraded soils (16.7%) and an increase in vegetal coverage (13.4%), which evinces a recovery process of 124 ha/year. The areas of stable natural vegetation and of greatest positive variation in the vegetal coverage are located to the north, northeast, and east, while the negative variation can be observed in the region adjacent to the Magdalena river. These results serve as the basis for new research on the biotic, abiotic, and socioeconomic factors that have generated the recovery of natural vegetation areas in some sectors and desertification in others. They seek to contribute to the formulation of sectorized measures such as ecological restoration as well as silvopastoral and agroforestry systems in according to social and environmental issues in a context of climate change.

Keywords: very-dry tropical forest, desertification, Kappa index, Landsat images, transition matrix, revegetation processes.

Dinâmica espaço-temporal dos processos de desertificação e revegetação natural no enclave seco da Tatacoa, Colômbia

Resumo

No deserto da Tatacoa, a degradação do solo e a perda de produtividade são atribuídas a fatores ambientais e antrópicos. Neste artigo, avaliou-se a dinâmica espaço-temporal de cobertura em um período não contínuo de 23 anos (1987-2001-2010) e identificou-se áreas de perda e recuperação de vegetação. Foram aplicadas correções geométricas e radiométricas, além disso, foi realizado uma análise quantitativa aplicando uma classificação supervisionada às imagens Landsat. As dinâmicas espaço-temporais foram identificadas através de matrizes de mudança e do índice Kappa. A análise multitemporal mostrou uma diminuição nas áreas de solos degradados (16,7%) e um aumento na cobertura vegetal (13,4%), o que evidencia um processo de recuperação a uma taxa de 124 ha/ano. As áreas de vegetação natural estáveis e de maior variação positiva de vegetação natural estão localizadas no norte, nordeste e leste; a variação negativa é observada na região adjacente ao rio Magdalena. Esses resultados são a base para novas pesquisas sobre os fatores bióticos, abióticos e socioeconômicos que geraram a recuperação de áreas de vegetação natural em algumas áreas e de desertificação em outras, e são usados para propor medidas setorizadas, como a restauração ecológica, os sistemas silvopastoris e os agroflorestais de acordo com a problemática social e ambiental em um contexto de mudança climática.

Palavras-chave: floresta tropical muito seca, desertificação, índice Kappa, imagens Landsat, matriz de transição, processo de revegetação.

Introducción

En Colombia, el proceso de desertificación se ha hecho evidente en zonas que antes estaban cubiertas de vegetación y presentaban alta productividad agrícola, como Villa de Leyva en el departamento de Boyacá, la cuenca alta del río Chicamocha, la Sabana de Bogotá, la región del Patía y el área de influencia del desierto de la Tatacoa (MAVDT 2005). En estas zonas se espera una pérdida mayor de materia orgánica y una posterior mineralización de los suelos en los ecosistemas secos con respecto a los húmedos (IDEAM et ál. 2002).

Dentro de los ecosistemas secos se encuentra el desierto de La Tatacoa (Figueroa-C. y Galeano 2007), el cual presenta fuertes procesos erosivos que muestran una tendencia a la desertificación y que son atribuidos a factores como las intensas precipitaciones concentradas en pocos días durante el año, los desplazamientos de masas de aire seco y los suelos bastante erodables. Por otro lado, factores antrópicos, como la destinación de suelos a la producción intensiva de rumiantes, limitan el desarrollo de la cobertura vegetal y aceleran el proceso de desertificación haciendo más vulnerables los suelos (Olaya Amaya, Sánchez Ramírez y Acebedo 2001).

De este modo, el proceso de desertificación y la pérdida del recurso del suelo responden a relaciones multicausales complejas de carácter biótico, biofísico y social (Abraham 2003; Abraham, Fusari y Salomón 2005). No obstante, aunque la teledetección nos permite acercarnos al análisis y cuantificación del comportamiento espacial del fenómeno de desertificación a escala general, ahondar en la comprensión de sus factores causales determinantes es una tarea que dejaremos para investigaciones posteriores; en este estudio nos concentramos en el potencial de las herramientas de la teledetección para el análisis de la dinámica espaciotemporal de paisajes con tendencia a la desertificación. La teledetección aumenta la capacidad para seguir procesos ambientales dinámicos, porque gracias a la tecnología satelital es posible obtener datos sobre el planeta Tierra desde una órbita estable y repetitiva (Chuvieco 1998; Johnson 1990), lo que permite detectar cambios en la cobertura del suelo en ecosistemas áridos vulnerables principalmente a causa de actividades humanas (Flórez Sánchez y Yool 2007).

De manera que la teledetección y los sistemas de información geográfica —en adelante, SIG— han sido usados en diversos estudios vinculados con la variación espaciotemporal del paisaje (Carlotto 1997; Coppin y Bauer 1996; Jianya et ál. 2008; Lu, Brondízio y Moran 2004; Renolen 1997; Singh 1989; Turner 1990) y en estudios sobre cambio climático, deforestación y desertificación (Johnson 1990; Marín Valencia et ál. 2018) points, lines, polygons. Estas aplicaciones han sido posibles en virtud de la amplia disponibilidad de imágenes pasadas y presentes, provenientes de sensores remotos, que han permitido analizar los cambios en elementos ambientales y el impacto de las actividades humanas a través de las décadas (Jianya et ál. 2008). Otros análisis espaciotemporal son descritos en Siabato et ál. (2018).

El uso de imágenes Landsat para comparar imágenes clasificadas es una de las técnicas de detección de cambios más utilizadas para evaluar la dinámica del proceso de desertificación (Flores Sánchez y Yool 2007; Hadeel, Jabbar y Chen 2010a, 2010b, 2011; Joseph, Gbenga y Langyit 2018; Liang et ál. 2010; Tsuchiya et ál. 2010; Xu et ál. 2009; Zhenqi, Xianlei y Danqing 2008). Aunque en Colombia se han realizado estudios de dinámica espaciotemporal a partir de imágenes de sensores remotos (Armenteras, Gast y Villareal 2003; Etter et ál. 2005, 2006; Salvatierra y Pérez 1997; Sánchez-Cuervo et ál. 2012; Santana y Salas 2007), los estudios sobre la dinámica de coberturas en el desierto de La Tatacoa son escasos (Hermelin 2016; Imbol 2014; Ortiz Palma y Mayor Polania 2013), en especial los estudios de cuantificación del proceso de desertificación o recuperación natural de coberturas con SIG e imágenes satelitales, que aporten cifras donde se muestre el cambio de cobertura en el tiempo; solamente se cuenta con un estudio de cuantificación de desertificación en la región de La Tatacoa para el periodo 1975-1993 (Ortiz Palma y Mayor Polania 2013).

Ahora bien, dada la necesidad de cuantificar la desertificación y la dinámica de la cobertura, para el desarrollo de este estudio nos propusimos los siguientes objetivos: 1) Evaluar la estabilidad de las coberturas del suelo en el enclave seco de la Tatacoa, y 2) Identificar las áreas donde se hace evidente la pérdida o recuperación de vegetación natural y su variación espacial en el tiempo. Mediante estos objetivos pretendemos contribuir al conocimiento cuantitativo de la dinámica del proceso de desertificación en el enclave seco de la Tatacoa y su área de influencia en un periodo de 23 años, considerando datos de los años 1987, 2001 y 2010, con el fin de brindar indicadores de dinámica de áreas reales de cobertura, que aporten a la formulación de estrategias y a la toma de decisiones de manejo y recuperación para mitigar el proceso de desertificación en esta zona.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde al desierto de La Tatacoa y su zona de influencia, propuesta en el plan de manejo de La Tatacoa (Figueroa-C. y Galeano 2007; Gobernación del Huila, CAM y Universidad Surcolombiana 2010, 2015). Esta área tiene una extensión aproximada de 56.560 ha, 90% en el municipio de Villavieja y 10% en Baraya. Se ubica al norte del departamento del Huila (Colombia), y está enmarcada en el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS, Colombia Bogotá (EPSG: 3116): Min X 870.833–Min Y 838.511 y Max X 896.746–Max Y 871.723 (figura 1).

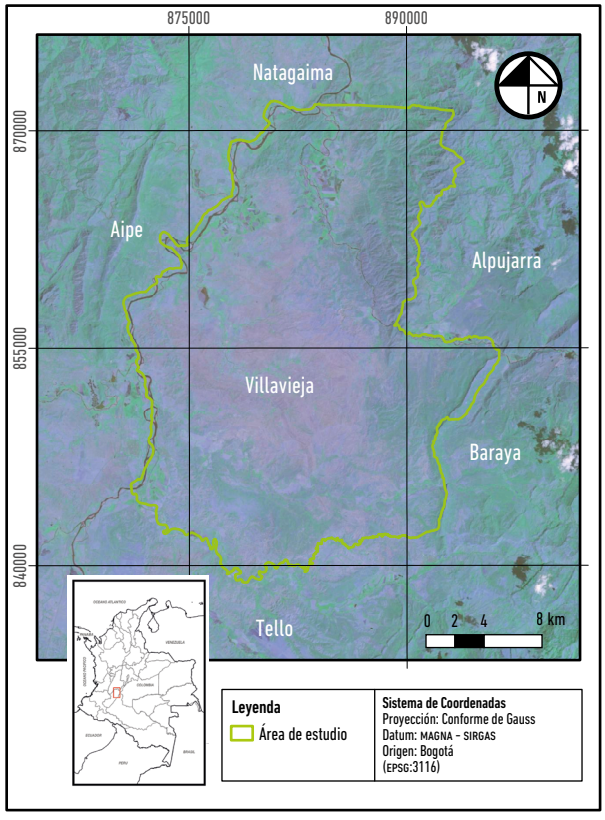

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio: área natural protegida del desierto de La Tatacoa.
Datos: imagen Landsat TM5, composición RGB 321, enero de 2010 (NASA–USGS 2010); límite del área natural protegida del desierto de La Tatacoa (Gobernación del Huila, CAM y Universidad Surcolombiana 2010).

La zona de vida corresponde a bosque seco tropical (bs-T) y bosque muy seco tropical (bms-T), con provincias subhúmedas y semiáridas, respectivamente. La elevación promedio es de 350 m.s.n.m. y hacia la parte noreste, puede alcanzar 1.000 m.s.n.m.; la temperatura media de 28 °C y la precipitación anual de 1.190 mm distribuidos en dos temporadas de lluvias, febrero-mayo y octubre-diciembre (Olaya Amaya, Sánchez Ramírez y Acebedo 2001). El área no se considera propiamente un desierto sino una zona árida (Hermelin 2016), tal como lo muestra su *índice de aridez* que se ubica entre 30 y 40 (Ortiz Palma y Mayor Polania 2013).

Selección de imágenes e información auxiliar

Para llevar a cabo la selección de las imágenes, tuvimos en cuenta tres criterios: 1) que fueran de libre acceso y amplia oferta temporal; 2) que correspondieran a la misma época del año, lo cual es crucial en los análisis multianuales (Chuvieco 2010; Coppin et ál. 2004) y 3) que presentaran una amplia visión de la zona de estudio y estuvieran libres de nubes. A partir de los criterios de selección obtuvimos mediante el servidor GloVis (USGS 2017), tres imágenes del satélite Landsat (NASA–USGS 2010), sensor TM5, PAT/ROW 008-058, de 8 febrero de 1987, 14 de febrero de 2001 y 22 de enero de 2010, con seis bandas espectrales (no se consideró la banda 6, termal) y tamaño de píxel de 30 m. Las imágenes cubren un intervalo de 23 años de la primera época seca del año en la región de La Tatacoa, correspondiente a los meses de enero y febrero, con un promedio de precipitación mensual multianual de 73 y 85 mm, respectivamente. Los datos auxiliares incluyen una cartografía base en formato vectorial de drenajes, vías y centros poblados, a escala 1:25.000 de los municipios de Villavieja y Baraya, elaborada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IDEAM 2010). También se consideró una cartografía de conflictos de uso del suelo, unidades de manejo y cuencas hidrográficas (Gobernación del Huila, CAM y Universidad Surcolombiana 2010).

Pre-procesamiento

En primer lugar, se cambiaron los niveles digitales —en adelante, ND— de las imágenes que no sean producto de cambios reales en la cubierta. Esto implica asegurar que, en cada caso, los pixeles de las imágenes estén situados en la misma zona y que la variable que se esté comparando se refiera a la misma escala de medida (Chuvieco 2010; Jianya et ál. 2008; Lu et ál. 2004; Song et ál. 2001) ya que para ejecutar una comparación temporal se debe llevar a cabo tanto una corrección geométrica como radiométrica, las cuales tienen como fin, homogenizar en los niveles espacial y temporal la información de las imágenes (Coppin y Bauer 1996).

Corrección geométrica

Se utilizó el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS, Colombia Bogotá (EPSG: 3116). En la primera etapa se recolectaron, a partir de Global Navigation Satellite Systems —en adelante, GNSS—, 18 puntos de control en campo, bifurcaciones e intersecciones de vías y puentes sobre drenajes, que se combinaron con puntos comunes en la imagen de 2010 y en el mapa de drenajes. En total, se localizaron 102 puntos de control terrestre en la imagen de 2010. Posteriormente, se ajustaron los valores de las coordenadas al sistema de referencia mapa-imagen, usando el cálculo de polinomios de primer grado. A continuación, se transfirieron los ND a las coordenadas cartográficas establecidas, para lo cual se eligió el método del vecino más próximo que supone menor transformación de los ND originales (Chuvieco 2010). Una vez finalizada la corrección geométrica de la imagen de 2010, que arrojó un tamaño de píxel de 29,98 m, se corrigieron geométricamente las imágenes de 1987 y 2001 con 105 y 104 puntos, respectivamente, utilizando el mismo método. La exactitud general de la corrección geométrica se obtuvo a partir del "error medio cuadrático" o valor Sigma.

Corrección atmosférica

Se pretende convertir los ND de cada pixel a valores de reflectividad, una variable física dada por la relación entre la energía reflejada e incidente (Chuvieco 2010).Este procedimiento consiste en convertir los ND a valores de radiancia, a partir de coeficientes de calibración del sensor registrado (Chander y Markham 2003), para, posteriormente, estimar los valores de reflectividad aparente, con base en la información de las condiciones de adquisición de la imagen, como la fecha de adquisición, el ángulo cenital y la irradiancia solar.

Sin embargo, para conocer la reflectividad real de la cubierta sin el sesgo ocasionado por aspectos atmosféricos, es preciso considerar en el cálculo la transmisividad de la atmosfera (descendente y ascendente) y la radiancia atmosférica debida a la dispersión, lo cual se realiza según el método de Gilabert, Conese, y Maselli (1994)y, teniendo en cuenta el día en el calendario juliano y el seno, se asume que toma los valores del ángulo en radianes (Chuvieco 2010). Los detalles del procesamiento de esta corrección y los valores hallados para esta se detallan con todas las constantes y cálculos matemáticos en Rojas-Marín (2013).

Clasificación digital de las imágenes

La cobertura de la zona de estudio consta principalmente de siete clases generales que pertenecen al tercer nivel de la nomenclatura del sistema de clasificación *Corine Land Cover*, adaptada para Colombia-CLC Colombia (IDEAM 2010). Estas siete clases son: tierras desnudas o degradadas, pastos naturales, tejido urbano continuo, mosaico de cultivos, ríos, bosque natural fragmentado, y arbustos y matorrales. Para este estudio, las categorías bosque natural fragmentado y arbustos y matorrales se consideran una sola categoría, debido a que el objetivo es evaluar la dinámica de la vegetación natural de manera general y no en el caso particular de estas dos clases.

De igual manera, la categoría de pastos naturales fue incluida en tierras desnudas o degradadas porque estas dos categorías se encuentran asociadas espacialmente, ya que las áreas de pastos en esta zona son producto de procesos de degradación o sabanización (Gobernación del Huila, CAM y Universidad Surcolombiana 2010). Asimismo, en comparación con las demás categorías, pastos naturales es poco diferenciable de los suelos desnudos o degradados, debido a que, en la zona, este tipo de vegetación se hace evidente de manera esporádica en las temporadas de lluvia, pero, una vez estas han finalizado, se seca rápidamente o es consumida por rumiantes, de manera que, la mayor parte del año el suelo permanece descubierto o con muy poca vegetación.

Se seleccionaron áreas de entrenamiento de cada clase para llevar a cabo la clasificación digital de las imágenes, mediante el método supervisado (Chuvieco 2010). Antes de realizar la clasificación digital, se hizo un análisis de las signaturas espectrales de las bandas, a partir de las áreas de entrenamiento para cada una de las clases, teniendo como referencia la imagen de 2010, con el fin de explorar la separabilidad real de las categorías seleccionadas y evaluar si esas categorías podían clasificarse sin error. Posteriormente, se optó por realizar máscaras por interpretación visual, digitalizando en pantalla las categorías *ríos,* cultivos y centros poblados, las cuales son distinguibles visualmente en la composición de color 7-4-3.

Para el proceso de asignación o clasificación automática, se utilizó la función probabilística de máxima verosimilitud, que, según Chuvieco (2010), es la más empleada en teledetección, por su robustez y por ajustarse con mayor rigor a la disposición original de los datos. Así mismo, por la presencia de una pequeña cantidad de nubes en las imágenes de 1987 y 2001 que cubrían parte del área de estudio en un 3,3 y 1,6%, respectivamente, se realizaron m*á*scaras por interpretación visual en las bandas 1 y 7 de cada escena, con el fin de eliminarlas del posterior análisis. El proceso automático de clasificación se realizó únicamente para

las categorías suelo desnudo y vegetación natural, y al producto se le añadieron las máscaras de las otras coberturas y las nubes. Por último, la confiabilidad de la clasificación automática fue analizada mediante una matriz de confusión, la cual se construyó mediante un listado de 25 puntos de verificación, para los que se conocía la cobertura real tomada con GNSS en campo y la deducida por la clasificación. A partir de la matriz de confusión, se calculó el índice Kappa (*k*), que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar (Chuvieco 2010).

Análisis multitemporal

A partir de la superposición de los mapas de cobertura de cada fecha, se construyeron tres matrices de transición multitemporales para los intervalos 1987-2001, 2001-2010 y 1987-2010. En la diagonal de estas matrices aparecen las áreas estables, mientras los cambios se detectan en el resto de las celdas. El grado de cambio entre fechas fue medido luego con el índice Kappa (*k*) (para una revisión de métodos, ver Congalton 1991), que permite medir el acuerdo entre filas y columnas. De acuerdo con este índice, entre más alto sea el valor, mayor es la estabilidad (Chuvieco 2010). El pre-procesamiento, el procesamiento, el análisis de las imágenes, la estructuración de las bases de datos geográficas, y su posterior análisis y modelización, se llevaron a cabo en el software ILWIS 3.3 (ITC 2005).

Resultados

Correcciones y clasificación de coberturas

Los valores de corrección geométrica fueron de 0,335, 0,478 y 0,421 pixeles para las imágenes de 1987, 2001 y 2010, respectivamente, con errores de 10,04, 14,33 y 12,62 m. Los valores medios de las tendencias espectrales presentan un comportamiento similar en cada tipo de cobertura, tejido urbano, mosaico de cultivos, tierras desnudas o degradadas y ríos (figura 2). Los ríos se diferencian de las demás en los valores que corresponden a las bandas del infrarrojo. Únicamente la vegetación natural mostró diferencias en los valores medios con respecto a las otras categorías (tabla 1).

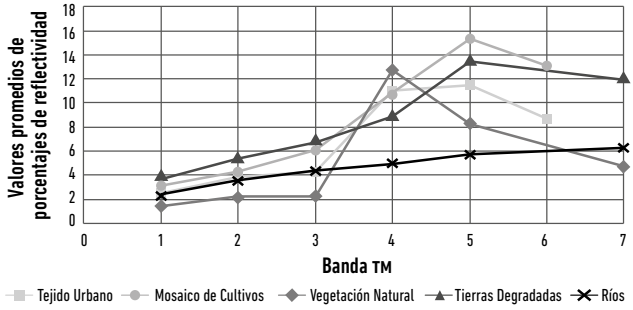

Figura 2. Signaturas espectrales para las categorías seleccionadas.

En 23 de 25 puntos de referencia se produce un acuerdo entre las dos fuentes, que se traduce en una fiabilidad global de la clasificación del 92%. La confusión entre coberturas se registra en puntos de vegetación natural —en adelante, Vn— que fueron incluidos como tierras desnudas o degradas. Lo que significa que 9 de cada 10 zonas clasificadas como vegetación natural realmente lo son. La exactitud del usuario es de un 87% y el error por comisión es del 13%. Por otro lado, el 100% de los puntos de tierras desnudas o degradadas (Tdd) fue incluido en la clasificación, es decir, el error por comisión es del 0%. Mientras que, para la Vn, el error por omisión es del 17% y la exactitud del productor es del 83%. En general, para toda la clasificación el índice Kappa es de 0,84 (tabla 2).

Tabla 1. Valores promedios (*x*) y desviación estándar (*σ*) de porcentaje de reflectividad de las áreas de entrenamiento por categoría

Banda TM	Tejido Urbano		Mosaico de cultivos		Vegetación natural		Tierras desnudas o degradas		Ríos	
	x	*σ*	*x*	*σ*	*x*	*σ*	*x*	*σ*	*x*	*σ*
1	2,51	0,87	3,09	0,72	1,44	0,40	3,71	0,70	2,42	0,91
2	3,83	1,33	4,32	1,05	2,20	0,71	5,36	1,02	3,60	1,40
3	4,31	1,80	6,12	1,27	2,25	0,96	6,69	1,19	4,41	1,90
4	11,07	1,89	10,84	2,23	12,73	3,97	8,86	1,50	4,97	3,14
5	11,45	2,80	15,33	2,49	8,26	2,59	13,43	2,32	5,75	3,95
7	8,72	3,40	13,07	2,74	4,72	1,93	11,96	2,09	6,24	3,89

Tabla 2. Matriz de confusión obtenida para la clasificación supervisada de la imagen Landsat 5 tm del 2010

Clasificación	Vegetación natural	Tierras degradadas	Total	Exactitud usuario	Error comisión
Vegetación natural	**10**	0	10	100	0
Tierras degradadas	2	**13**	15	87	13
Total	12	13	**25**	-	-
Exactitud productor	83	100	-	-	-
Error omisión	17	0	-	-	-

Nota: acuerdo observado (0,92); acuerdo esperado (0,5); índice Kappa (0,84).

Tabla 3. Área total y porcentaje de ocupación de cada clase de cobertura del suelo en La Tatacoa, en los años 1987, 2001 y 2010

Clase	Año					
	1987		2001		2010	
	ha	%	ha	%	ha	%
Tierras degradadas	31.183,61	57,81	28.588,86	53,00	26.716,75	49,53
Vegetación natural	18.493,54	34,28	19.520,96	36,19	21.347,86	39,58
Mosaico de cultivos	3.442,05	6,38	5.003,35	9,28	5.069,05	9,40
Ríos	694,50	1,29	692,08	1,28	669,07	1,24
Tejido urbano	127,72	0,24	136,17	0,25	138,68	0,26
Total	**53.941,42**	**100**	**53.941,42**	**100**	**53.941,42**	**100**

Tabla 4. Variación de las coberturas en hectáreas y porcentaje en los tres intervalos de tiempo

Clase	2001-1987		2010-2001		2010-1987	
	ha	%	ha	%	ha	%
Tierras degradadas	-2.594,75	-8,32	-1.872,11	-6,55	-4.466,86	**-14,32**
Vegetación natural	1.027,42	5,56	1.826,90	9,36	2.854,32	15,43
Mosaico de cultivos	1.561,31	45,36	65,70	1,31	627,01	**47,27**
Ríos	-2,43	-0,35	-23,01	-3,32	-25,44	-3,66
Tejido urbano	8,45	6,62	2,52	1,85	10,97	8,59

Cambios de cobertura del suelo en los años de estudio

Durante los tres periodos evaluados, la clase predominante en La Tatacoa, es tierras desnudas o degradadas, con un 57,81, 53,0 y 49,53% en 1987, 2001 y 2010, respectivamente. Seguida por vegetación natural con 34,28, 36,19 y 39,58%. A su vez, mosaico de cultivos ocupa el tercer lugar con 6,38, 9,28 y 9,4%. Los ríos se encuentran en el cuarto lugar con 1,29, 1,28 y 1,24% y tejido urbano ocupó el último lugar con 0,24, 0,25 y 0,26% (tabla 3 y figura 3).

En cuanto a la variación espacial de las coberturas durante el periodo analizado, la mayor variación negativa es la de tierras desnudas o degradadas, con una fluctuación de -14,32%, es decir, la categoría perdió 4.466,86 ha en el intervalo de 1987 a 2010. La variación más significativa de este periodo corresponde al intervalo que va de 1987 a 2001, con un descenso del 8,32%.

Entre 1987 y 2010, la vegetación natural aumento el 15,43%, cifra equivalente a 2.854,32 ha. Entre 2001 y 2010 aumentó 1.826,9 ha (9,36%). Un 3,66%, es decir 25,44 ha, de los ríos se transformaron principalmente en vegetación natural, El mayor cambio tuvo lugar en el periodo 2001-2010 con un 3,32%. La categoría tejido urbano ha incrementado un 8,59% durante los 23 años de estudio y el mayor incremento de tejido urbano tuvo lugar durante los años 1987 y 2001, con un 6.62% (tabla 4).

En el periodo de tiempo estudiado, la variación de coberturas más importante la presentó la categoría mosaico de cultivos, con un total de 1.627,32 ha para un 47,27% de incremento. Esta variación ocurrió en su mayor parte durante los años que van de 1987 a 2001, intervalo en el cual los cultivos incrementaron un 45,36% (figura 4).

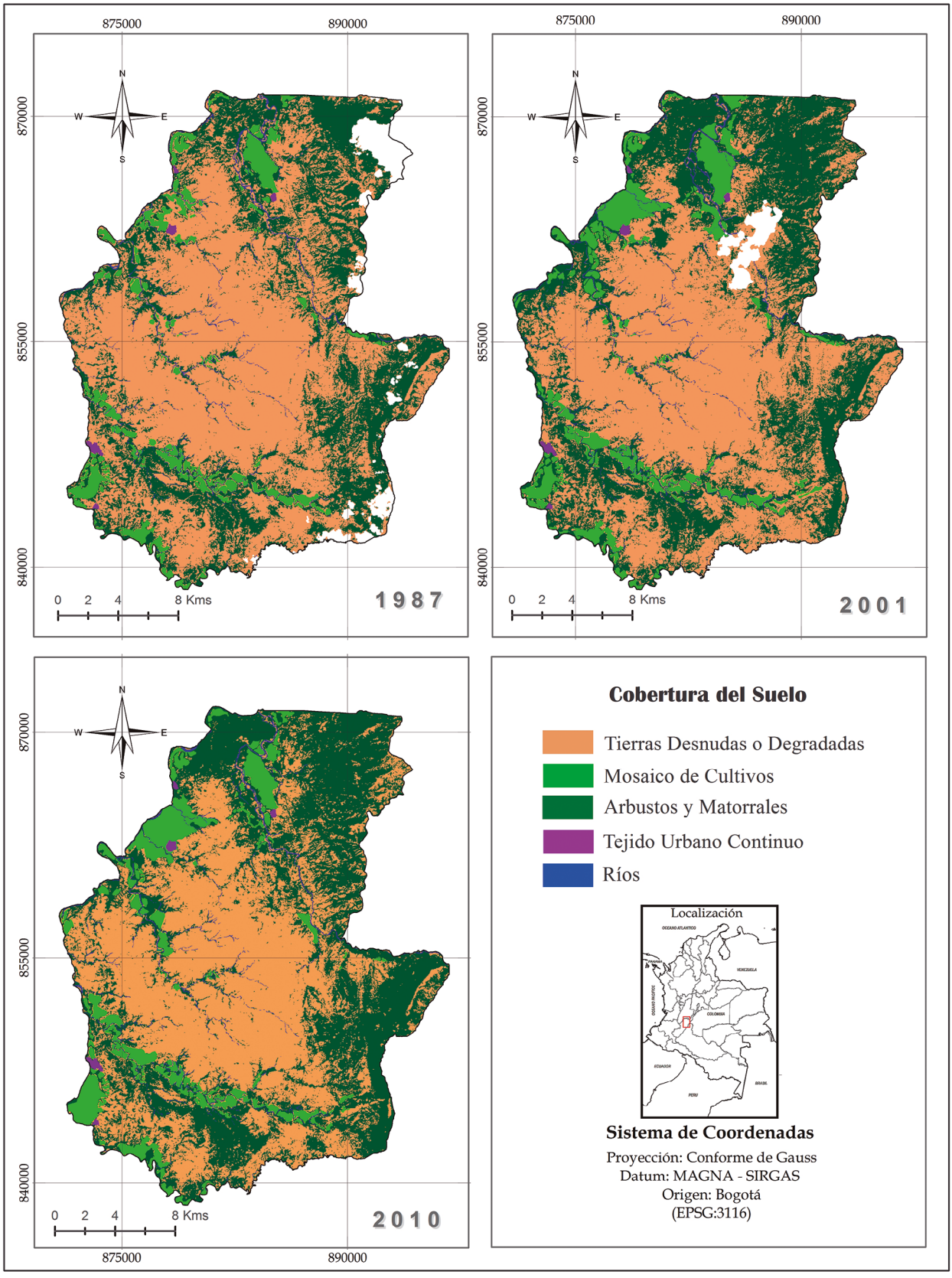

Figura 3. Cobertura del suelo de La Tatacoa en los años 1987, 2001 y 2010.

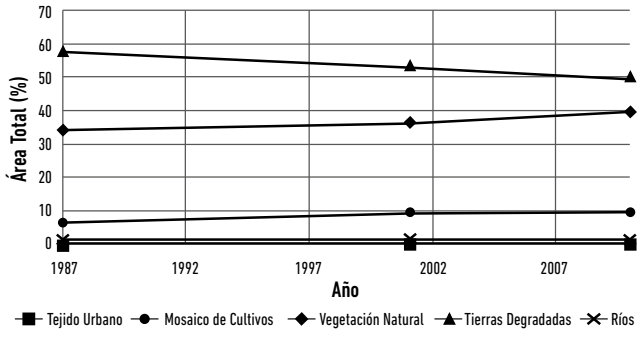

Figura 4. Dinámica de cambio en las categorías de cobertura en los tres años evaluados.

En cuanto a la categoría que muestra la dinámica de la desertificación, se aprecia que las áreas estables de las tierras desnudas o degradadas se ubican principalmente en el centro y en el sur del área de estudio (figura 5, anexos 1 y 2). La mayor dinámica de esta cobertura se encuentra en las zonas limítrofes, especialmente en el occidente en límites con el río Magdalena, al norte con el municipio de Natagaima y al oriente en límites con Baraya, en donde se hace más evidente la disminución de esta categoría.

Las áreas de vegetación natural más estables se aprecian principalmente en la zona norte en los límites de Villavieja con los municipios de Natagaima, en el nororiente con el municipio de Alpujarra y al oriente en límites con Baraya en la región que corresponde a la formación montañosa denominada Cuchilla del Salteren que es compartida con el municipio de Baraya (figura 6). En estas zonas se aprecia también la mayor variación positiva de la categoría y la variación negativa se halla especialmente en la región adyacente al río Magdalena y las áreas que corresponden a las veredas La Victoria, en el norte, y La Chivera, en el sur.

Dinámica de cambios del periodo 1987-2001

La mayor transición que tuvo lugar durante este periodo es de tierras desnudas o degradadas a vegetación natural, con 5.080,68 ha. La transformación de vegetación natural a tierras desnudas o degradadas con 3.307,71 ha está en el segundo lugar. La ganancia de la clase mosaico de cultivos se dio por la transición a vegetación natural y tierras desnudas o degradadas con 839,65 y 792,63 ha, respectivamente. La clase ríos, por su parte, muestra una pérdida de 109,22 ha que se transformó en vegetación natural y 21,58 ha a mosaico de cultivos. Por último, la clase tejido urbano se incrementó a partir de las tierras desnudas o degradadas por 7,19 ha y la vegetación natural por 1,62 ha (tabla 5).

Dinámica de cambios del periodo 2001-2010

En este periodo continúa la tendencia observada de 1987 a 2001: nuevamente, hubo una mayor transición de las tierras desnudas o degradas a la vegetación natural con 4.344,32 ha. La transición de la vegetación natural a las tierras desnudas o degradadas, con 2.611,36 ha, constituye la segunda mayor. La clase mosaico de cultivos se incrementó a partir de la vegetación natural en 541,91 ha, pero, en este mismo periodo, perdió, respecto de esta misma clase, 620,57 ha, y de la clase tierras desnudas o degradadas ganó 479,7 ha, pero disminuyó 317,79 ha. Por otro lado, los ríos ganan hectáreas de la clase vegetación natural (110,57 ha), tierras desnudas o degradadas (21,76 ha) y mosaico de cultivos (27,69 ha); no obstante, las hectáreas perdidas con estas mismas clases superan las ganadas con 127,3, 45,58 y 10,16 ha, respectivamente (tabla 6).

Tabla 5. Matriz temporal de cambios en hectáreas de las clases de cobertura del suelo de La Tatacoa en el intervalo 1987-2001

Cobertura	Vegetación natural	Tierras degradadas	Mosaico de cultivos	Ríos	Tejido urbano	Total 2001
Vegetación natural	**14.280,21**	5.080,68	54,75	109,22	0,00	19.524,86
Tierras degradadas	3.307,71	**25.254,06**	11,24	21,58	0,00	28.594,59
Mosaico de cultivos	839,65	792,63	**3.367,31**	4,76	0,00	5.004,35
Ríos	68,05	55,29	9,44	**559,44**	0,00	692,21
Tejido urbano	1,62	7,19	0,00	0,00	**127,39**	136,20
Total 1987	18.497,24	31.189,85	3.442,73	695,00	127,39	**53.952,21**

Nota: acuerdo observado (0,80); acuerdo esperado (0,44); índice Kappa (0,65).

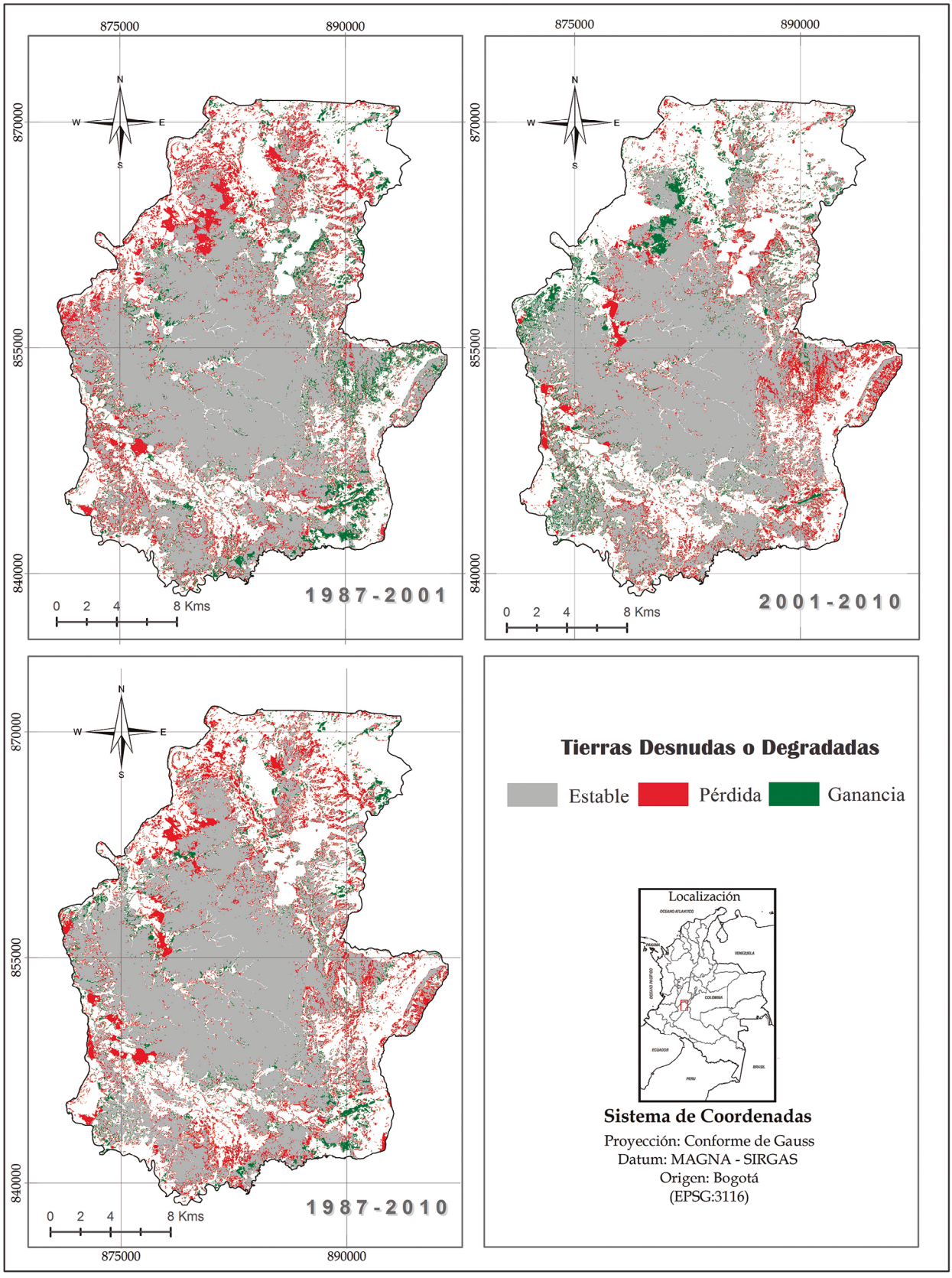

Figura 5. Dinámica espaciotemporal de la categoría tierras desnudas o degradadas en La Tatacoa.

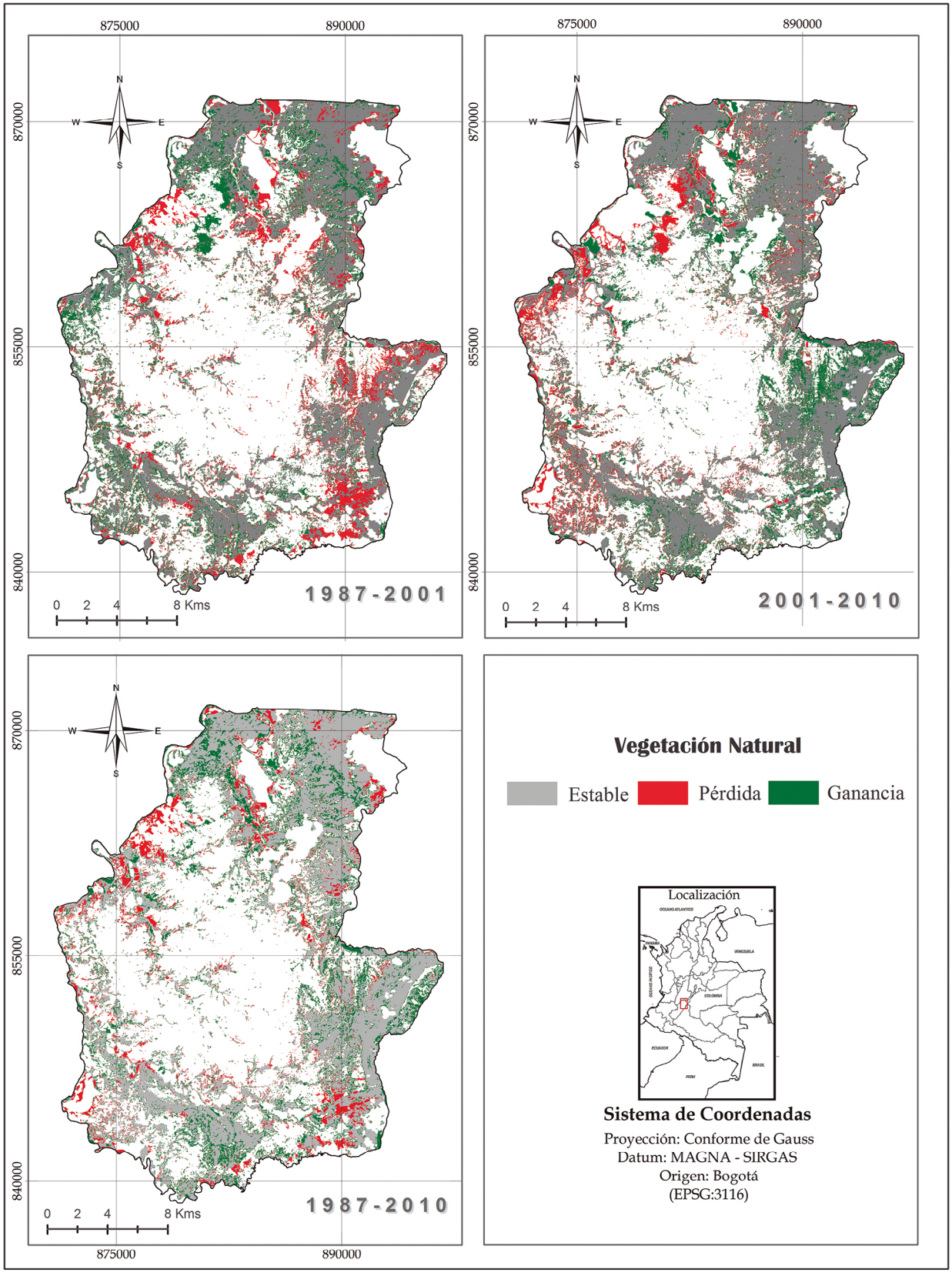

Figura 6. Dinámica espaciotemporal de la categoría vegetación en La Tatacoa.

Tabla 6. Matriz temporal de cambios en hectáreas de las clases de cobertura del suelo de La Tatacoa en el intervalo 2001-2010

Cobertura	Vegetación natural	Tierras degradadas	Mosaico de cultivos	Ríos	Tejido urbano	Total 2010
Vegetación natural	**16.259,95**	4.344,32	620,57	127,30	0,00	21.352,13
Tierras degradadas	2.611,36	**23.747,37**	317,79	45,58	0,00	26.722,10
Mosaico de cultivos	541,91	479,70	**4.038,31**	10,16	0,00	5.070,07
Ríos	110,57	21,76	27,69	**509,18**	0,00	669,20
Tejido urbano	1,08	1,44	0,00	0,00	**136,20**	138,71
Total 2001	19.524,86	28.594,59	5.004,35	692,21	136,20	**53.952,21**

Nota: acuerdo observado (0,82); acuerdo esperado (0,41); índice Kappa (0,70).

Tabla 7. Matriz temporal de cambios en hectáreas de las clases de cobertura del suelo de La Tatacoa en el intervalo 1987-2010

Cobertura	Vegetación natural	Tierras degradadas	Mosaico de cultivos	Ríos	Tejido urbano	Total 2010
Vegetación natural	**15.544,00**	5.451,15	210,18	146,80	0,00	21.352,13
Tierras degradadas	1.938,74	**24.625,86**	120,91	36,59	0,00	26.722,10
Mosaico de cultivos	915,43	1.048,84	**3.094,83**	10,97	0,00	5.070,07
Ríos	97,18	54,57	16,81	**500,64**	0,00	669,20
Tejido urbano	1,89	9,44	0,00	0,00	**127,39**	138,71
Total 1987	18.497,24	31.189,85	3.442,73	695,00	127,39	**53.952,21**

Nota: acuerdo observado (0,81); acuerdo esperado (0,43); índice Kappa (0,67).

Dinámica de cambios en el periodo 1987-2010

De manera general, en este periodo se observan todas las transiciones ocurridas en La Tatacoa en un periodo de 23 años. La mayor transición se dio de tierras desnudas o degradadas a vegetación natural con 5.451,15 ha, seguida por la transición inversa entre estas dos mismas categorías, con 1.938,74 ha. Otras transiciones importantes se presentan desde tierras desnudas o degradadas y vegetación natural a la categoría mosaico de cultivos, con 1.048,84 y 915,43 ha, respectivamente. En la clase ríos se presentan transiciones importantes, de esta categoría, 146,8 ha pasaron a ser vegetación natural, 36,59 ha cambiaron a tierras desnudas o degradadas y 10,97 ha a mosaico de cultivos. En cuanto a la cantidad de hectáreas ganadas, menor que las perdidas, 97,18 ha de vegetación natural, 54,57 ha de tierras desnudas o degradadas y 16,81 ha de mosaico de cultivos se transformaron en ríos (tabla 7).

Discusión

Correcciones y clasificación de coberturas

Los valores de corrección geométrica presentan una aceptable confiabilidad del ajuste geométrico, ya que se considera un error tolerable si los valores Sigma son inferiores a 1 pixel (ITC 2001). En términos generales, los valores de la desviación estándar son bajos para todos los tipos de cobertura, lo que indica cierto grado de homogeneidad para los valores de cada categoría. Son más bajos en las primeras tres bandas espectrales y se incrementan en las que corresponden a la región del infrarrojo.

Las categorías tierra desnuda o degradada, tejido urbano, mosaico de cultivos y ríos exhiben líneas paralelas cercanas en las primeras tres bandas, y adquieren una tendencia diferente en el caso de los ríos, en las bandas del infrarrojo, mientras que las tierras desnudas, el tejido urbano y el mosaico de cultivos continúan presentando un comportamiento equivalente, hasta las bandas 5 y 7, en donde se presenta una diferencia en la categoría tejido urbano con respecto a mosaico de cultivos y tierras desnudas o degradadas. La similitud en las tendencias de estas categorías comprueba el riesgo de confusión entre ellas durante el proceso de clasificación automática (figura 2). Por otro lado, las intersecciones y la disimilitud entre la línea de la categoría vegetación natural y las demás manifiestan la probabilidad de separar esa clase. El valor de índice *k* para la matriz de confusión entre vegetación natural y tierras desnudas o degradas fue de 0,84 (tabla 2).

Un valor de *k* igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras que un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo es puramente debido al azar (Chuvieco 2010). El valor obtenido indica que la clasificación es un 84% mejor de lo se puede esperar por azar.

Cambios de cobertura del suelo en los años de estudio

Los porcentajes de cobertura del suelo obtenidos con el mapa del plan de manejo elaborado por la Gobernación del Huila, CAM y Universidad Surcolombiana (2010), que, a partir de una imagen Landsat del 2000, muestran que las categorías equivalentes a tierras desnudas o degradadas ocupan el 59,2%, bosques y rastrojos o matorrales ocupan el 30,6%, mosaico de cultivos 8,9%, ríos 0,96% y tejido urbano 0,29%, son similares a los obtenidos en la clasificación de la imagen del 2001 realizada en este estudio, lo que coincide con Ortiz Palma y Mayor Polania (2013) con respecto a lo reportado para 1975 en cuanto a pastos y áreas de suelo desnudo, pero difiere con relación a bosques y matorrales, sobre los cuales, los autores reportan para ese año 26,3%. En este sentido los porcentajes guardan similitud con los presentados en el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Villavieja (Alcaldía de Villavieja 1999), según el cual las zonas de cultivos ocupan el 10% del área total del municipio (670 km^2), los bosques y rastrojos o matorrales el 35% del total; los pastos el 45% y el 10% las construcciones urbanas. En el documento recién citado, la categoría suelos desnudos o degradados se encuentra incluida en la de pastos, tal como se procedió en este estudio.

El hecho de que las variaciones más importantes en las categorías tierras desnudas o degradadas, mosaico de cultivos y tejido urbano se presentaran durante el periodo comprendido entre 1987 y 2001 puede deberse a que durante 1996 se revivió el proyecto de riego Cabrera–Tres Pasos, destinado a irrigar unas 5.000 ha en las zonas de Doche, cuenca baja del río Villavieja y valles inferiores de las quebradas Las Lajas, La Tatacoa y La Arenosa (Olaya Amaya, Sánchez Ramírez y Acebedo 2001).

Si bien muestra una recuperación del 26,86%, durante el periodo 1987-2001, la clase vegetación natural presenta pérdidas del 22,8%. De este porcentaje, el 17,88% estaba constituido por hectáreas que pasaron a la clase tierras desnudas o degradadas, lo que evidencia que a pesar de la recuperación en algunas zonas, en otras continúa degradándose la vegetación. Ortiz Palma y Mayor Polania (2013) reportan para el periodo 1975-1993 una tendencia media alta a aumentar la ocupación de suelo expuesto y pasto natural, áreas que en este estudio también se destacan por su tendencia a la degradación.

Durante el periodo que va de 2001 a 2010, la vegetación natural se recuperó un 23,85%, pero, al igual que en el intervalo de 1987 a 2001, mostró, si bien en menor proporción, pérdidas del 16,72%, de las cuales el 13,37% corresponde a áreas que pasaron a ser tierras desnudas o degradadas, mostrando así, nuevamente, la tendencia a recuperar áreas de vegetación natural. Durante el intervalo de 23 años, la vegetación natural se recuperó un 27,2%, sin embargo, mostro pérdidas del 15,97%, de las cuales el 10,48% equivale a zonas que pasaron a ser tierras desnudas o degradadas, lo cual muestra, de manera general, que, a pesar de presentarse degradación en la cobertura vegetal, existe una tendencia mayor al restablecimiento con una tasa de 124 ha/año; mientras que la tasa de disminución de la degradación es de -194 ha/año. Se destaca también que, durante los 23 años, la tasa de aumento de cultivos fue de 71 ha/año. Finalmente, vale la pena de resaltar que, durante la época de verano, la zona de ríos disminuye 1,1 ha/año, dato que debe ser estudiado más a fondo desde el punto de vista hidroclimatológico de la región.

El índice Kappa muestra un valor de 0,67 para el intervalo de 1987-2010, lo que indica que, durante este periodo, el 67% de la cobertura del paisaje de La Tatacoa permaneció estable. De igual manera el índice muestra que, en el intervalo de tiempo 2001-2010, la estabilidad de las coberturas fue del 70%, comparado con el intervalo que va de 1987 a 2001 en donde fue estable el 65% de la cobertura, esto quiere decir que la mayor parte de los cambios ocurridos en La Tatacoa se dieron entre 1987 y 2001.

Los resultados muestran una alta dinámica espacio-temporal de la vegetación, para las fechas en las que se llevó a cabo el análisis, en las cuales la ganancia en hectáreas de vegetación es mayor que su pérdida, lo que se traduce en una disminución del área de tierras desnudas o degradadas, es decir, los resultados muestran una revitalización de la vegetación sobre tierras con degradación severa que difiere de la tendencia del proceso de desertificación cuantificado en el periodo 1975-1993, que fue de 281 ha/año (Ortiz Palma y Mayor Polania 2013).

Resultados como estos se han observado por otros autores en distintas partes del mundo (Nicholson, Tucker y Ba 1998; Piao et ál. 2005; Qi et ál. 2011; Rasmussen, Fog y Madsen 2001; Tucker, Dregne y Newcomb 1991). Sin embargo, algunos de estos autores han observado que mientras la desertificación se contrae en una dirección,

al mismo tiempo puede expandirse en otra, dependiendo del desplazamiento de las isoyetas a través de la región (Qi et ál. 2011; Tucker, Dregne y Newcomb 1991) y del nivel de riesgo de desertificación (Imbol 2014). Este fenómeno debe ser más explorado en la región para comprender la particularidad de La Tatacoa y modelar con escenarios de cambio climático.

Asimismo se ha reportado para el contexto de América Latina y el Caribe la recuperación generalizada de vegetación boscosa (Aide et ál. 2012) y específicamente en Colombia (Sánchez-Cuervo et ál. 2012). Estos autores atribuyen el restablecimiento de áreas de vegetación natural principalmente a factores sociales, como el abandono de tierras por desplazamiento forzado ocasionado por el conflicto armado.

Conclusiones

Se determinó que, durante los 23 años de estudio, en La Tatacoa, la cobertura vegetal conformada por arbustos, matorrales y fragmentos de bosque ha aumentado (13,4%), mientras que las tierras desnudas o degradadas han disminuido (16,7%), lo que pone en evidencia un proceso de recuperación en la zona. A pesar del incremento de la cobertura vegetal, aún se presenta una tendencia de dicha cobertura a transformarse en tierras desnudas o degradadas de acuerdo con lo observado en las matrices multitemporales. La mayor parte de las tierras desnudas o degradadas en la región central de la zona de estudio ha permanecido estable durante los 23 años de estudio, lo que puede indicar que factores como el sobrepastoreo, que promueven la desertificación, se siguen presentando en esta zona.

La dinámica de esta región está sometida a una fuerte perturbación y estrés para las plantas, por lo cual se encuentra un patrón de reemplazo entre vegetación y áreas degradadas en distintos puntos. Estos cambios obedecen a la interacción entre los factores ambientales y las dinámicas de uso antrópico de la tierra que van modificando con el tiempo el predominio de una cobertura u otra. Es indispensable conocer cuáles son los factores de cambio en los puntos más dinámicos, con el fin de poder usar esta información para la planificación de políticas y programas para disminuir los procesos de desertificación en las áreas más dinámicas del presente estudio.

Conocer los factores que han fomentado en algunas áreas el aumento o disminución de la cobertura es fundamental para iniciar programas concretos de restauración ecológica o repoblación forestal (Bainbridge 2012; Montaño y Monroy 2000) y, a su vez, el estudio detallado de los factores socioeconómicos que promueven la degradación en algunos sectores debe ser la base para plantear medidas sectorizadas como la implementación de sistemas productivos silvopastoriles y agroforestales acordes con la problemática social y ambiental que, en un contexto de cambio climático, influyen en la dinámica de las coberturas en toda la región de la Tatacoa y su área de influencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), localizado en el United States Geological Survey (USGS), y al Center for Earth Resources Observation and Science (EROS) de la NASA - USGS, por proporcionar de manera gratuita las imágenes Landsat. De igual manera, al International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), por el software ILWIS 3.3. A los dos evaluadores anónimos y al Editor de la revista porque gracias a sus observaciones el manuscrito mejoró sustancialmente.

Referencias

Abraham, Elena María. 2003. "Desertificación: bases conceptuales y metodológicas para la planificación y gestión. Aportes a la toma de decisión." *Revista Zonas Áridas* 7:18-67.

Abraham, Elena, María Eugenia Fusari, y Mario Salomón. 2005. "Índice de pobreza hídrica. Adaptación y ajuste metodológico a nivel local. Estudio de caso: departamento de Lavalle. Mendoza (Argentina)." *Desarrollo Sostenible* 2:25-40.

Aide, T. Mitchell, Matthew L. Clark, H. Ricardo Grau, David López-Carr, Marc A. Levy, Daniel Redo, Martha Bonilla-Moheno, George Riner, María J. Andrade-Núñez, y María Muñiz. 2012. "Deforestation and Reforestation of Latin America and the Caribbean (2001-2010)." *Biotropica* 45 (2): 262-271. doi: 10.1111/j.1744-7429.2012.00908.x.

Alcaldía de Villavieja. 1999. *Plan de ordenamiento territorial (POT) del municipio de Neiva*. Neiva: Alcaldía de Villavieja.

Armenteras, D., F. Gast, y H. Villareal. 2003. "Andean Forest Fragmentation and the Representativeness of Protected Natural Areas in the Eastern Andes, Colombia." *Biological Conservation* 113 (2): 245-256. doi: 10.1016/S0006-3207(02)00359-2.

Bainbridge, David A. 2012. "Restoration of Arid and Semi-Arid lands." En *Restoration Ecology. The New Frontier*, editado por Jelte van Andel y James Aronson, 115-129. Oxford: Blackwell Publishing.

Carlotto, Mark J. 1997. "Detection and Analysis of Change in Remotely Sensed Imagery with Application to Wide Area Surveillance." *IEEE Transactions on Image Processing* 6 (1): 14. doi: 10.1109/83.552106.

Chander, Gyanesh, y Brian L Markham. 2003. "Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 (11): 2674-2677. doi: 10.1109/TGRS.2003.818464.

Chuvieco, Emilio. 1998. "El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios." *Revista de Teledetección* 10:1-9.

Chuvieco, Emilio. 2010. *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel.

Congalton, Russell G. 1991. "A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data." *Remote Sensing of Environment* 37 (1): 35-46. doi: 10.1016/0034-4257(91)90048-B.

Coppin, Pol R., y Marvin E. Bauer. 1996. "Digital Change Detection in Forest Ecosystems with Remote Sensing Imagery." *Remote Sensing Reviews* 13 (3-4): 207-234. doi: 10.1080/02757259609532305.

Coppin, Pol R., Inger Jonckheere, Kris Nackaerts, Bart Muys, y Eric Lambin. 2004. "Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring: a Review." *International Journal of Remote Sensing* 25 (9): 1565-1596. doi: 10.1080/0143116031000101675.

Etter, Andres, Clive McAlpine, David Pullar, y Hugh Possingham. 2005. "Modeling the Age of Tropical Moist Forest Fragments in Heavily-cleared Lowland Landscapes of Colombia." *Forest Ecology and Management* 208 (1): 249-260. doi: 10.1016/j.foreco.2004.12.008.

Etter, Andres, Clive McAlpine, David Pullar, y Hugh Possingham. 2006. "Modelling the Conversion of Colombian Lowland Ecosystems since 1940: Drivers, Patterns and Rates." *Journal of Environmental Management* 79 (1): 74-87. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.05.017.

Figueroa-C., Yisela, y Gloria Galeano. 2007. "Lista comentada de las platas vasculares del enclave seco interandino de La Tatacoa (Huila, Colombia)." *Caldasia* 29 (2): 263-81.

Flores Sánchez, E., y Stephen Yool. 2007. "Sensitivity of change Vector Analysis to Land Cover Change in an Arid Ecosystem." *International Journal of Remote Sensing* 28 (5): 1069-1088. doi: 10.1080/01431160600868482.

Gilabert, M. A., C. Conese, y F. Maselli. 1994. "An Atmospheric Correction Method for the Automatic Retrieval of Surface Reflectances from TM Images." *International Journal of Remote Sensing* 15 (10): 2065-2086. doi: 10.1080/01431169408954228.

Gobernación del Huila, CAM (Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena), y Universidad Surcolombiana. 2010. *Zonificación para el manejo del Parque Natural Regional de la Tatacoa*. Consultado en febrero de 2016. https://www.cam.gov.co/areas-protegidas/planes-de-manejo/category/70-pnr-tatacoa.html?download=378:pm-pnr-tatacoa

Gobernación del Huila, CAM, y Universidad Surcolombiana. 2015. *Plan de manejo ambiental Distrito Regional de manejo integrado - qDRMI La Tatacoa*. Consultado en marzo de 2016. https://www.cam.gov.co/areas-protegidas/planes-de-manejo/category/205-drmi-tatacoa.html

Hadeel, A. S., Mushtak T. Jabbar, y Xiaoling Chen. 2010a. "Environmental Change Monitoring in the Arid and Semi-arid Regions: A Case Study Al-Basrah Province, Iraq." *Environmental Monitoring and Assessment* 167 (1-4): 371-385. doi: 10.1007/s10661-009-1056-9.

Hadeel, A. S., Mushtak T. Jabbar, y Xiaoling Chen. 2010b. "Application of Remote Sensing and GIS in the Study of Environmental Sensitivity to Desertification: A Case Study in Basrah Province, Southern Part of Iraq." *Applied Geomatics* 2 (3): 101-112. doi: 10.1007/s12518-010-0024-y.

Hadeel, A. S., Mushtak T. Jabbar, y Xiaoling Chen. 2011. "Remote Sensing and GIS Application in the Detection of Environmental Degradation Indicators." *Geo-spatial Information Science* 14 (1): 39-47. doi: 10.1007/s11806-011-0441-z.

Hermelin, Michel, ed. 2016. "The Tatacoa Desert." En *Landscapes and Landforms of Colombia*, editado por Michel Hermelin, 127-137. Cham: Springer.

IDEAM (Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales). 2010. *Leyenda nacional de coberturas de la Tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100000*. Vol. 1. Bogotá: IDEAM.

IDEAM, SINCHI (Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas), IAvH (Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt), IIAP (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico), e INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y costeras "José Benito Vives de Andréis"). 2002. *Perfil del estado de los recursos naturales y del medio ambiente en Colombia 2001*. Tomo 3. Bogotá: Quebecor World.

Imbol, Rubén Darío. 2014. "Herramientas SIG en el análisis de zonas en riesgo de desertificación. Caso de estudio: Zonas aledañas al Desierto de la Tatacoa, municipio de Alpujarra, Tolima." Tesis de maestría en sistemas de información geográfica, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.

ITC (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences). 2001. *Ilwis 3.0 User's Guide Academic*. Holanda:

Unit Geo Software Development, Sector Remote Sensing & GIS, IT Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.

ITC. 2005. *ILWIS - Remote Sensing and GIS software*. Versión 3.3. Consultado en diciembre de 2015. https://www.itc.nl/ilwis/

Jianya, Gong, Sui Haigang, Ma Guorui, y Zhou Qiming. 2008. "A Review of Multi-temporal Remote Sensing Data Change Detection Algorithms." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXVII (Part B7): 757-762.

Johnson, Lucinda B. 1990. "Analyzing Spatial and Temporal Phenomena using Geographical Information Systems." *Landscape Ecology* 4 (1): 31-43. doi: 10.1007/BF02573949.

Joseph, Oloukoi, Adagbasa Efosa Gbenga, y Dasat Gloria Langyit. 2018. "Desertification Risk Analysis and Assessment in Northern Nigeria." *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 11:70-82. doi: 10.1016/j.rsase.2018.04.012.

Liang, Shunlin, Kaicun Wang, Xiaotong Zhang, y Martin Wild. 2010. "Review on Estimation of Land Surface Radiation and Energy Budgets from Ground Measurement, Remote Sensing and Model Simulations." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 3 (3): 225-240. doi: 10.1109/JSTARS.2010.2048556.

Lu, D., P. Mausel, E. Brondízio, y E. Moran. 2004. "Change Detection Techniques." *International Journal of Remote Sensing* 25 (12): 2365-2401. doi: 10.1080/0143116031000139863.

MAVDT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible). 2005. *Plan de acción nacional de lucha contra la desertificación y la sequía en Colombia*. Vol. 1. Bogotá: XPRESS Estudio Gráfico.

Marín Valencia, Alba Lucia, Carlos Federico Álvarez Hincapié, Carlos Eduardo Giraldo, y Sandra Uribe Soto. 2018. "Análisis multitemporal del paisaje en el Magdalena Medio en el periodo 1985-2011: una ventana de interpretación de cambios históricos e implicaciones en la conectividad estructural de los bosques." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 27 (1): 10-26. doi: 10.15446/rcdg.v27n1.55783.

Montaño, Noé Manuel, y Arcadio Monroy Ata. 2000. "Conservación ecológica de suelos en zonas áridas y semiáridas de México." *Ciencia y Desarrollo* 26 (154): 27-37.

NASA - USGS (United States Geological Survey). 2010. *LP DAAC Land Processes Distributed Active Archive center*. Consultado en febrero de 2015. https://lpdaac.usgs.gov/

Nicholson, S. E., C. J. Tucker, y M. B. Ba. 1998. "Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An Example from the West African Sahel." *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (5): 815-30. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2.

Olaya Amaya, Alfredo, Mario Sánchez Ramírez, y Juan Carlos Acebedo. 2001. *La Tatacoa: ecosistema estratégico de Colombia*. Neiva: Universidad Surcolombiana.

Ortiz Palma, Nelson Humberto, y Rigoberto Mayor Polania. 2013. "Identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico desierto de La Tatacoa. Periodo: 1975 a 1993." *Ingeniería y Región* 10:149-158. doi: 10.25054/22161325.767.

Piao, Shilong, Fang Jingyun, Hongyan Liu, y Biao Zhu. 2005. "NDVI-Indicated Decline in Desertification in China in the Past two Decades." *Geophysical Research Letters* 32 (6): L06402. doi: 10.1029/2004GL021764.

Qi, Yanbing, Qingrui Chang, Keli Jia, Mengyun Liu, Jing Liu, y Tao Chen. 2011. "Remote Sensing-based Temporal-spatial Variability of Desertification and Driving Forces in an Agro-pastoral Transitional Zone of Northern Shaanxi Province, China." *African Journal of Agricultural Research* 6 (7): 1707-1716. doi: 10.5897/AJAR10.686.

Rasmussen, Kjeld, Bjarne Fog, y Jens E. Madsen. 2001. "Desertification in Reverse? Observations from Northern Burkina Faso." *Global Environmental Change* 11 (4): 271-282. doi: 10.1016/S0959-3780(01)00005-X.

Renolen, Agnar. 1997. "Temporal Maps and Temporal Geographical Information Systems (Review of Research)." *IATH The Institute for Advanced Technology in the Humanities* 1-12.

Rojas-Marín, Carlos. 2013. "Evaluación de la dinámica espacio-temporal del proceso de desertificación a través de teledetección y SIG en el enclave seco de la Tatacoa." Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Universidad del Tolima, Ibagué.

Salvatierra, Hilda, y Uriel Pérez. 1997. "Análisis multitemporal de la cobertura y uso de la tierra con apoyo de los sensores remotos." Conferencia presentada en el *VIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial*, 259-271. 2 al 7 de noviembre de 1997, Mérida, Venezuela.

Sánchez-Cuervo, Ana María, T. Mitchell Aide, Matthew L. Clark, y Andrés Etter. 2012. "Land Cover Change in Colombia: Surprising Forest Recovery Ttrends between 2001 and 2010." *PLOS ONE* 7 (8): e43943. doi: 10.1371/journal.pone.0043943.

Santana, Luis M., y Javier Salas. 2007. "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat." *GeoFocus* 7:281-313.

Siabato, Willington, Christophe Claramunt, Sergio Ilarri, y Miguel Angel Manso-Callejo. 2018. "A Survey of Mode-

lling Trends in Temporal GIS." *ACM Computing Surveys* 51 (2): 1-41. doi: 10.1145/3141772.

Singh, Ashbindu. 1989. "Digital Change Detection Techniques Using Remotely-sensed Data." *International Journal of Remote Sensing* 10 (6): 989-1003. doi: 10.1080/01431168908903939.

Song, Conghe, Curtis E. Woodcock, Karen C. Seto, Mary Pax Lenney, y Scott A. Macomber. 2001. "Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and how to Correct Atmospheric Effects?" *Remote Sensing of Environment* 75 (2): 230-244. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00169-3.

Tsuchiya, Kiyoshi, Tamotsu Igarshi, Muhtar Qong, Kiyoshi Tsuchiya, Tamotsu Igarshi, y Muhtar Qong. 2010. "Land Cover Change Detection Based on Satellite Data for an Arid Area to the South of Aksu in Taklimakan Desert." *Journal of Arid Land* 2 (1): 14-19. doi: 10.3724/SP.J.1227.2010.00014.

Tucker, Compton J., Harold E. Dregne, y Wilbur W. Newcomb. 1991. "Expansion and Contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990." *Science* 253 (5017): 299-300. doi: 10.1126/science.253.5017.299.

Turner, Monica G. 1990. "Spatial and Temporal Analysis of landscape Patterns." *Landscape Ecology* 4 (1): 21-30. doi: 10.1007/BF02573948.

USGS (United States Geological Survey). 2017. "GloVis." Consultado en febrero de 2015. https://glovis.usgs.gov/

Xu, Duanyang, Xiangwu Kang, Dongsheng Qiu, Dafang Zhuang, y Jianjun Pan. 2009. "Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale - A Case Study in the Ordos Plateau, China." *Sensors (Basel)* 9 (3): 1738-1753. doi: 10.3390/s90301738.

Zhenqi, Hu, Xu Xianlei, y Peng Danqing. 2008. "Comparative Analysis of Several Typical Approaches of Desertification Dynamic Monitoring Based on TM Date." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXVII (Part B7): 1741-1746.

Anexo 1. Porcentaje de estabilidad y pérdida de las clases de cobertura del suelo en los periodos 1987-2001, 2001-2010 y 1987-2010

1987-2001	Vn	Tdd	Mc	R	Tu
Vn	**77,20**	16,29	1,59	15,72	0,00
Tdd	17,88	**80,97**	0,33	3,11	0,00
Mc	4,54	2,54	**97,81**	0,69	0,00
R	0,37	0,18	0,27	**80,49**	0,00
Tu	0,01	0,02	0,00	0,00	**100**
Total 1987	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**
2001-2010					
Vn	**83,28**	15,19	12,40	18,39	0,00
Tdd	13,37	**83,05**	6,35	6,58	0,00
Mc	2,78	1,68	**80,70**	1,47	0,00
R	0,57	0,08	0,55	**73,56**	0,00
Tu	0,01	0,01	0,00	0,00	**100**
Total 2001	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**
1987-2010					
Vn	**84,03**	17,48	6,11	21,12	0,00
Tdd	10,48	**78,95**	3,51	5,26	0,00
Mc	4,95	3,36	**89,89**	1,58	0,00
R	0,53	0,17	0,49	**72,03**	0,00
Tu	0,01	0,03	0,00	0,00	**100**
Total 1987	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

Nota: (Vn) Vegetación natural; (Tdd) Tierras degradadas o desnudas; (Mc) mosaico de cultivos; (R) Ríos; (Tu) Tejido urbano.

Anexo 2. Ganancias de las clases de cobertura del suelo en los periodos 1987-2001, 2001-2010 y 1987-2010

1987-2001	Vn	Tdd	Mc	R	Tu	Total
Vn	**73,14**	26,02	0,28	0,56	0,00	**100**
Tdd	11,57	**88,32**	0,04	0,08	0,00	**100**
Mc	16,78	15,84	**67,29**	0,10	0,00	**100**
R	9,83	7,99	1,36	**80,82**	0,00	**100**
Tu	1,19	5,28	0,00	0,00	**93,53**	**100**
2001-2010						
Vn	**76,15**	20,35	2,91	0,60	0,00	**100**
Tdd	9,77	**88,87**	1,19	0,17	0,00	**100**
Mc	10,69	9,46	**79,65**	0,20	0,00	**100**
R	16,52	3,25	4,14	**76,09**	0,00	**100**
Tu	0,78	1,04	0,00	0,00	**98,19**	**100**
1987-2010						
Vn	**72,80**	25,53	0,98	0,69	0,00	**100**
Tdd	7,26	**92,16**	0,45	0,14	0,00	**100**
Mc	18,06	20,69	**61,04**	0,22	0,00	**100**
R	14,52	8,15	2,51	**74,81**	0,00	**100**
Tu	1,36	6,80	0,00	0,00	**91,83**	**100**

Nota: (Vn) Vegetación natural; (Tdd) Tierras degradadas o desnudas; (Mc) mosaico de cultivos; (R) Ríos; (Tu) Tejido urbano.

Carlos Andrés Rojas-Marín

Biólogo de la Universidad del Tolima (Colombia). Magíster en Ciencias Biológicas e investigador del Grupo de Investigación en Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales de la misma universidad.

Uriel Pérez-Gómez

Ingeniero Forestal de la Universidad del Tolima (Colombia). Magíster Scientiae en Manejo de Cuencas de la Universidad de Los Andes (Venezuela). Candidato a Doctor en Tecnología de la Información Geográfica de la Universidad de Alcalá de Henares (España). Miembro del grupo de investigación en Cuencas Hidrográficas y Profesor Asistente del Departamento de Ingeniería de la Universidad del Tolima.

Fernando Fernández-Méndez

Ingeniero Forestal de la Universidad del Tolima (Colombia). Magíster Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza - CATIE (Costa Rica). Doctor Scientiae en Botánica de la Universidad Federal de Viçosa (MG, Brasil). Investigador asociado del Grupo de Investigación en Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales y profesor asistente del departamento de Ciencias Forestales de la Universidad del Tolima.