

**DESARROLLO DE UN MODELO ESPACIAL A PARTIR DE HERRAMIENTAS
DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA CUANTIFICAR LA
TENDENCIA DE LA DESERTIFICACIÓN DEL DESIERTO DE LA TATACOA, EN
EL DEPARTAMENTO DEL HUILA.**

**EDWIN JAIR NÚÑEZ ORTIZ
OSCAR ANDRÉS TORO TRÓCHEZ**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN
MANIZALES
2017**

**DESARROLLO DE UN MODELO ESPACIAL A PARTIR DE HERRAMIENTAS
DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA CUANTIFICAR LA
TENDENCIA DE LA DESERTIFICACIÓN DEL DESIERTO DE LA TATACOA, EN
EL DEPARTAMENTO DEL HUILA.**

**DOCUMENTO FINAL DE PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE MAGISTER EN TELEDETECCIÓN**

**EDWIN JAIR NÚÑEZ ORTIZ
OSCAR ANDRÉS TORO TRÓCHEZ**

DIRECTORA: MSc. PAOLA J. ISAACS CUBIDES

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN
MANIZALES
2017**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Programa en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Católica de Manizales para optar al título de Magister en Teledetección

Jurado 1

Jurado 2

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos inicialmente a nuestras familias por el apoyo incondicional recibido durante el proceso del desarrollo de la maestría y posteriormente al grupo de docentes de la universidad que con su experiencia nos orientaron y nos brindaron las herramientas necesarias para el desarrollo del presente estudio.

Extendemos nuestros agradecimientos especiales a la investigadora MSc. Paola J. Isaacs Cubides del Instituto Humboldt Colombia, Tutora asignada al proyecto y quien estuvo atenta y dispuesta siempre haciendo observaciones claras para que el desarrollo del proyecto fuera exitoso. Su experiencia en los temas analizados fue fundamental para obtener resultados pertinentes y concretos.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	11
3.	JUSTIFICACIÓN	13
4.	OBJETIVOS	14
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	14
4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
5	MARCO TEÓRICO	15
5.1	ESTADO DEL ARTE	22
5.2	MARCO CONCEPTUAL.....	27
5.3	MARCO CONTEXTUAL	33
5.4	ÁREA DE ESTUDIO.....	35
6	METODOLOGÍA	37
6.1	ANÁLISIS MULTITEMPORAL PARA CUATRO PERIODOS: 1987, 2000, 2010 Y 2014	37
6.1.1	Cálculo del factor del índice óptimo (OIF).....	38
6.1.2	Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI).....	39
6.1.3.	Clasificación Supervisada.....	39
6.2	MODELO ESPACIAL PARA EL ANÁLISIS A LA TENDENCIA A LA DEGRADACIÓN.....	40
6.2.1	Descripción de atributos para estimación de los indicadores geomorfométricos, climáticos y antrópicos.....	44
6.2.1.1	Atributos del indicador climático.....	44
6.2.1.2	Atributos del indicador de Cobertura y Uso del suelo.	48
6.2.1.3	Atributos del indicador Cobertura y Usos del Suelo.....	49
6.3	CLASIFICACIÓN Y CALIFICACION DE INDICADORES	49
6.3.1	Calificación y valoración de atributos del indicador climático (IC)..	49
6.3.2	Clasificación y valoración de atributos para estimación del indicador Geomorfométrico.....	52
6.3.3	Clasificación y valoración de atributos para estimación del indicador de cobertura y uso del suelo.....	54
6.3.4	Clasificación y valoración de atributos para el modelo general. Áreas más sensibles a la desertificación de degradación del suelo.	58
7	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	59
7.1	ZONIFICACIÓN DE COBERTURAS DEL SUELO PARA CUATRO PERIODOS: 1987; 2000; 2010 Y 2014.	59
7.1.1	Cálculo del factor del índice óptimo (OIF).....	59

7.1.2	Cobertura del suelo periodos; 1987,2000, 2010 y 2014.	59
7.1.3	Análisis multitemporal de las áreas degradas.....	68
7.2	MODELO ESPACIAL, AREAS SUSCEPTIBLES A LA DESERTIFICACIÓN.....	70
7.2.1	Estimación espacial de atributos geomorfométricos y submodelo...70	
7.2.2	Estimación de atributos climática y submodelo.	73
7.2.3	Estimación de atributos de cobertura y uso del suelo y submodelo...78	
7.2.4	Modelo total; sensibilidad ambiental a la desertificación.....	81
7.3.	Importancia del trabajo de investigación y comparaciones.	84
8	CONCLUSIONES	87
9	REFERENCIAS.....	89
	ANEXOS.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Foto del desierto de la tatacoa.	34
Figura 2. Área de estudio.	35
Figura 3. Modelo conceptual.	42
Figura 4. Modelo digital de elevación del área de estudio.....	48
Figura 5. Porcentaje de coberturas del suelo. Año 2014.....	61
Figura 6. Mapa de zonificación de coberturas del suelo, año 2014.....	61
Figura 7. Porcentaje de coberturas del suelo. Año 2010.....	63
Figura 8. Mapa de la cobertura del suelo, año 2010.	63
Figura 9. Porcentaje de coberturas del suelo. Año 2000.....	65
Figura 10. Mapa de la cobertura del suelo, año 2000.	65
Figura 11. Porcentaje de coberturas del suelo. Año 1987.....	67
Figura 12. Mapa de la cobertura del suelo, año 1987.	67
Figura 13. Aumento de las tierras desnudas y degradadas.	68
Figura 14. Mapa de la cobertura del suelo del año 1987 al 2014.....	69
Figura 15. Mapa de atributos geomorfológicos.	71
Figura 16. Submodelo conceptual geomorfométrico	72
Figura 17. Resultado espacial del submodelo, donde se muestran las áreas más sensibles geomorfológicamente a la desertificación.	72
Figura 18. Histograma para ICP e IFM.....	73
Figura 19. Ecuación de segundo grado para interpola el ICP e IFM.	73
Figura 20. Anisotropía verdadera para para interpolar los datos ICP e IFM.	74
Figura 21. Mapa de atributos climáticos.....	76
Figura 22. Submodelo conceptual climático.....	77
Figura 23. Resultado espacial del submodelo para mostrar las áreas más sensibles climáticamente a la desertificación.....	77
Figura 24. Representación espacial de atributos del indicador de cobertura y uso del suelo.....	79
Figura 25. Submodelo conceptual de cobertura y uso del suelo.	80
Figura 26. Mapa de resultados del submodelo espacial de cobertura y uso del suelo.....	80
Figura 27. Mapa resultado del modelo total para generar la sensibilidad ambiental a la desertificación.	81
Figura 28. Mapa de las áreas más propensas a la desertificación.....	82
Figura 29. Modelo general para determinar las áreas ambientalmente sensibles a la desertificación.	83

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VEREDAS ÁREA DE ESTUDIO.....	36
TABLA 2. IMÁGENES LANDSAT 8-OLI, 5-TM Y 7-ETM+ UTILIZADAS EN LA INTERPRETACIÓN. AÑOS; 1987, 2000, 2010 Y 2014.....	38
TABLA 3. FUENTE DE INFORMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ATRIBUTOS SELECCIONADOS PARA ESTIMACIÓN DE INDICADORES GEOMORFOLÓGICOS, CLIMÁTICOS Y DE COBERTURA Y USO DEL SUELO.....	43
TABLA 4. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	44
TABLA 5. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE ÍNDICE DE ARIDEZ.....	49
TABLA 6. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN ÍNDICE DE AGRESIVIDAD CLIMÁTICA.....	50
TABLA 7. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES.....	50
TABLA 8. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO.....	51
TABLA 9. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN PARA EL SUBMODELO O INDICADOR CLIMÁTICO.	51
TABLA 10. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN PENDIENTE (Θ).....	52
TABLA 11. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN CURVATURA.....	52
TABLA 12. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN PENDIENTE.....	53
TABLA 13. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN ÍNDICE TOPOGRÁFICA DE HUMEDAD (ITH).....	53
TABLA 14. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN PARA EL SUBMODELO O INDICADOR GEOMORFOMÉTRICO.....	54
TABLA 15. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN DEL RIESGO A FUEGO Y CAPACIDAD DE RECUPERACIÓN DEL INDICADOR.....	55
TABLA 16. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN PROTECCIÓN A EROSIÓN.....	55
TABLA 17. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN RESISTENCIA A SEQUÍA.....	56
TABLA 18. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN PARA EL INDICADOR DE USO INTENSIVO DEL SUELO.....	57
TABLA 19. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN PARA EL SUBMODELO O INDICADOR DE COBERTURA Y USOS DEL SUELO.....	58
TABLA 20. CALIFICACIÓN Y VALORACIÓN PARA EL MODELO GENERAL.....	58
TABLA 21. COBERTURA DEL SUELO, AÑO 2014.....	60
TABLA 22. COBERTURAS DEL SUELO, AÑO 2010.....	62
TABLA 23. COBERTURA DEL SUELO, AÑO 2000.....	64
TABLA 24. COBERTURA DEL SUELO, AÑO 1987.....	66
TABLA 25. DATOS ICP E IFM, PROMEDIADOS PARA UN RANGO DE 27 AÑOS (1987 A 2014).	74

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA BANDAS DE IMAGEN LANDSAT 8.....	95
ANEXO B. TABLA DE CORRELACIÓN DE BANDAS IMAGEN LANDSAT 8.	96
ANEXO C. ÍNDICE ÓPTIMO IMAGEN LANDSAT 8 (OIF).	97
ANEXO D. DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA BANDAS DE IMAGEN LANDSAT 5.	98
ANEXO E. TABLA DE CORRELACIÓN DE BANDAS IMAGEN LANDSAT 5.	99
ANEXO F. ÍNDICE ÓPTIMO LANDSAT 5 (OIF).	100
ANEXO G. CAMBIOS EN LA COBERTURA DEL SUELO OCURRIDO EN EL PERIODO 1987 - 2014.	101
Anexo H. Tendencia a la desertificación IDEAM 2008	103

RESUMEN

El estudio está comprendido por el desarrollo y análisis de dos etapas: La primera es un estudio multitemporal para cuatro periodos (1987, 2000, 2010 y 2014), donde se identificó el avance espacial de las áreas degradadas o desérticas y una segunda etapa de un modelo espacial para determinar las áreas más sensibles a la desertificación de acuerdo a la influencia de indicadores climáticos, geomorfológicos, de Cobertura y usos del suelo. El área de estudio fue el Municipio de Villavieja, Baraya (cuatro veredas), Tello (tres veredas) y Aipe (nueve veredas).

Para el primero, se utilizaron imágenes Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 que permitieron evaluar un rango total de tiempo para 27 años; en el segundo estudio, se construyó un modelo de sensibilidad ambiental con atributos espaciales que intervienen en el proceso de desertificación, a los que se les dio una calificación de influencia comprendidos entre “1” a “2” (valores cercanos a “1” con menos influencia y cercanos a “2” con más influencia a la degradación). Los atributos fueron la pendiente, la curvatura, factor longitudinal de la pendiente, índice topográfico de humedad, índice de aridez, índice de agresividad climáticas, índice de concentración de las precipitaciones, temperatura superficial del suelo, riesgo al fuego, resistencia a la sequía, protección del suelo y usos intensivo del suelo; cada uno de los anteriores elementos se integraron en uno de los tres submodelos (clima, geomorfológico y de cobertura y uso del suelo) de acuerdo al contexto espacial. Posteriormente se estructuraron en el modelo general para calcular las áreas más sensibles ambientalmente a la desertificación a través de la media geométrica.

Como resultado, se logró inferir que las tierras desnudas o degradadas, han aumentado del año 1987 al año 2014 en 2949,11 hectáreas. Con respecto al modelo se identificaron las coberturas más propensas a sufrir degradación del suelo; estas fueron cultivos transitorios (137,81 Ha); mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (152,58 Ha); mosaico de pastos con espacios naturales (5439,05 Ha); pastos enmalezados (5024,55 Ha) y pastos limpios (10742,46 Ha).

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, específicamente al norte del departamento del Huila, existe un porcentaje muy alto de degradación de suelos debido a la transformación de las zonas semiproductivas en terrenos áridos. Las causas del proceso de desertificación son diversas y complejas, entre las que se destacan los drásticos cambios climáticos y las actividades antrópicas relacionadas con la ampliación de las fronteras agrícolas. Los suelos aledaños al desierto de la Tatacoa y que están siendo sometidos a procesos de degradación, necesitan estar clasificados y valorados en rangos de influencia, que muestren los suelos más propensos a ser desérticos o degradados.

La ampliación de las fronteras agrícolas y pecuarias producto de las actividades antrópicas, seguido del cambio de uso de suelo natural del bosque y arbustos densos y las condiciones adversas climáticas de temperatura y precipitación, son algunas de las causas que contribuyen a la degradación de los suelos fértiles y pérdida productiva.

El proceso de la desertificación se desarrolla por la influencia integrada de varios factores de tipo climáticos que se complementan con actividades como la deforestación, el monocultivo y los sistemas agropecuarios. Generando presiones negativas por el uso inadecuado de las tierras hasta convertirlas en suelos infértiles. Estos escenarios adversos para el ecosistema se pueden identificar por la pérdida de coberturas vegetales a través de estudios multitemporales o por técnicas de modelamiento espacial a partir del procesamiento digital de imágenes, donde se integren los elementos que participan en la degradación de los suelos para identificar espacialmente las áreas más sensibles a la desertificación.

La presente tesis plantea un análisis detallado para evaluar el avance de las tierras desnudas o degradadas a través de un estudio multitemporal en un rango de 27 años (1987 a 2014), y un modelo espacial donde agrupa los principales factores de influencia para determinar las áreas más propensas al deterioro. Mostrando cuantitativamente los resultados en mapas, con una calificación alta, media y baja a la desertificación.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El suelo es un receptor de muchos factores antrópicos y ambientales que interactúan para mantener la productividad y sostenimiento de las diferentes coberturas terrestres.

La importancia del suelo para una amplia variedad de actividades humanas lo hace más vulnerable a los daños y al agotamiento productivo. La capacidad de amortiguación del suelo, su capacidad de tolerar y recuperarse de diferentes estreses y de filtrar y degradar sustancias contaminantes hacen que los daños no se perciban hasta una fase muy avanzada. La desertificación es un ejemplo extremo de cómo los procesos degradativos pueden afectar al suelo y es producto de la interacción de factores como el clima, la topografía y la actividad humana. Esto puede conducir a la progresiva reducción de la capacidad del suelo para mantener las comunidades humanas, animales, vegetales y actividades económicas, además de tener impactos ambientales, tiene impactos sociales y políticos. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial (MAVDT), 2010, p.11-12).

La degradación del suelo en Colombia es una problemática que va en aumento. En el norte del Departamento del Huila, por ejemplo; se destacan los cambios de la cobertura del suelo productivo en terrenos áridos debido a los diversos factores de presión que interactúa sobre éste, como las actividades antrópicas (agricultura y ganadería) y climáticas. Por lo que es necesario integrar los elementos más influyentes para modelar los escenarios más sensibles al avance de la desertificación.

Los estudios multitemporales contribuyen con la identificación en la orientación del avance de los suelos degradados en el desierto de la Tatacoa, a través de la comparación de las coberturas existentes durante un determinado rango de tiempo que permita evaluar la dinámica de los cambios de las cubiertas del suelo. Sin embargo, falta estructurar una metodología que clasifique y ordene los factores más influyentes a la desertificación tales como; la pendiente, la curvatura, factor longitudinal de la pendiente, índice topográfico de humedad, índice de aridez, índice de agresividad climáticas, índice de concentración de las precipitaciones, temperatura superficial del suelo, riesgo al fuego, resistencia a la sequía, protección del suelo y usos intensivo del suelo. En un modelo integral con la participación directa de los anteriores elementos que permita identificar las coberturas más propensas a convertirse en suelos no productivos.

Esta metodología permitiría evaluar las áreas que no han sido estudiadas directamente en campo a través de modelos espaciales y técnicas de teledetección, permitiendo aportar eficazmente en las decisiones del territorio para contrarrestar la problemática ambiental por la desertificación.

3. JUSTIFICACIÓN

Los suelos aledaños al desierto de la Tatacoa, en el Departamento del Huila, están siendo sometidos a procesos de degradación por factores antrópicos y climáticos. Entre los elementos que generan procesos de desertificación más influyentes están; las características del clima, el aumento de los valores de reflexión en la superficie, la escasa precipitación, la influencia del relieve, la baja densidad de cobertura vegetal y los procesos erosivos (IGAC, et al., 2010). Según Olaya, Sánchez y Acebedo (2001), el Desierto de la Tatacoa y las áreas colindantes, presenta una fuerte degradación de tierras como consecuencia de factores naturales y acciones antrópicas que se relacionan con las características del suelo, la disponibilidad de agua, el clima y el uso del territorio.

A pesar de los esfuerzos por comprender el desarrollo de la problemática ambiental en el proceso de desertificación, no se evidencia una estructura metodológica en la región del norte del Departamento del Huila, que pueda integrar los factores más influyentes para clasificar y valorar las áreas más sensibles ambientalmente a sufrir la degradación del suelo, a través de las tecnologías geoespaciales que puedan contribuir con el desarrollo de las investigación para entender el crecimiento de las ares desérticas.

Por lo tanto, se necesitan herramientas que faciliten la identificación de las áreas propensas a ser degradadas a través de métodos de modelamiento espacial y procesamiento de imágenes que generen insumos útiles para la toma de decisiones y que permitan evaluar mayores superficies con menores costos en campo y tiempo. Esto se puede lograr a partir de las técnicas de teledetección integradas en el modelamiento de escenarios generados con los elementos espaciales que influyen directamente con del proceso de la desertificación para mapear y cuantificar las cubiertas más propensas a la degradación.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo espacial a partir de herramientas de procesamiento digital de imágenes para cuantificar la tendencia de la desertificación del desierto de La Tatacoa, en el Departamento del Huila.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estimar el área afectada por los procesos de desertificación en los últimos 27 años (1987 - 2014) utilizando imágenes Landsat, a través de estudios multitemporales.
- Generar un modelo de superposición ponderada que permita integrar los factores influyentes de la desertificación.
- Determinar las áreas con mayor sensibilidad ambiental a la degradación del suelo.

5 MARCO TEÓRICO

La Teledetección espacial es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre o marina y la atmósfera desde sensores instalados en plataformas espaciales. Por ser una técnica que no está en contacto directo con el objeto requiere que entre el sensor y el objeto haya un flujo de información, el cual es conocido como radiación electromagnética la cual puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. Todos los cuerpos u objetos (seres vivos, planetas u objetos inanimados) emiten radiación electromagnética. La cantidad y tipo de radiación que emiten depende básicamente de su temperatura. El mayor emisor de esta radiación en el sistema solar es el Sol, y la radiación que refleja la Tierra y los objetos situados en ella es la que se utiliza comúnmente en Teledetección. Otro tipo de emisión puede provenir del mismo sensor, el cual incorpora en su sistema un rayo emisor de radiación (Chuvienco, 1995).

La teledetección espacial ha permitido realizar estudios de monitoreo para las diferentes coberturas terrestres, complementado con un sistema de información geográfico para el procesamiento de la información espacial. Una de las aplicaciones de la teledetección es el seguimiento de variables que guardan relación directa con el proceso de desertificación, la cual consiste en el proceso de degradación del suelo en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, que genera una reducción o pérdida de la producción biológica de los ecosistemas terrestres. Es un proceso que afecta principalmente el suelo, limitando el crecimiento de la vegetación y afectando el ciclo hidrológico, con lo cual se genera escasez de agua (Centro de Estudios Estratégicos Latinoamericanos [CEELAT], 2013). Como se plantea Younis, Gilabert y Meliá (1999), la dinámica de la vegetación es uno de los indicadores más importantes para revelar la existencia de un proceso de desertificación en ambientes semiáridos. La resistencia de la vegetación a prolongados periodos de sequía, así como la eficiencia en el uso del agua y las características del suelo influyen en dicho fenómeno.

Para Sobrino et al. (2000), la Teledetección es una herramienta importante en el estudio de la dinámica de la desertificación. La integración de los datos Raster de las imágenes de satélite con un sistema de información geográfica (SIG), facilitan el manejo de la información espacial para el seguimiento y monitores de los suelos degradados. Estas técnicas ofrecen métodos para cuantificar las superficies afectadas por la desertificación y las áreas donde hay presencia de vegetación. Se efectúan a través de un seguimiento gradual comprendido por una escala global, regional y local.

El monitoreo global se realiza con datos meteorológicos con baja resolución espacial y alta resolución temporal (Météosat, GOES, Topex/Poséidon), para observaciones climáticas. Los satélites meteorológicos vigilan la tierra a través de orbitas estacionarias a una altitud de 36.000 Kilómetros, con imágenes disponibles desde los años 70 (Sobrino et al., 2000).

El monitoreo regional y nacional, se caracterizan por un seguimiento con satélites de resolución espacial media (NOAA), permitiendo evaluar el estado de grandes coberturas vegetales, la localización de zonas sensibles a la desertificación y al estrés hídrico (Sobrino et al., 2000).

El monitoreo local, se realiza con satélites de resolución espacial alta (Landsat, SPOT, ERS) para efectuar seguimiento más detallados en la planificación y el ordenamiento de las coberturas del territorio. Estos han contribuido con estudios específicos para una gran variedad de escenarios como la deforestación, la dinámica del flujo de recursos hídricos, el estado de la vegetación e inventarios para cuantificarlos, la degradación de los suelos, entre otros (Sobrino et al., 2000).

La desertificación se ha relacionado usualmente con el contexto de desierto. Por lo que es común encontrar referenciadas con este término, aquellas áreas de extrema sequedad donde no se practica agricultura, con excepción en algunos oasis o manantiales. También se menciona para los lugares donde la concentración de las precipitaciones en el año es muy breve, y en la que se practica una agricultura de subsistencia. Mientras que el término “degradación” se emplea muchas veces como sinónimo de desertificación, cuando se habla de la degradación del suelo. Este último es un concepto más amplio que la desertificación, en la cual denota la pérdida de la capacidad productiva de la tierra. Los países del mundo, que conforman la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, han adoptado una definición de desertificación, como la degradación de tierras en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, donde confluyen diferentes actividades antrópicas y variables climáticas. Por lo tanto, el proceso de desertificación no es aplicable a la extensión de los desiertos actuales, ya que ocurre porque los ecosistemas de tierras secas, que conforman más de la tercera parte de las tierras del mundo, son extremadamente vulnerables a la sobreexplotación y al aprovechamiento inadecuado de la tierra. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2005)

La desertificación es una confluencia de varios factores de tipo biofísicos, políticos, sociales, culturales y económicos. Es una problemática que va en aumento a nivel mundial, causado principalmente por la acción degradadora del hombre sobre el medio ambiente. El concepto de “degradación” denota la pérdida de capacidad del suelo o del agua, o de otros recursos, para sustentar una determinada actividad

productiva en un determinado nivel. En otras palabras, se refiere a la pérdida de productividad biofísica. (CEPAL, 2005)

Entre las causas antrópicas más comunes a nivel global que contribuyen con el desarrollo de la desertificación se resalta; la aplicación de tecnologías inadecuadas, el sobre pastoreo, la deforestación y las prácticas de regadío deficientes. Estas actividades son desarrolladas por las presiones económicas y sociales, la ignorancia, las guerras civiles y las sequías. La pobreza obliga a quienes viven de la tierra a sobreexplotarlas para obtener alimentos, energía, vivienda y una fuente de ingresos, por lo tanto, es, al mismo tiempo, la causa y efecto de la pobreza (Febles y Ruiz, 2004). En el Foro sobre la aplicación Regional del Desarrollo Sostenible, realizada en la Ciudad Santiago de Chile en el año 2007 se planteó que entre las actividades humanas que origina el desarrollo de la desertificación, se pueden diferenciar tres categorías: la deforestación, el uso del suelo sin relación con sus aptitudes y la inadecuada explotación del ecosistema (ligada a prácticas como la mecanización, el riego, la fertilización, el control de plagas y el mejoramiento fitogenético). Desde el punto de vista socioeconómico, la desertificación puede considerarse como un proceso de degradación que reduce significativamente la fertilidad de los suelos y que afecta directamente la alimentación y supervivencia de los grupos humanos que viven en zonas rurales y dependen de las actividades agropecuarias como medio de vida. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2007)

La desertificación es un problema mundial que amenaza directamente a más de 250 millones de personas y a una tercera parte de la superficie terrestre o más de cuatro mil millones de hectáreas. Colocando en peligro la subsistencia de unos mil millones de personas en más de cien países, que dependen de la tierra para desarrollar sus actividades y poder satisfacer sus necesidades alimentarias y que por lo general; son los habitantes más pobres del planeta. El continente africano tiene dos terceras partes del cual son desiertos o tierras secas. Más de un 30% de las tierras de los Estados Unidos están afectadas por la degradación. La cuarta parte de América Latina y el Caribe son desiertos y tierras secas. En España, la quinta parte de las tierras corre el peligro de desertificarse. En China, desde los años 50 las tormentas de arena y el crecimiento de los desiertos han arrasado cerca de 700.000 hectáreas de tierras cultivadas; “2,35” millones de hectáreas de pastizales; “6,4” millones de hectáreas de bosques, extensiones boscosas y tierras de arbustos. En el mundo entero, aproximadamente el 70% de los 5200 millones de hectáreas de tierras secas que se utilizan en agricultura está degradada y amenazada por la desertificación. (Febles y Ruiz, 2004)

En América del Sur; como en Argentina, Brasil, Bolivia, Colombia y Paraguay; se manifiesta para algunos lugares la agresividad y el avance de la degradación de los

suelos. A lo largo de la Cordillera de los Andes se encuentran áreas desérticas en etapa avanzada, tanto en zonas bajas como en elevaciones con más de 4.000 m.s.n.m. Sin embargo hay que aclarar que todos los países de América Latina y el Caribe sufren las etapas tempranas de la desertificación tales como: degradación de suelos (erosión, salinización, compactación, disminución de nutrientes, acumulación de sustancias tóxicas), degradación de la capa vegetal y pérdida de biodiversidad. Algunos eventos climáticos como "El Niño" y eventos extremos como los huracanes en los países de la región Caribe han intensificado estos procesos. (Plan de Acción Nacional Lucha Contra la Desertificación y la Sequía en Colombia [PAN] ,2005)

Colombia ha estado en constante búsqueda de soluciones a los problemas presentados por la desertificación, es uno de los 196 países que se ha adherido a la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (UNCCD), quien la aprobó mediante Ley 461 del 4 de agosto de 1998 y depositó el instrumento de ratificación ante las Naciones Unidas el 8 de junio de 1999, siendo país parte a partir del 8 de septiembre de 1999. En este sentido, Colombia adquirió entre otros compromisos internacionales, la formulación y ejecución del Plan de Acción Nacional de Lucha Contra la Desertificación (PAN) y la aplicación de las decisiones producidas de la Convención de la Desertificación y la Sequía (UNCCD). (IGAC, et al., 2010)

La UNCCD y el PAN establecen entre sus metas, el cumplimiento del monitoreo y seguimiento a los procesos de degradación de tierras y desertificación. Para Colombia, el PAN estableció la necesidad de realizar entre otras acciones, la definición, aplicación y seguimiento de indicadores biofísicos y socioeconómicos y puntos de referencia de degradación de tierras y desertificación, considerando e interrelacionando las escalas local, regional y nacional; el establecimiento de una base de datos conjunta sobre degradación de tierras y desertificación, en la que se incorporaron parámetros físicos y socioeconómicos; y la evaluación de la dinámica espacio temporal del fenómeno de desertificación y seguimiento de su evolución mediante instrumentos cartográficos, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección. (IGAC, et al., 2010)

En Colombia se destaca la Región del Caribe como una de las más afectadas por la desertificación, la cual presenta suelos superficiales, poco evolucionados, pH neutros a básicos por encima de 7, generado por un clima donde domina la evapotranspiración sobre la precipitación, que favorece la acumulación de sales en los horizontes superficiales. La Región del Orinoco, se caracteriza por tener una marcada estacionalidad seca entre los meses de diciembre a abril y con lluvias abundantes en el resto de meses del año, ocasionando un intenso lavado a los suelos que son evolucionados, con arcillas de baja capacidad de intercambio

catiónico y pH ácido. En esta región se encuentra calificada la desertificación, como media y baja pues los niveles de erosión son bajos además está inmersa en una extensa zona conocida como la altillanura degradada. (IGAC, et al., 2010)

La región Andina, es otra de las zonas altamente afectadas por la desertización. Entre las que sobresalen el Valle del Chicamocha, en la vertiente occidental de la cordillera oriental, el valle alto del Magdalena en los departamentos del Tolima y Huila, el valle del río Cauca a alturas del mismo departamento y en una pequeña área en el departamento de Antioquia, así mismo otra zona afectada es el valle alto del río Patía con sus principales tributarios que son el río Mayo y el Juanambú, que cubre parte de los Departamentos del Cauca y Nariño. Las tierras de montaña presentan pendientes fuertes, mayores del 45%, suelos jóvenes superficiales, lluvias mal distribuidas, con prolongados periodos, de sequía y cortos muy húmedos con aguaceros intensos, con un alto poder erosivo, sobre suelos desnudos que han sufrido la tala y quema de la vegetación natural que les servía de cobertura protectora (IGAC, et al. 2010). En el Tercer Informe Nacional Implementado de la Convención de las Naciones Unidas (UNCCD, 2007) anunció que alrededor del 80% de la Región Andina está afectada por erosión. Uno de los mayores causantes de este fenómeno es el uso del suelo para actividades agropecuarias con tecnologías inadecuadas y eventualmente sin tener en cuenta su aptitud de uso.

El informe del IGAC et al. (2010) determinó a través de la identificación de las zonas de Colombia que, por sus características del suelo, clima, cobertura de la tierra y ecosistema, presentaran ambientes secos y que además tuvieran evidencia de degradación por erosión. Al ser evaluadas y calificadas en función de la vulnerabilidad al cambio climático y su grado de degradación, tuvieron como resultado que el 24 % (27.311.651,69 Km²) del territorio nacional es vulnerable a la desertificación, y el 14% (16.422.085,72 Km²) esta degradado en diferente intensidad; Muy alta (0,72 %), Alta (2,61%), Moderada (2,72%), Baja (8,24 %).

Siendo más específicos en los resultados contextualizados para Colombia, el informe del IGAC et al. (2010) reúnen las conclusiones obtenidas en diferentes ejercicios adelantados dentro de la convención de Lucha contra la Desertificación y la Sequía, resaltando las siguientes:

- En Colombia 24.534.200 de hectáreas están en zonas secas, es decir aproximadamente el 21.5 % del país. En la región Andina la distribución de las zonas secas está relacionada con los valles y cañones en sombra de lluvia. En la región de la Orinoquía se encuentra afectada las Sabanas del Meta, Vichada, Casanare y Arauca. La región Caribe se encuentran en sabanas, ciénagas, bosques de galería y manglares.

- En Colombia las regiones secas comprenden una gran variedad de ecosistemas que van desde los páramos en las partes más altas de las cordilleras sobre los 3.000 m.s.n.m. hasta los manglares en la costa Caribe. Hacen parte de estas regiones igualmente ecosistemas de sabana, bosques secos tropicales, zonas inundables, bosques de galería, entre otros.
- En el país el 78.9% de las zonas secas presentan algún nivel de degradación derivado de procesos de erosión y salinización. El área afectada tiene un cubrimiento de 193.510 Km², los cuales corresponden con el 16.95% del territorio nacional.
- Con relación a la intensidad a la erosión, en zonas secas se encuentran el 50% de las categorías de procesos erosivos más severos. Las categorías de intensidad moderada, alta y muy alta cubren grandes extensiones en la región Caribe, las sabanas de Meta, Arauca y Vichada, y los valles interandinos de los ríos Magdalena y Cauca. Por otra parte, los suelos susceptibles a la salinización en zonas secas cubren una extensión de 78.277 Km², es decir el 90% de los 86.952 Km² que tiene el país. Las zonas susceptibles a la salinización abarcan gran parte de la región Caribe, los valles de los ríos Magdalena y Cauca y las marismas de Mangle del litoral Pacífico.
- Las cuencas que presentan mayor cobertura de afectación por la desertificación se encuentran localizadas en las regiones Caribe, Andina y de la Orinoquía. Las cuencas de La Alta Guajira, Baja Guajira, y el Río Cesar se ven afectadas por la desertificación en más de tres cuartas partes de su área. Otras cuencas prioritarias para el país como el Bajo Magdalena y la Sabana de Bogotá poseen un nivel de afectación superior al 50% de sus respectivas áreas. A nivel Nacional la cuenca que aporta mayor extensión a las zonas de desertificación es la del bajo Magdalena.

Otro aspecto importante para la evaluación de la desertificación en Colombia, es la clasificación de las zonas secas caracterizadas por tener una marcada temporada deficitaria de precipitaciones y una alta evapotranspiración. La UNESCO (1993) estableció, partiendo de la relación de Precipitación (P) / Evapotranspiración (ETP), que las zonas ubicadas entre 0,03 – 0,20 son áridas, entre 0,20 – 0,50 son semiáridas y entre 0,50 – 0,75 son subhúmedas secas. Por su parte, la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación y la Sequía clasificó las zonas secas teniendo en cuenta el índice $P/ETP = 0,05 - 0,65$. Aquellas zonas ubicadas entre 0,05 – 0,20 son áridas, entre 0,20 – 0,50 semiáridas y entre 0,50 – 0,65 subhúmedas secas (PAN, 2005, p.29).

De acuerdo con los análisis documentados para comprender la desertificación a nivel mundial, regional y local, podemos decir que la desertificación en Colombia es la última etapa del proceso de degradación de la tierra debido a la interacción de varios factores de tipo antrópico y climático. Por lo tanto, la pérdida total de la productividad del suelo, genera un estado irreversible para su recuperación. Son muchos los elementos que influyen en los procesos de desertificación, especialmente para los ecosistemas secos en el País; como el monocultivos, deforestación, minería, ganadería intensiva y extensiva, desarrollo urbano, extracción y comercio de fauna y flora, sistemas de producción inadecuados, uso inadecuado de fuentes de agua superficial y subterránea, quemas indiscriminadas y cultivos ilícitos, han producido procesos como erosión, compactación o lixiviación de nutrientes, contaminación y sodificación. Por otra parte, el cambio climático y las temporadas marcadas por falta de lluvias, complementan el inicio del proceso de desertificación para Colombia. (PAN, 2005)

Finalmente, para el desarrollo del proyecto se tomaron también elementos relacionados con los procesos de origen natural que contribuyen con la degradación por desertificación y se describen con mayor detalle a continuación. (IGAC, et al., 2010)

Causas de origen natural:

- Características generales del clima: árido, semiárido y subhúmedo.
- Efectos de la radiación solar: Aumento de los valores de reflexión en la superficie del suelo (albedo)
- Características del régimen de lluvias: sequedad del aire y del suelo; escasa precipitación y/o desigual distribución, recurrencia de periodos de sequía, variabilidad de las precipitaciones en regiones con lluvias torrenciales
- Antecedentes geomorfológicos: influencia del relieve (orografía, cañones, materiales subsuperficiales.
- Características del suelo: débil proceso de formación de suelo; bajo contenido de humus; alto contenido calcáreo; elevada salinidad; presencia de suelos sueltos, vulnerabilidad a la erosión hídrica y eólica. Áreas sensibles a la erosión por el desgaste continuo de la superficie de la tierra por factores naturales.
- Características fitogeográficas: Baja densidad de cobertura vegetal: desarrollo estacional; escasa producción de biomasa, predominio de especies xerófilas y suculentas.
- Influencia de los procesos naturales de erosión hídrica y eólica.

Consecuencias:

- Degradación de la vegetación; disminución de especies, reducción de la cubierta vegetal, arbustización, disminución de especies palatables.
- Degradación del suelo: decapitamiento de los perfiles de suelo, cambios físicos, químicos y biológicos; pérdida de nutrientes.
- Aceleración de la erosión eólica (tormentas de viento, remolinos): exposición radicular, formación de lenguas de arena, dunas y pavimentos de desierto.
- Aceleración de la erosión hídrica: remoción y desmoronamiento del suelo, formación de pedestales de rocas y plantas, acanaladuras, cárcavas, montículos residuales y pavimento de desierto.
- Degradación del curso de aguas superficiales.
- Degradación del curso de aguas subterráneas: profundización de las napas.
- Salinización acentuada: exceso de sales, formación acentuada de costras de sal (el exceso de sodio destruye la estructura del suelo, el cual lo convierte en un suelo no apto para el crecimiento vegetal).
- Xerofitización en diferentes grados.
- Aridificación: déficit en balance hídrico, desplazamiento de la vegetación, reemplazo de especies mesófitas por xerófitas.
- Pérdidas económicas
- Inseguridad alimentaria
- Migración de la población

5.1 ESTADO DEL ARTE

A continuación, se realiza una revisión de proyectos y artículos desarrollados a través de la aplicación de la teledetección en la verificación de características de los suelos en diferentes regiones del mundo. Este proceso permitirá conocer las diferentes técnicas y resultados obtenidos para luego establecer desde el proyecto a desarrollar, cuáles son los recursos y herramientas a utilizar.

En el año 1997 se creó el Comité Científico Francés sobre la Desertificación (CSFD), con el objetivo de fortalecer la lucha contra la desertificación, involucrando a la comunidad científica francesa en la generación de conocimiento para orientar y asesorar a los responsables políticos y actores asociados a este combate. Su otro gran objetivo es fortalecer la posición de esta comunidad francesa en el contexto internacional. Entre sus publicaciones se destaca la “Teledetección: una herramienta para monitorear y evaluar la desertificación”, en la que exponen los resultados de experiencias con respecto al monitoreo de procesos de desertificación para apoyar a los países en desarrollo, especialmente a los que presentan zonas

áridas, semiáridas y sub-húmedas. Se mencionan también cinco variables importantes para evaluar indicadores de desertificación: rugosidad, albedo, temperatura de la superficie, la humedad del suelo e índice de vegetación.

Kosmas, Kirkby y Geeson (1999), formularon un sistema de información geográfica para determinar las áreas medioambientales sensibles a la desertificación (AMS) en los ecosistemas de Europa Mediterránea en Grecia (la isla de Lesbos), Italia (la cuenca del Agri en Basilicata) y Portugal (la región de Alentejo), a través de la formulación del modelo MEDALUS (Desertificación y Uso del Suelo en el Mediterráneo), el cual consistió en la evaluación y calificación de los elementos que influyen en los procesos de degradación del suelo para ser clasificados en indicadores biofísicos y socio-económicos y posteriormente calculados espacialmente con la media geométrica. Los elementos analizados en esta investigación estuvieron conformados por varios parámetros como geoformas, suelo, geología, vegetación, clima y acción humana. Cada uno de estos parámetros se agruparon dentro de varias clases (índices) con respecto a su comportamiento sobre el proceso de desertificación y se les asignaron factores de ponderación dentro de cada clase comprendidos en un rango de 1 a 2 (valores cercanos a "1" son menos influyentes y "2" más influyentes a la desertificación). Estos indicadores se ordenaron en cuatro calidades de la tierra: calidad del suelo, calidad del clima, calidad de la vegetación y calidad de la gestión. Consecutivamente estos últimos se integraron en el sistema de información a través del cálculo de la fórmula de sensibilidad ambiental (media geométrica). Los pixeles resultantes del promedio comprendidos dentro de los valores de los rangos mencionados ("1" a "2"), definieron las áreas más sensibles ambientalmente a la degradación. Estos valores se clasificaron en áreas críticas, frágiles, potenciales y no amenazadas por la desertificación.

Basso, et al. (2000) desarrollaron un marco metodológico de referencia, para su uso en la cuenca escala, a partir de la cual se puede evaluar la sensibilidad ambiental. Es un trabajo de 3 años de estudio e investigación sobre los procesos de degradación relacionados con la desertificación en el en el sur de Italia. Son presentadas diferentes etapas de degradación o riesgos de desertificación evaluados a escala. Los datos, y resultados obtenidos, se integran en una Sistema de Información SIG, junto con capas de información de escala regional relacionadas con variables ambientales y aspectos socioeconómicos. Todos los datos son gestionados en el SIG que facilita el acceso a la información y permite actualizarla de manera oportuna. Los objetivos principales de la presente investigación son, en primer lugar, establecer un sistema computacional para evaluar la respuesta de capas temáticas seleccionadas y evaluar los fenómenos de degradación y, en segundo lugar, aplicar la estrategia resultante a una situación específica en el ambiente mediterráneo.

Hountondji, Sokpon y Ozer (2005) analizan el estado de la productividad de la vegetación utilizando series temporales de tiempo con el sensor NOAA AVHRR para calcular datos con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y hacer la comparación con la precipitación. Para ello utilizó, 128 datos de pluviómetros (RR) y se compararon con el NDVI durante el período de 1982 a 1999. Durante los periodos analizados, la mayoría de las estaciones daban valores estables con la relación NDVI/RR, sin embargo, los valores débiles o menores confirmaban las posibilidades de presentarse eventos críticos para el suelo. Estas tendencias son negativas y pueden reflejar procesos de desertificación en Burkina Faso en África Occidental y podrían ser un punto de partida para la identificación de áreas de puntos de interés para determinar dónde tomar medidas para lucha contra la desertificación.

Boluda, Gil y Vidal (2005) en su investigación indican que el proceso de la desertificación es el resultado de la combinación de factores climáticos, geográficos, topográficos, hidrológicos, edáficos, bióticos que interactúan con las actividades humanas negativamente sobre el medio ambiente a diferentes escalas. Este proceso constituye una problemática medioambiental, el cual se acentúa en las zonas semiáridas. El suelo es un elemento muy importante de los ecosistemas que cumple una serie de funciones básicas medioambientales y socio-económicas que está a su vez influenciado por los factores ambientales. Por lo tanto, los cambios causados por las actividades antrópicas generan alteraciones en las propiedades del suelo que afectan las funciones ecológicas básicas del ecosistema. En esta investigación se sostiene la idea de que los estudios dedicados a la evaluación de la degradación y la calidad del suelo a partir de sus indicadores, es una metodología válida para caracterizar áreas degradadas susceptibles al proceso de la desertificación, así como para promover acciones que ayuden a combatirla.

Lavado, Schnabel, Gómez y Pulido (2010), determinaron la sensibilidad ambiental a la degradación en Extremadura (España) a través de la metodología basada en el modelo del proyecto MEDALUS (Desertificación y Uso del Suelo en el Mediterráneo) Sustentada por la Comisión Europea y estructurada por Kosmas et al. (1999). La identificación de las áreas con diferentes grados de sensibilidad ambiental se realizó en forma cartográfica mediante un índice (Índice de Sensibilidad Ambiental, ESAI), para cuyo cálculo se determinaron mediante elementos de calidad ambiental (clima, vegetación, suelo) y factores antrópicos (relacionados con la calidad del manejo y la gestión). Cada uno de los anteriores parámetros fueron clasificados dependiendo de un rango de valores y calificados según su peso de influencia en el proceso de degradación. Estos pesos de influencia variaron entre “1” para la mejor clase y “2” para la peor. Posteriormente se ordenaron en índices y se agruparon sus elementos de acuerdo al contexto espacial con las respectivas calificaciones de influencia. Como resultado se estructuraron cuatro índices parciales de calidad y el índice final

de sensibilidad ambiental de la degradación (ESAI). Los cuales se obtuvieron mediante la media geométrica de los diferentes parámetros implicados y expuestos a continuación:

SQI (Índice de Calidad del Suelo) = (Material parental * Textura * Profundidad del suelo * Pendiente * Capacidad de drenaje)^{1/5}

CQI (Índice de Calidad del Clima) = (Precipitación total anual * Aridez * Orientación)^{1/3}

VQI (Índice de Calidad de la Vegetación) = (Riesgo de incendio * Protección frente a la erosión * Resistencia a la sequía * Grado de cobertura)^{1/4}

MQI (Índice de Calidad del uso/manejos) = (Intensidad de uso del suelo * Políticas de manejo)^{1/2}

ESAI (Sensibilidad Ambiental de la Degradación) = (SQI * CQI * VQI * MQI)^{1/4}

Para la aplicación de los anteriores cálculos, se transformaron las capas de información espacial de formatos vectoriales a raster con un tamaño de pixel de 25*25 metros, semejantes al tamaño del pixel del modelo digital de elevación para el cálculo de la pendiente y la orientación topográfica. Finalmente, el resultado de la fórmula de sensibilidad ambiental, arrojó cuatro clases: áreas no afectadas (N), áreas potenciales (P), áreas frágiles (F) y áreas críticas (C) (Boluda et al., 2005).

Corso, Navone, Pietragalla, Bosio y Maggi (2011) evaluaron las variaciones de la gravedad del proceso de desertificación, a partir de un monitoreo en la cuenca del río Santa María en Argentina, utilizando como umbral de referencia el año 1995 hasta el 2011 a través de indicadores biofísicos y socioeconómicos integrados en un método visual, mediante una recopilación de los trabajos y experiencias existentes de la región. Establecieron que las prácticas de manejo inadecuadas aumentan los impactos negativos sobre los ecosistemas secos que por naturaleza son frágiles, disminuyendo la productividad de los mismos y como consecuencia el ingreso del productor.

Lam, Remmel y Drezner (2011) realizó un estudio aplicando una metodología para el seguimiento de la desertificación usando arena de dunas en Estados Unidos. El enfoque implicó la comparación de las características espectrales de las dunas usando imágenes Landsat (TM) a través de un período de 24 años (1982, 1988, 1994, 2000 y 2006). Durante este periodo, dos eventos de El Niño ocurrieron (1983 y 1993); se concluyó que, a pesar del cambio en los vientos predominantes, la variación a corto plazo en la dirección del viento no hizo un cambio notable en la formación de dunas, pero en gran medida influyó en la cobertura vegetal. Por lo

tanto, confiar únicamente en el monitoreo de vegetación para evaluar la desertificación puede llevar a sobreestimaciones en el análisis de predicción. Los resultados de este estudio indican que las dunas están experimentando una tasa de invasión de aproximadamente $5,9 \text{ m}^3 / \text{m} / \text{año}$ durante el periodo de 24 años.

Collado, Chuvieco y Camarasa (2012) plantearon un análisis de imágenes digitales para monitorear los procesos de desertificación en el centro de la provincia de San Luis (Argentina), donde se han observado signos de degradación del paisaje en las últimas décadas. Dos imágenes del Landsat, adquiridas en 1982 y 1992 se utilizaron para evaluar el potencial en el análisis de la teledetección para la vigilancia de la desertificación. Utilizaron técnicas de análisis multitemporal para enfatizar áreas de mayor degradación, a través de una clasificación en sus componentes digitales de la imagen para la vegetación, agua y zonas degradadas; facilitando la diferenciación de las coberturas.

Symeonakis y Drake (2012) plantean un sistema de vigilancia para monitorear la desertificación y la degradación sobre tierras de África Subsahariana, el cual fue desarrollado con base a cuatro indicadores o factores de influencia, utilizados a escala continental para datos obtenidos de teledetección: la cubierta vegetal, la eficiencia del uso de la lluvia (RUE), la escorrentía superficial y la erosión del suelo. La cobertura vegetal se calculó utilizando el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI). Para la estimación de RUE también se empleó NDVI y las precipitaciones derivadas de los datos del sensor Meteosat. La escorrentía superficial fue modelada con el modelo del Servicio de Conservación de Suelos utilizando las estimaciones de la lluvia, la cubierta vegetal, las coberturas y mapas digitales de suelos. La erosión, uno de los parámetros más indicativos del proceso de desertificación, se calculó a través de modelos de flujo superficial, la cubierta vegetal, mapas digitales de suelo y un modelo digital de elevación (DEM). Los cuatro anteriores indicadores se combinaron para destacar las áreas con mayor susceptibilidad a la degradación y generar tendencias a través de modelos espaciales para indicar las áreas más afectadas por la degradación.

Ortiz (2013) realiza en la universidad Surcolombiana, una investigación donde identifica y describe el avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico del Desierto de la Tatacoa. A través de un estudio multitemporal (1975, 1993 y 2010) en la que determina la dirección y la velocidad de la desertificación, teniendo como indicador de criticidad las áreas donde se ha perdido la cobertura vegetal y el proceso de erosión y desertificación es progresivo. Pasando en el año 1975 de un área de 2581,4 Hectáreas (5%) a 15723,8 Hectáreas (30,4%) en el año 2010, con una velocidad promedio de desertificación de 375,5 Hectáreas /año y con una dirección de expansión alta hacia el Occidente, el Norte, el Oriente y Suroriente. Este proyecto necesitó también de la recuperación de la memoria histórica de la comunidad asentada en el área de estudio.

Alatorre et al. (2015) realizaron un análisis de la evolución temporal y espacial de la recuperación y degradación en áreas con vegetación usando una serie temporal de imágenes Landsat TM (1986-2011), en la Región Central de Chihuahua, México. En este trabajo se analizó la evolución temporal y espacial de la dinámica de la vegetación en varias cubiertas de tierras en la cuenca de la Laguna de Bustillos, Región de Cuauhtémoc, Chihuahua, México. Se utilizó una serie temporal del NDVI para los meses de marzo a abril (principios de la primavera). Los resultados mostraron un incremento del NDVI para las zonas con vegetación, especialmente en la cubierta de coníferas, mientras los arbustos y pastizales mostraron una tendencia positiva, pero con significación estadística inferior. El aumento de las temperaturas mínimas a principios de la primavera, durante el período de estudio, fue el factor más importante para explicar el aumento de NDVI en zonas con vegetación. Un análisis de distribuido espacialmente muestra grandes áreas sin una tendencia NDVI, que corresponde a las zonas con escasa vegetación (áreas degradadas). Por otra parte, también hay áreas con una tendencia negativa (pérdida de la vegetación), explicado por la explotación de los árboles para producir leña que se lleva a cabo principalmente por los ejidos de la región.

Correa (2015) realizó una investigación que tiene como objetivo la evaluación de indicadores biofísicos de riesgo de desertificación en zonas del Valle del Cauca, mediante modelo metodológico multifactorial generado, para realizar el análisis integral de riesgo a desertificación (MARD). En la investigación se considera la estimación de la amenaza a desertificación, a través del uso de indicadores climáticos, geomorfométricos y de coberturas y usos del suelo, la generación del índice de vulnerabilidad del suelo, alcanzada mediante la estimación de la calidad inherente del suelo (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación) y la obtención del índice de riesgo a desertificación. En la investigación se diferencian las áreas con mayor o menor riesgo, apoyados en el análisis mediante el modelamiento espacial de superficies de datos disponibles, que ponderan la influencia a nivel regional de factores biofísicos en los procesos de desertificación y degradación de tierras, con mayor precisión y resolución, aplicable a regiones similares.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

Para contextualizar el análisis de las diferentes técnicas utilizadas para modelar la tendencia de la desertificación del Desierto de la Tatacoa, es necesario entender los conceptos que estructuran el funcionamiento del modelo espacial.

Uno de los términos más importantes, está directamente relacionado con la sensibilidad ambiental a la desertificación, Basso et al. (2000) define la sensibilidad ambiental como un concepto muy amplio donde se integran muchos factores relacionados que influyen en la degradación o desertificación del suelo. Una unidad ambiental sensible es considerada como una delimitación geográfica de estudio, en la que confluyen factores ambientales y socioeconómicos en el cual no son sostenibles para la continuidad productiva del suelo. De esta manera la sensibilidad ambiental es el resultado de las interacciones de elementos (capas espaciales de información) que están ligados de manera diferente de acuerdo a su contexto espacial de influencia a los fenómenos de degradación de manera directa o indirecta.

Para el Comité Científico Francés (CSFD), es importante entender cinco conceptos importantes para evaluar la desertificación: rugosidad, albedo, temperatura de la superficie, la humedad del suelo e índice de vegetación, los cuales se exponen a continuación (Begni et al., 2005).

La Rugosidad es un parámetro que permite cuantificar la irregularidad de una superficie. Cuanto más desigual es la superficie, mayor es el parámetro de rugosidad. La rugosidad se mide generalmente por el radar de la teledetección. Radar emite micro-ondas y mide la potencia con la que un objeto que refleja de vuelta (retrodispersión). Cuanto más desigual es la superficie, más fuerte es la retrodispersión.

Albedo, es decir, la fracción de energía solar reflejada desde la Tierra a la atmósfera, es la relación de la cantidad de luz reflejada por un objeto en relación a la cantidad de luz que incide en dicho objeto, es decir, la proporción de la luz reflejada de la luz incidente. El Albedo se expresa por un número que va de 0 (nada de la luz que incide sobre la superficie se refleja) a 1 (toda la luz que incide sobre la superficie se refleja), o por un porcentaje. El Albedo desempeña un papel en los balances energéticos y en el balance radiactivo ya que controla la cantidad de energía solar enviado de vuelta a la atmósfera. De hecho, el albedo de un suelo desnudo disminuye cuando aumenta su contenido de agua. El albedo de un terreno con vegetación depende de su tasa de cobertura de la vegetación y su actividad clorofílica.

La Temperatura de la superficie, varía en función de la naturaleza del suelo y la cubierta. Se da por los intercambios de energía que se producen por encima y por debajo de esta superficie. Por tanto, es en parte conectada con albedo, temperatura del aire y la eficacia de los intercambios térmicos. La Temperatura de la superficie se evalúa mediante la medición de la radiación infrarroja térmica emitida (longitud de onda comprendida entre 10,5 y 12,5 μm - teledetección pasiva). Su valor depende de la naturaleza del suelo y la cubierta.

La humedad del suelo es un parámetro de peligro para la desertificación. Hace referencia al contenido de agua de la superficie; se define por la cantidad de agua contenida en los diez primeros centímetros de suelo. Puede ser estimado por radar (teledetección activa), y está conectado con la temperatura de la superficie. Asimismo, regula el crecimiento de la cobertura vegetal (germinación, emergencia, llamativo de la raíz, etc.). En consecuencia, es un parámetro que bien vale la pena evaluar para la hidrología y agronomía, así como un parámetro de la advertencia de la desertificación.

El Monitoreo de la cobertura vegetal, se da a través de tres variables: la densidad de árboles, la biomasa y la vegetación natural. Esta última es importante en los procesos de desertificación por su importante aporte para la protección y conservación al suelo. Las imágenes de baja resolución recogida diariamente por los satélites, permiten calcular medidas de índices de vegetación, que a su vez permiten detectar zonas de riesgo y el estado de los recursos naturales.

Para analizar en una imagen satelital las áreas con mayor vigor vegetal y para reducir el efecto de las sombras originado por el relieve se recomienda el uso de los índices de vegetación. Existen variadas derivaciones del Índice de vegetación, algunas de las ecuaciones se pueden observar cuando se despliega la ventana del cálculo del Índice. Pero todos se basan en el uso de las bandas correspondientes al rango del espectro electromagnético del rojo y el infrarrojo. Posteriormente se debe realizar una clasificación a partir de la agrupación de los niveles digitales (ND) similares, tenido como referencia la especialización de los índices de vegetación. La buena clasificación para estos niveles digitales (ND) en categorías semejantes, dependerá para obtener un producto confiable y de calidad, representado en un mapa donde muestre las diferentes coberturas que existen en la imagen procesada. Por lo anterior es importante hacer una clasificación supervisada y no supervisada (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2011). A continuación, se exponen los diferentes métodos de clasificación digital:

Clasificación Digital No Supervisada. En este método no se requerirá conocimiento de los tipos de cobertura a priori. El proceso se basará en la elección de las bandas espectrales de la imagen a clasificar, definición de número de clases espectrales, selección de los criterios de similitud y algoritmos de agrupación de los ND. En este método es el propio algoritmo quien definirá las clases de acuerdo a los datos. Para llevar esto a cabo será necesario suministrar algunos valores tales como el número de clases que se desea crear, los tamaños mínimos y máximos de cada una, o ciertas tolerancias para la distinción entre clases. Estos parámetros guiarán al algoritmo en la definición de clases, que se produce en estos métodos de forma simultánea a la asignación de los elementos a una u otra de dichas clases. En general, se tratará de procedimientos iterativos en los que una clasificación inicial va convergiendo hacia una final en la cual se cumplirán las características buscadas de homogeneidad, número de clases, etc. (IGAC, 2011).

Clasificación Supervisada: la clasificación supervisada, requerirá de cierto conocimiento previo del terreno y de los tipos de coberturas, a través de una combinación de trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas, mapas e informes técnicos y referencias profesionales y locales. Con base de este conocimiento se definirán y se delimitarán sobre la imagen las áreas de entrenamiento o pilotos. Las características espectrales de estas áreas serán utilizadas para "entrenar" un algoritmo de clasificación, el cual calculará los parámetros estadísticos de cada banda para cada sitio piloto, para luego evaluar cada ND de la imagen, compararlo y asignarlo a una respectiva clase. La clasificación supervisada definirá las clases temáticas que no tengan claro significado espectral, considerada por esto como un método artificial. (IGAC, 2011)

El proceso de clasificación supervisada, se resumirá en las siguientes etapas: análisis visual y estadístico de la imagen y de sus bandas, elaboración de la leyenda del mapa, selección y delimitación de áreas pilotos, generación y evaluación de sus estadísticas y reajustes, elección y aplicación del algoritmo de clasificación, reajustes y clasificación de nuevo, y finalmente, la evaluación de los resultados y su presentación (IGAC, 2011).

Es importante hacer una primera identificación en la imagen satelital de las áreas con existencia o no de cobertura vegetal antes de entrar en la clasificación de los niveles digitales para ir contextualizando la identificación de las cubiertas. Para ello es importante realizar una aplicación de índices de vegetación como el Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI). Este índice de vegetación conocido como NVDI por sus siglas en inglés (Normalized Difference Vegetation Index) es más utilizado para la discriminación de cubiertas vegetales y la actividad fotosintética de las plantas. Su cálculo se basa en la comparación de la cantidad de luz reflejada en el visible rojo y el infrarrojo cercano para una zona en particular de estudio (IGAC, 2011).

Una forma de calcular este índice de vegetación NDVI, es sustraer la cantidad de luz visible observada en el infrarrojo cercano del visible rojo, y luego dividir por la cantidad total de luz reflejada en ambas longitudes de onda. Los valores del NDVI son valores numéricos reales, que van desde -1 a +1, donde la vegetación está presente en el rango de 0.1 (menor vigor vegetal) hasta 1.0 (mayor vigor vegetal), el valor menor de este rango representa ausencia de vegetación. El resultado del NDVI es una nueva banda, generalmente, su visualización se realiza con una escala de colores, que pueden ir desde el rango de azules, café, hasta el rango de verdes

Otra técnica de procesamiento de imágenes de satélite para resaltar las diferencias de las coberturas, es a través de los Componentes principales. El cálculo de Componentes Principales deriva las imágenes sin redundancia espectral a partir de las bandas originales. Las bandas de Componentes Principales, son independientes y no correlacionadas y a menudo son más interpretables que la imagen fuente (Aguilar, 2014).

El concepto parte del tema del análisis estadístico multibanda de imágenes, concretamente la correlación entre bandas. Este análisis estadístico entrega una medida de la relación existente entre los niveles digitales. Es muy frecuente, por ejemplo, que diferentes bandas del espectro del visible se encuentren altamente correlacionadas, o que presenten una información espectral similar, debido a que la reflectancia de las diferentes cubiertas tiene respuestas similares. Un gráfico estadístico muy útil para observar este grado de correlación entre bandas son los gráficos de dispersión, estos gráficos representan cada ND de los píxeles de un par de bandas, si los datos están correlacionados los píxeles tienden a formar una línea, caso inverso se puede deducir que los datos no están correlacionados (IGAC, 2011).

Correa (2015) argumenta que los factores climáticos (índice de aridez, índice de concentración de las precipitaciones, índice de agresividad climática y temperatura superficial del suelo) y los factores geomorfológicos (la pendiente, el factor longitud de la pendiente, la Curvatura y el índice topográfico de humedad- ITH) son aquellos indicadores de presión, que implican tendencias climáticas propias de las zonas objeto de la evaluación, fenómenos o eventos climáticos extremos y atributos geomorfométricos, que aceleran los procesos de degradación del suelo y están asociados a la desertificación. Los factores de cobertura y usos del suelo (protección a erosión; resistencia a sequía, uso intensivo del suelo y riesgo a fuego y capacidad de recuperación) son también indicadores de presión que describen patrones de desarrollo humano, que inciden en la aparición o agudización de los procesos de degradación, coligados con el uso y manejo de la tierra, cambio en las coberturas vegetales, avance de centros poblados e infraestructura y aumento en la densidad de poblaciones.

Correa (como se citó en Dascal, 2012) describe que los atributos climáticos corresponden a indicadores que muestran tendencias climáticas basadas en el comportamiento y relación de la precipitación (P) y la evapotranspiración de referencia (ET_o) para determinación de periodos de déficit hídrico y variabilidad e intensidad del régimen de aridez o régimen hídrico, que tienen efecto directo en la cobertura vegetal. Se piensa que los ecosistemas dependiendo de su naturaleza y de las características e intensidad de los procesos, podrían soportar más fácilmente los cambios graduales en la temperatura, la humedad relativa o las precipitaciones, que las modificaciones en los balances hídricos o en la intensidad y la concentración de las precipitaciones. A continuación, se describen los índices que relacionan estos parámetros climáticos.

El índice de aridez (IA) define el lapso de deficiencia y disponibilidad de agua en un periodo específico relacionando la precipitación y la evapotranspiración de referencia en el sistema considerado. (Correa, 2015)

El Índice Concentración de las precipitaciones (ICP); Permite evaluar la distribución de la lluvia a lo largo del año y define la estacionalidad de las lluvias. Bajo condiciones de precipitaciones concentradas se complica el manejo de agua, el control de riego, la prevención de erosión hídrica y la agricultura de secano. (Verbist, Santibañez, Gabriels, Gabriels y Soto, 2015).

Las características del terreno referente a la forma del relieve, también son factores que influyen drásticamente en los procesos erosivos que confluyen al desarrollo de la desertificación. Estos escenarios se analizan a través de los Modelos Digitales de Elevación para estimar los siguientes atributos:

Índice de Fournier modificado (IFM) o índice de agresividad climática; relaciona la ocurrencia de precipitaciones con su promedio anual y mide la intensidad con que tienen lugar las precipitaciones. Este índice está asociado con la capacidad de la precipitación de provocar erosión hídrica. Por lo tanto, se llama también Índice de Agresividad Climática (Correa, 2015).

La Pendiente y el Factor Longitud de la pendiente (LS), influyen en la velocidad de flujo, transporte de sedimentos, distribución de la vegetación, contenido de agua en el suelo y clases de capacidad de uso. Hidrológicamente la pendiente indica la cantidad de energía gravitacional disponible para manejar un flujo de agua. Sus principales atributos son: gradiente y complejidad, configuración, longitud (corta o larga) y aspecto (Buitrago, 2011).

La Curvatura (C), la curvatura es la tasa de cambio de la pendiente y se expresa en términos de curvatura del perfil o vertical (CV) (en la dirección de la pendiente) y curvatura del plano horizontal (CH) (perpendicular a la dirección de la pendiente). Valores positivos describen la curvatura convexa, valores negativos la curvatura cóncava, valores cercanos a cero indican que la zona es plana. Están asociadas con acumulaciones de flujo y dispersión de materiales y con patrones de vegetación, de erosión, escorrentía, profundidad de horizontes, humedad del suelo, etc, (Correa, 2015).

El índice topográfico de humedad (ITH), representa la relación entre el área de drenaje y la pendiente. Describen los sitios donde se presentan mayor acumulación de agua, zonas de saturación y la disposición a la dispersión de un flujo en forma de escorrentía en las zonas de sedimentación (Leiva, 2015).

El Factor del Índice Óptimo (OIF), es un valor estadístico que puede ser usado para seleccionar la combinación a color óptima de tres bandas de una imagen satelital. El cálculo de OIF se realiza sobre todas las posibles combinaciones de la imagen, y se basa en la selección de las bandas que conserven la mayor información espectral (mayores covarianzas entre bandas) y la menor duplicidad de información (menores correlaciones entre bandas). El mayor valor de OIF corresponde a la combinación de bandas con menor correlación entre ellas y con mayor desviación

estándar para cada banda indicando la mayor posibilidad de discriminación de coberturas estudiadas (Correa, 2015).

Con respecto al modelamiento de los puntos de las estaciones climáticas para espacializar el área de estudio, es necesario aplicar un método geoestadístico conveniente. El método de Kriging es una de las técnicas más utilizadas de interpolación geoestadística. Para Gallardo (2006) la fortaleza de esta técnica estriba en el conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio. Así, la forma del semivariograma nos indica la capacidad predictora que tiene cada punto en función de la distancia que lo separa con otro punto. Los puntos más allá del rango, es decir cuando el semivariograma se vuelve plano, tienen la mínima capacidad predictora. A la hora de realizar un kriging hay que, además de suministrar los parámetros del semivariograma isotrópico o los anisotrópicos, decidir la estrategia adecuada para la selección de puntos para la interpolación. Si el número de valores en el espacio es suficiente, disminuir el radio de búsqueda de puntos puede ser la mejor estrategia, ya que evita problemas de estacionariedad, aunque hay que procurar que el radio de búsqueda no sea inferior al rango, ya que no se utilizaría toda la información que proporciona el semivariograma. Otra decisión a tomar es el tipo de interpolación: puntual o por bloques. Mientras que la interpolación puntual es la estima del valor de la variable en un punto del espacio, en la interpolación por bloques esta estima se corresponde con la media de un área predeterminada que rodea a ese punto (Gallardo, 2006).

5.3 MARCO CONTEXTUAL

El desierto de la Tatacoa es la segunda zona árida más extensa de Colombia después de la península de la Guajira. Es un parque turístico con una superficie de 330 Km². La tierra se caracteriza por ser de color ocre y gris adornados por los Cactus. Constituye un paisaje geográfico compuesto por formaciones geológicas. Está ubicada cerca al casco urbano del municipio de Villavieja. Sus coordenadas geográficas son de 3°13' de Latitud Norte y 75°10' de Longitud Oeste. La zona está muy erosionada y cruzada por cañones secos que se desarrollan transitoriamente en los meses del invierno. Estas misteriosas formas se crean sobre superficies arcillosas, generando en el paisaje cárcavas laberínticas que pueden alcanzar hasta 20 m de profundidad (Colparques, 2017).

Figura 1. Foto del desierto de la Tatacoa.



Fuente: <http://www.colombia.com/turismo/sitios-turisticos/huila/atractivos-turisticos/sdi465/78311/desierto-de-la-tatacoa>

Según la descripción de Patiño (2001), la Tatacoa, se encuentra representada geológicamente por rocas sedimentarias clásticas de origen continental y de ambientes fluviales y lagunar principalmente, correspondientes estratigráficamente al llamado grupo Honda en su sección medio a superior. La parte media superior del grupo Honda aflorante en la región de la Tatacoa ha sido dividida en tres formaciones, con un espesor total de unos 500 m, una de ellas es la Formación Villavieja, la cual ha sido dividida en cuatro miembros con un espesor de 140 m; algunos de interés son:

- Miembro Las Lajas: con un espesor de unos 40 m. Se encuentra distribuido a lo largo de toda la zona central del desierto, litológicamente está constituido por limolitas, arcillolitas y niveles de arenisca. Las limolitas presentes en capas de estratificación fina a media son de color rojizo, café, verde y amarillo, dando una gran variedad de tonalidades al paisaje, las areniscas de color amarillo naranja son de grano fino a medio, matriz arcillosa y se presenta en forma de cuñas y lentes con estratificación media a gruesa. (Patiño, 2001)
- Miembro de la Tatacoa: aflora al sur del desierto y presenta un espesor de unos 48 m, y ha sido denominado por varios investigadores como las capas rojas superiores. Litológicamente está compuesto por arcillolitas con delgadas intercalaciones de limolitas y areniscas. Las arcillolitas son de colores grises, rojos, amarillos, verdes y presenta intensos fenómenos erosivos formando cárcavas y zanjones. Las limolitas se presentan en forma de lentes y son de colores gris verdosos a cafés. (Patiño, 2001)

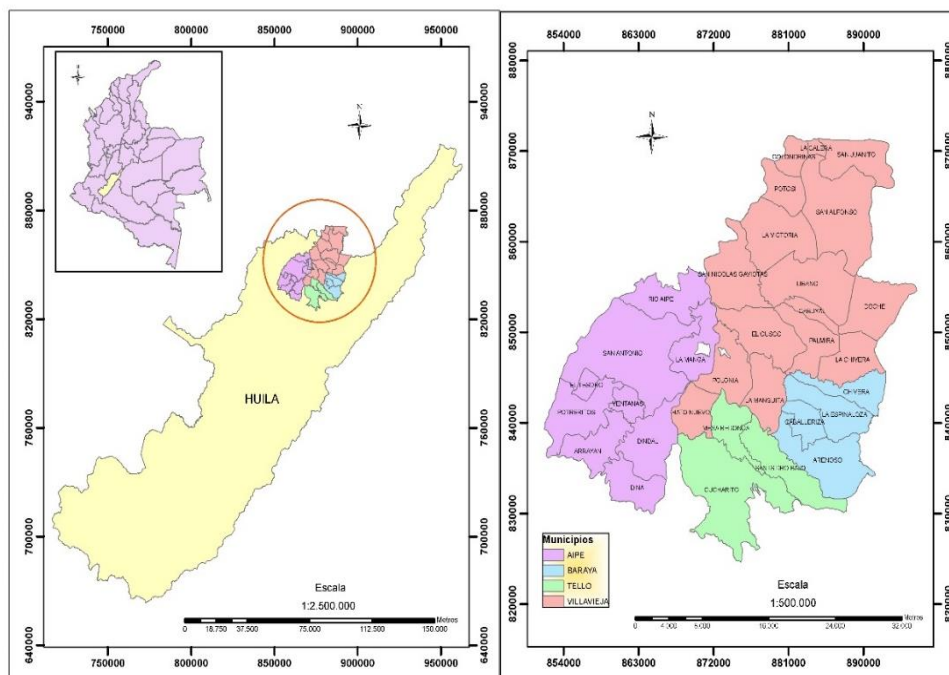
La vegetación predominante es del tipo herbáceo y arbustivo. El suelo se caracteriza por ser muy erosionado, con población de vegetación espinosa y captus. En general el área presenta una vegetación xerófila con suelos en diferentes escalas de degradación.

5.4 ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Villavieja está localizado en la zona norte del departamento del Huila, en el valle interandino de la cuenca alta del río Magdalena, limitando al norte con el municipio de Natagaima (Departamento del Tolima), al oriente con los municipios de Alpujarra (Departamento del Tolima) y el municipio de Baraya, al sur con los municipios de Baraya y Tello y al occidente con el municipio de Aipe, con un rango de temperaturas comprendidas entre 26,2°C a 26,6°C y con alturas comprendidas entre los 350 y los 1400 m.s.n.m. en la Cuchilla el Valle y Alto Buenos Aires. (Ortiz, 2013)

El área de estudio comprende espacialmente todas las veredas del Municipio de Villavieja, Baraya (cuatro veredas), Tello (tres veredas) y Aipe (nueve veredas).

Figura 2. Área de estudio.



Fuente. Presente estudio, 2017

Tabla 1. Veredas área de estudio.

Municipio	Vereda
AIPE	POTRERITOS
	VENTANAS
	SAN ANTONIO
	ARRAYAN
	DINA
	EL TESORO
	RIO AIPE
	LA MANGA
	DINDAL
	BARAYA
ARENOSO	
LA ESPINALOZA	
CHIVERA	
TELLO	CUCHARITO
	MESA REDONDA
	SAN ISIDRO BAJO
VILLAVIEJA	LIBANO
	CABUYAL
	SAN JUANITO
	LA CALERA
	DOCHE
	SAN ALFONSO
	GOLONDRINAS
	POTOSI
	LA VICTORIA
	SAN NICOLAS GAVIOTAS
	EL CUSCO
	POLONIA
	HATO NUEVO
	LA MANGUITA
PALMIRA	
LA CHIVERA	

Fuente. Presente estudio, 2017.

6 METODOLOGÍA

La metodología se desarrolló en base a dos etapas establecidas en el análisis multitemporal para un periodo total de 27 años (1987 - 2014) y el modelo espacial para el análisis a la tendencia a la degradación.

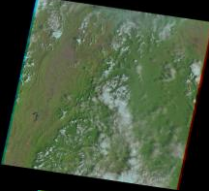
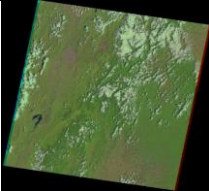
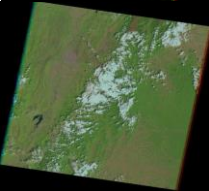
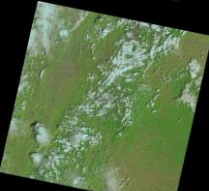
6.1 ANÁLISIS MULTITEMPORAL PARA CUATRO PERIODOS: 1987, 2000, 2010 Y 2014

Para el procesamiento y análisis multitemporal se emplearon imágenes de los sensores OLI, ETM+ y TM de los satélites Landsat 8, Landsat 7 y Landsat 5, respectivamente, que permitieron estudiar cuatro periodos comprendidos entre los años de 1987, 2000, 2010 y 2014; para un rango total de 27 años. Con la condición que no presentaran historiales de afectaciones climáticas muy severas por el fenómeno del niño y la niña. La escala de trabajo fue de 1:100.000 y se tuvieron ayudas complementarias para la verificación de las coberturas con imágenes de otros servidores como las librerías de imágenes de Arcgis 10.3, portal SAS.Planet y Google Earth.

Se seleccionaron las imágenes correspondientes a los periodos de estudio (1987, 2000, 2010 y 2014), procurando que el área de interés estuviera libre de nubes en un 90 %, de tal manera que no afectará la interpretación digital de las cubiertas del terreno y el procesamiento. Las imágenes Landsat fueron descargadas del visualizador global del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS. (GloVis). (United States Geological Survey [USGS], 2017)

Posteriormente se recortaron las imágenes para minimizar la cantidad de datos y los tiempos para agilizar la ejecución de los procesos del software Arcgis y ERDAS.

Tabla 2. Imágenes Landsat 8-OLI, 5-TM y 7-ETM+ utilizadas en la interpretación. Años; 1987, 2000, 2010 y 2014.

Path	Row	Satélite Sensor	Identificación de la escena	Fecha de adquisición (día/mes/año)	Imagen
008	058	L5 TM	LT50080581987039XXX01	08/02/1987	
008	058	L7 ETM+	LE70080582000051EDC00	20/02/2000	
008	058	L5 TM	LT50080582010022CHM00	22/01/2010	
008	058	L8 OLI	LC80080582014033LGN01	02/02/2014	

Fuente: <http://glovis.usgs.gov/>

6.1.1 Cálculo del factor del índice óptimo (OIF).

Para seleccionar las combinaciones a color óptimas de tres bandas de las imágenes de estudio, se calculó el valor estadístico del índice óptimo (OIF). El OIF permitió seleccionar las bandas que conservaron la mayor información espectral (mayores covarianzas entre bandas) y la menor duplicación de información (menores correlaciones entre bandas). Se expresa por la siguiente ecuación:

$$\text{OIF} = \frac{\text{Suma de desviación estándar de 3 bandas individuales}}{\text{Suma de coeficiente de correlación}}$$

El mayor valor de OIF correspondió a la combinación de las bandas con menor correlación entre ellas y con mayor desviación estándar para cada banda indicando la mayor posibilidad de discriminación de coberturas. (IGAC, 2011)

6.1.2 Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI).

Como referencia para discriminar las cubiertas vegetales y la actividad fotosintéticas de las plantas de las áreas con poca o nada cobertura vegetal se utilizó el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), para tener una base en la edición de las coberturas. Se procedió al procesamiento de las bandas del infrarrojo cercano y la banda del visible rojo, con la siguiente formula:

$$NDVI = \frac{BIRC - BR}{BR + BIRC}$$

Donde:

BIRC = Banda del Infrarrojo cercano

BR = Banda del Visible Rojo

Los valores del **NDVI**, son valores numéricos reales, que van desde -1 a +1, donde la vegetación está presente en el rango de “0,1” (menor vigor vegetal) hasta “1,0”. Los valores negativos entre “-1,0” hasta “0,0” representan superficies sin vegetación.

6.1.3 Clasificación Supervisada.

Se realizó una clasificación supervisada con el fin de determinar las coberturas existentes. Para la clasificación supervisada se necesitó del conocimiento previo del terreno y de los tipos de cobertura, a través de una combinación de análisis de imágenes de Ortofotomosaicos de los portales web de Arcgis, SAS.Planet y Google Earth. También se utilizaron informes técnicos y referencias espaciales como el Mapa de cobertura de la tierra de Colombia (Periodo 2005 - 2009) del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014). Y un estudio Multitemporal realizada por la Universidad Sur Colombiana sobre la identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico desierto de la Tatacoa (Ortiz, 2013). Con base en este conocimiento se definieron y se delimitan sobre la imagen las áreas de

entrenamiento (áreas pilotos). Las características espectrales de estas áreas fueron utilizadas para "entrenar" un algoritmo de clasificación para cada tipo de cobertura del suelo, el cual calculó los parámetros estadísticos de cada banda para cada sitio piloto, para luego evaluar cada Nivel Digital (ND) de la imagen, donde se compararon y se fueron asignaron a una respectiva clase o tipo de cobertura. (IGAC, 2011)

6.2 MODELO ESPACIAL PARA EL ANÁLISIS A LA TENDENCIA A LA DEGRADACIÓN

La estructura general del modelo propuesto para análisis a la tendencia a la desertificación se fundamenta en los planteamientos de Kosmas et al. (1999), Basso et al. (2000) y Correa (2015); donde se califican y evalúan la influencia de las capas sobre los fenómenos ambientales estudiando, a través de la siguiente fórmula de sensibilidad ambiental o media geométrica:

$$ES = (\text{layer}_1 \text{ ij}) (\text{layer}_2 \text{ ij}) (\text{layer}_3 \text{ ij}) \dots (\text{layer}_n \text{ ij})^{(1/n)}$$

Donde

ES: sensibilidad ambiental

Layer: Capa de información espacial en formato Raster

n: número de layers o capas de información

Los atributos, se clasifican en una escala que va de 1 a 2, siendo el menor valor, correspondiente a una calificación baja, esto es, deseable y el mayor valor, correspondiente a una calificación alta, esto es, limitante. (Correa, 2015)

Con base en lo anterior, se planteó evaluar las capas de información espacial para cada indicador de influencia a través de tres submodelos espaciales de acuerdo al contexto climático, geomorfológico y de cobertura y uso del suelo, con la fórmula de sensibilidad ambiental a la desertificación propuesta a continuación:

$$ES = (\text{IC} * \text{IG} * \text{CobUso}) ^ (1/3)$$

Donde:

ES: Sensibilidad ambiental a la desertificación.

IC: Indicador Climático.

IG: Indicador Geomorfométrico

CobUso: Indicador Cobertura y uso del suelo.

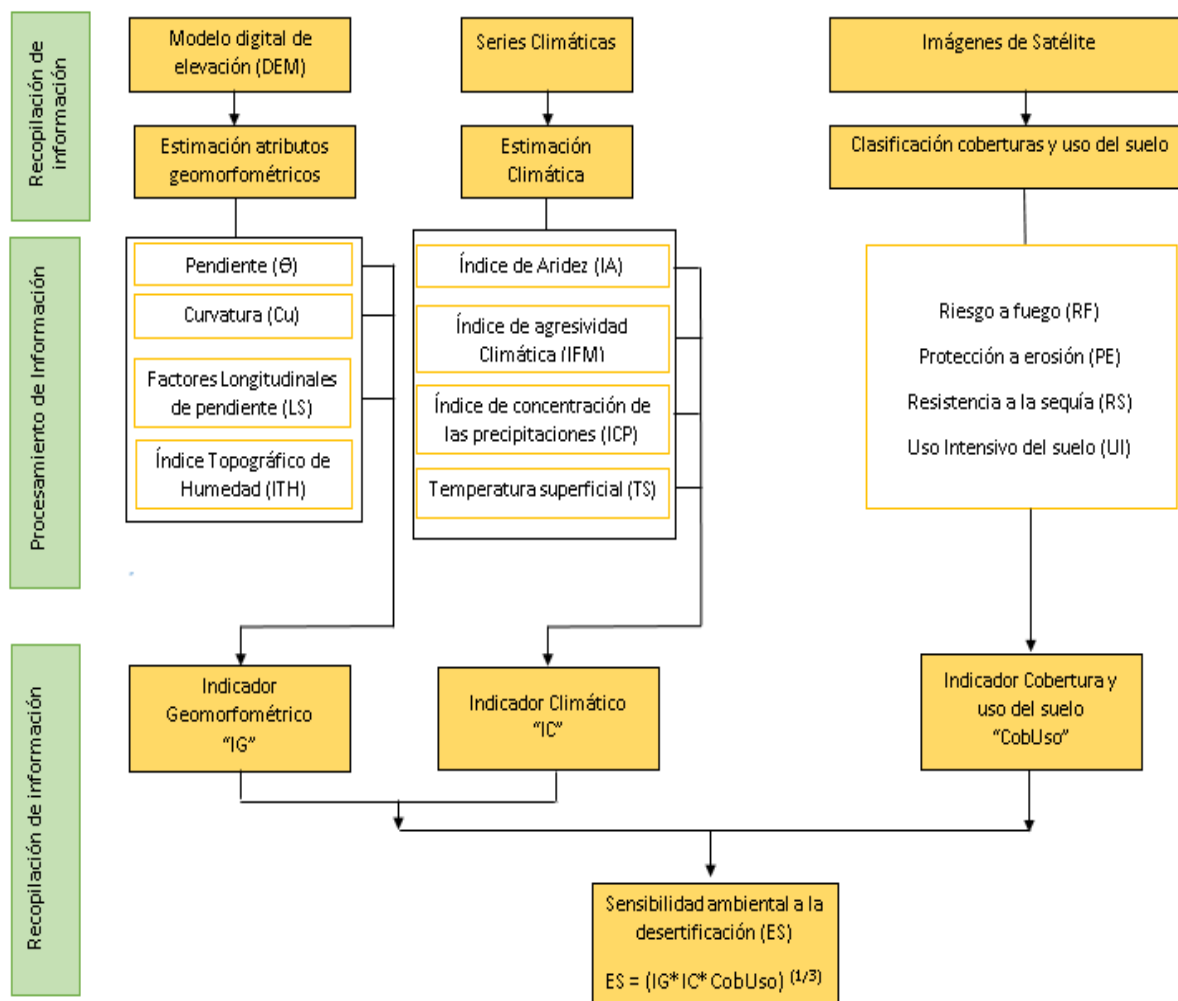
Cada submodelo o indicador también se calculó con la fórmula de sensibilidad ambiental (media geométrica) teniendo en cuenta el número de capas raster de los elementos para ponderarlo en el denominador del exponente fraccionario y obtener el valores del pixel comprendido con valores de 1 a 2.

Desde esta perspectiva, se implementó un sistema conceptual que resume y caracteriza los principales elementos y sus interrelaciones en tres indicadores o submodelos, los cuales se combinaron a través de la anterior fórmula (ES) para crear determinadas situaciones críticas, de mayor o menor gravedad. Posteriormente se generaron salidas grafica de influencia Alta, Media y Baja a la degradación o desertificación.

Los factores de cada indicador, se obtuvieron a través de los servidores de instituciones nacionales e internacionales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales de Colombia – IDEAM, Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC y el Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS.

La figura 3 muestra el resumen del modelo conceptual establecido en el presente trabajo de investigación. Este consistió en la recopilación de información relacionada con el contexto climático, geomorfológico y de cobertura y uso del suelo para agruparlos en los indicadores o submodelos y general a través del modelo general, las áreas más sensibles a la desertificación.

Figura 3. Modelo conceptual.



Fuente. Presente estudio, 2017

Tabla 3. Fuente de información y clasificación de atributos seleccionados para estimación de indicadores geomorfológicos, climáticos y de cobertura y uso del suelo.

Indicador o Submodelo	Atributos	Fuente de información
Climático	Índice de Aridez (IA)	Registros climáticos históricos de las estaciones climáticas del IDEAM.
	Índice de agresividad climática (IFM)	
	Índice de concentración de las precipitaciones (ICP)	
	Temperatura del suelo	Imagen de Satélite Landsat 8
Geomorfométrico	Pendiente	Modelos digitales de elevación (MDE) Satélite Alos Palsar
	Curvatura	
	Factor LS	
	Índice Topográfico de Humedad	
Cobertura y uso del suelo	Riesgo a fuego y capacidad de recuperación	Imágenes satelitales Landsat 8 y otros Portales de galería de imágenes.
	Protección del suelo a erosión	
	Resistencia a sequía	
	Uso intensivo del suelo	

Fuente. Presente estudio, 2017

6.2.1 Descripción de atributos para estimación de los indicadores geomorfométricos, climáticos y antrópicos.

6.2.1.1 Atributos del indicador climático.

Para el cálculo del Índice de Fournier modificado (IFM) o índice de agresividad climática y el Índice de concentración de las precipitaciones (ICP), se utilizaron las series históricas de 28 estaciones climatológicas que determinaron las precipitación para de cada mes durante un periodo de 27 años (entre 1987 y 2014). Para algunos datos faltantes en algunos meses del año se promediaron los valores existentes de las estaciones más cercanas. Estos datos fueron suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales de Colombia – IDEAM.

Tabla 4. Estaciones climatológicas del área de estudio.

Código	Estación
21130110	PRAGA
21110330	POLONIA
21115100	PALACIO-VEGALARGA
21115020	APTO BENITO
21110040	HATO MILAGRO
21130180	ALTAMIRA DC HDA
21115060	SAN JOSE
21140100	SAN JUANITO
21140110	TOMO EL
21115160	MANILA LA HDA
21110070	BARAYA
21120040	POTRERITO
21130040	SAN LUIS
21115070	PORTAL EL
21110120	YEGUERA LA
21140030	ARIZONA
21110180	HATO BOGOTA
21110090	POTOSI
21145040	SAN ALFONSO
21130050	PEREZ HDA
21110160	MESA REDONDA
21110290	VICTORIA LA
21115080	VILLAVIEJA
21130080	ORGANOS
21140120	CRUCES LAS

Fuente. IDEAM (2017).

Para el índice de aridez (IA) se utilizaron los servicios Web Feature Service (WFS) del IDEAM para descargar el mapa del índice de aridez de las regiones de Colombia

a escala 1:100.000 del año 2010 y posteriormente recortar el área de trabajo para el análisis y procesamiento. El índice de aridez es la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial para un período determinado. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2010)

$$I = P/ETP$$

Donde;

I: Índice de Aridez

P: precipitación promedio (en mm/década)

ETP: evapotranspiración potencial media (en mm/década)

El Índice de Fournier modificado (IFM) o índice de agresividad climática; relacionó la ocurrencia de precipitaciones con su promedio anual y midió la intensidad con que tienen lugar las precipitaciones. También se promediaron los valores de cada año para los 27 años de estudio (1987 a 2014).

$$\sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

Donde:

P_i: Precipitación mensual (mm)

P: Precipitación anual (mm)

El Índice concentración de las precipitaciones (ICP); Permitió evaluar la distribución de la lluvia a lo largo de cada año y definió la estacionalidad de las lluvias para posteriormente promediarlas en un rango total de 27 años (1987 a 2014).

$$ICP = 100 \frac{\sum P_i^2}{P^2}$$

Donde:

P_i: Precipitación mensual (mm)

P: Precipitación anual (mm)

Para la interpolación Geoestadística de los puntos de las estaciones climáticas referente al índice de concentración de las precipitaciones (ICP) y el Índice de Fournier modificado (IFM) o índice de agresividad climática se utilizó el método de “kriging”, el cual correlacionó la distancia espacial de los datos para las áreas más

cercanas de cada estación, es decir que los valores espaciales se asemejan a los datos existentes de las estaciones más próximas o colindantes. Para evaluar la calidad de las estimaciones de los datos, se analizó la ecuación espacial (primer grado o de segundo grado) que mejor se ajustaba a la distribución de los datos, el tipo de transformación y la Anisotropía.

La temperatura superficial de la tierra se calculó con las bandas 10 y 11 de la imagen Landsat 8. Como requisito se utilizó la imagen del NDVI. (United States Geological Survey [USGS], 2016)

Del metadato se recolectaron los siguientes datos necesarios para el procesamiento de la temperatura:

- Radiancia de las bandas TIR:

RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04

RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04

RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000

RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000

- Constante de Temperatura:

K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.89

K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.89

K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.08

K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.14

A continuación, se calculó la radiancia de las bandas 10 y 11 en la calculadora del Algebra de mapas de Arcgis 10.3; utilizando la siguiente formula:

$$L\lambda = MLQ_{cal} + AL$$

Donde:

$L\lambda$: TOA radiancia espectral (Watts/ (m² * srad * μ m))

ML: Band-específica factor de cambio de escala multiplicativo de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)

AL: Band-específica aditivo reescalar el factor del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda)

Qcal: valores de los píxeles de productos estándar cuantificados y calibrados (DN)

Posteriormente se calculó la temperatura de brillo usando para ello la constante térmica suministrada en el archivo del metadato.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Donde:

T: A-satélite temperatura de brillo (K)

L_λ : TOA radiancia espectral (Watts/ (m² * srad * μ m))

K₁: constante de los metadatos (K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda térmica) de conversión térmica.

K₂: constante de los metadatos (K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda térmica) de conversión térmica.

Para que el cálculo diera en grados Celsius, se restó en valor de conversión de 272,5.

Se calculó la emisividad de la superficie de la Tierra (LSE) a partir de la imagen NDVI para calcular la radiancia emitida por la cobertura de la tierra. Pero antes se determinó la proporción de la vegetación (grado de cobertura de vegetación- Pv), para posteriormente calcular el LSE:

$$Pv = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

PV: Proporción de la vegetación.

Con el valor de proporción de la vegetación (Pv), se calculó la emisividad de la superficie de la Tierra (LSE)

$$LSE = mPv + n$$

LSE: emisividad de la superficie de la tierra.

m: emisividad de la vegetación (0,004)

n: emisividad del suelo (0,986)

Finalmente, en base a Guamal (2015), se calculó la temperatura superficial de la tierra, con los datos de las formular anteriores, aplicando la siguiente:

$$BT / 1 + w * (BT / p) * \ln (e)$$

Donde:

BT: Temperatura del satélite (tanto de la banda térmica 10 u 11)

w: longitud de onda de radiación emitida (Se coloca la banda 10 u 11)

p: 14380 es una constante extraída de la siguiente formula $h*c/s$ ($1,438*10^{-34}Js$)

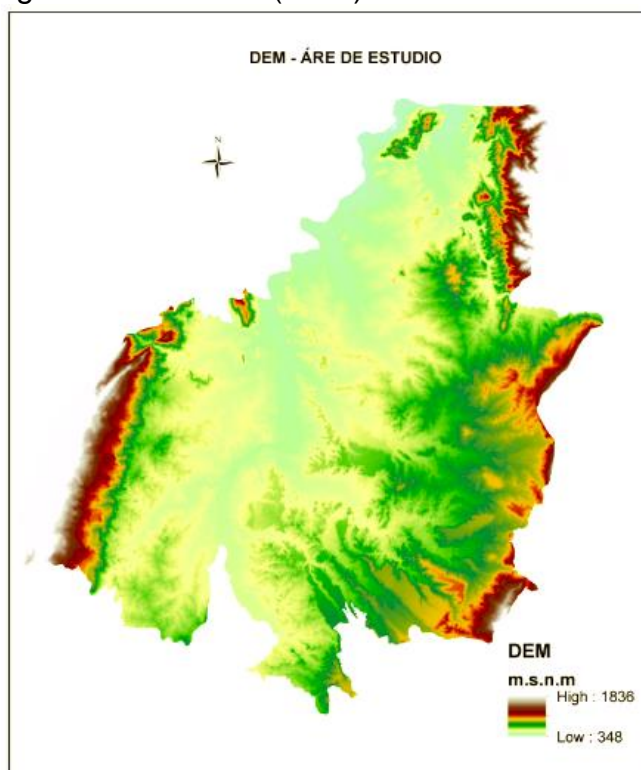
e: LSE

6.2.1.2 Atributos del indicador de Cobertura y Uso del suelo.

Para los atributos geomorfológicos se utilizó el modelo digital de elevación (DEM) de las imágenes de radar del satélite Alos Palsar descargada del portal de Alaske Satellite Facility- UAF. (Alaske Satellite Facility- [UAF], 2017)

El DEM de esta imagen tiene una resolución espacial 12,5 metros (m). Para el área de estudio se utilizaron tres imágenes para abarcar la totalidad de la zona de interés y posteriormente se hizo un mosaico general y un recorte específico o Clip.

Figura 4. Modelo digital de elevación (DEM).



Fuente. Presente estudio, 2017.

Las variables geomorfométricas fueron obtenidas a partir del modelo digital de elevación (MDE), y corresponden a indicadores utilizados para estimar la Pendiente, el Factor Longitud de la Pendiente (LS), La Curvatura (C) y el Índice Topográfico de humedad.

6.2.1.3 Atributos del indicador Cobertura y Usos del Suelo.

Los atributos y clasificaciones dependieron de la zonificación de las coberturas del año 2014. Ya que para cada situación hay una ponderación de influencia diferente de acuerdo los contextos del riesgo a fuego, resistencia a sequía, protección del suelo a erosión y uso intensivo del suelo.

6.3 CLASIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DE INDICADORES

Esta etapa, hizo referencia a la asignación de valores adimensionales a rangos y categorías preestablecidos, de acuerdo a la fórmula de sensibilidad ambiental a la desertificación. Los calificativos numéricos oscilaron del “1” al “2”. Los valores más cerca al superior, fueron los más influyentes y los de menor cuantía o cercanos al “1”, fueron los de menos influencia a la degradación del suelo o desertificación. La calificación se basó en los estudios realizados por Correa (2015) y por las consideradas en el análisis del presente estudio expuestas a continuación.

6.3.1 Calificación y valoración de atributos del indicador climático (IC).

- **Índice de aridez (IA).**

De acuerdo a las dos clases que arrojó el mapa de índice a aridez del IDEAM del año 2010 para el área de estudio, se estimaron los valores de influencia. Aunque no presenta un área altamente deficitaria de agua, se calificaron los valores de los pixeles de mayor atribución con un valor de “1,8”. En general la calificación estuvo por encima de “1,6” debido a las condiciones climáticas adversas expuestas en el marco contextual.

Tabla 5. Calificación y valoración de Índice de aridez.

Clase	Descripción	Valor
Moderado	0,30 a 0,39	1,6
Moderado y deficitario de agua	0,40 a 0,49	1,8

Fuente. Presente estudio, 2017

- **Índice de agresividad climática (IFM)**

Las calificaciones de los valores de los píxeles y la descripción de las clases se basaron en las estimadas por Correa (2015) para el Índice de agresividad climática.

Tabla 6. Calificación y valoración Índice de agresividad climática.

Clases	Descripción	Valor
Muy bajo	0 - 60	1
Bajo	60 - 90	1,2
Moderado	90 - 120	1,5
Alto	120 - 160	1,8
Muy alto	> 160	2

Fuente. (Correa, 2015)

- **Índice de Concentración de las precipitaciones (ICP)**

Las calificaciones de los valores de los píxeles y la descripción de las clases se basaron en las estimadas por Correa (2015) para el Índice de concentración de las precipitaciones.

Tabla 7. Calificación y valoración Índice de concentración de las precipitaciones.

Clases	Descripción	Valor
Uniforme	8.3 - 10	1
Altamente irregular; Irregular	20 - 50; 50 - 100	1,3
Moderadamente estacional	10 -15	1,6
Estacional	15 - 20	2

Fuente. (Correa, 2015)

- **Temperatura superficial del suelo (TS)**

Para este atributo, las calificaciones y descripciones se estimaron de acuerdo a la temperatura superficial de los tipos cobertura, como por ejemplo: Las áreas degradadas o desprovistas de cobertura vegetal (> 22°C) se calificaron los píxeles con un valor de “2”. Mientras que los bosques y arbustos densos (7°C a 14°C)

tuvieron una calificación de 1. Las calificaciones intermedias como pastos limpios, mosaico de pasto y cultivos, pastos enmalezados, etc., se calificaron con valores de “1,6” y “1,8” de acuerdo a su composición de menor a mayor de cobertura natural.

Tabla 8. Calificación y valoración temperatura superficial del suelo.

Clase	Descripción	Valor
Bajo	7°C a 14°C	1
Medio	14°C a 18°C	1,6
Alto	18°C a 22°C	1,8
Muy Alto	> 22°C	2

Fuente. Presente estudio 2017

- **Indicador climático (IC).**

Con las calificaciones estimadas en los atributos climáticos se aplicó la fórmula de sensibilidad para calcular espacialmente el submodelo o indicador climático.

$$IC = (IA * ICP * IFM * TS)^{(1/4)}$$

Donde:

IC: Indicador Climático.

IA: Índice de Aridez

ICP: Índice de Concentración de las precipitaciones

IFM: Índice de agresividad climática

TS: Temperatura superficial del suelo

Posteriormente se calificaron los valores de los pixeles y las descripciones de las clases del submodelo o indicador climático, en base a las estimadas por Correa (2015).

Tabla 9. Calificación y valoración para el submodelo o indicador climático.

Clase	Valor
Baja	< 1,13
Media	1,13 – 1,45
Alta	> 1,45

Fuente. (Correa, 2015)

6.3.2 Clasificación y valoración de atributos para estimación del indicador Geomorfométrico.

- **Pendiente (Θ)**

Para las calificaciones de los valores de los pixeles y la descripción de las clases de la pendiente generado a partir del DEM, se basó en las estimadas por Correa (2015).

Tabla 10. Calificación y valoración Pendiente (Θ).

Clases	Descripción	Valor
Plana a ligeramente inclinada.	0 - 1 ; 1 - 3 ; 3 - 7	1
Moderadamente inclinada.	7. - 12	1,2
Fuertemente inclinada.	12 – 25	1,6
Ligeramente, moderadamente o fuertemente escarpada.	25 - 50 ; 50 – 75 y > 75	2

Fuente. (Correa, 2015)

- **Curvatura (Cu)**

En el modelo de curvatura generado a partir del DEM, los valores negativos y cercanos a cero se calificaron con un valor de pixel de “1” y los positivos con un valor de “2”.

Tabla 11. Calificación y valoración Curvatura.

Clases	Valor
Concava y Plana	1
Convexa	2

Fuente: presente estudio 2017

- **Factor longitudinal de la pendiente (LS)**

Para las calificaciones de los valores de los píxeles y la descripción de las clases del factor de longitud generado a partir del DEM, se basó en las estimadas por Correa (2015).

Tabla 12. Calificación y valoración Pendiente.

Clase	Descripción	Valor
Bajo	0 – 20	1
Medio	20,1 – 50	1,5
Alto	> 50	2

Fuente. (Correa, 2015)

- **Calificación y valoración Índice topográfica de humedad (ITH)**

Para las calificaciones de los valores de los píxeles y la descripción de las clases del índice topográfico de humedad generado a partir del DEM, se basó en las estimadas por Correa (2015).

Tabla 13. Calificación y valoración Índice topográfica de humedad (ITH).

Clases	Descripción	Valor
Bajo	<5	1
Medio	5,1 - 9	1,5
Alto	> 9	2

Fuente. (Correa, 2015)

- **Indicador Geomorfométrico (IG)**

Con las calificaciones estimadas en los atributos geomorfométrico se aplicó la fórmula de sensibilidad para calcular espacialmente el submodelo o indicador geomorfométrico.

$$IG = (\Theta * CU * LS * ITH)^{(1/4)}$$

Donde:

IG: Indicador o Submodelo Climático.

Θ : Pendiente

CU: Curvatura

LS: Factor Longitud de la pendiente

ITH: Calificación y valoración Índice topográfica de humedad

Posteriormente se calificaron los valores de los pixeles y las descripciones de las clases del submodelo o indicador Geomorfométrico, basado en las estimadas por Correa (2015).

Tabla 14. Calificación y valoración para el submodelo o indicador geomorfométrico.

Clases	Valor
Baja	< 1,13
Media	1,13 – 1,45
Alta	> 1,45

Fuente. (Correa, 2015)

6.3.3 Clasificación y valoración de atributos para estimación del indicador de cobertura y uso del suelo.

Para la calificación de los atributos de este indicador o submodelo, se utilizó la zonificación de las coberturas realizada en la imagen Landsat 8 del año 2014.

- **Calidad de la vegetación. Riesgo a fuego y capacidad de recuperación (RF)**

La calificación se determinó teniendo en cuenta la existencia del combustible vegetal (a mayor cobertura natural más riesgo a fuego y viceversa) y la capacidad para recuperarse; estas se estimaron con un valor de “2”. Las coberturas desprovistas de material vegetal como las áreas desnudas o degradadas no presentan riesgo al fuego por carecer de combustible vegetal, por lo que su valoración de los pixeles fue de “1”. Las coberturas intermedias de material vegetal como pastos limpios, pastos enmalezados, cultivos, etc., fueron calificadas con un valor de “1,3”.

Tabla 15. Calificación y valoración del riesgo a fuego y capacidad de recuperación del indicador.

Clase	Descripción	Valor
Bajo	Cultivos permanentes arbustivos; Tierras desnudas y degradadas; Zonas urbanizadas; Cuerpos de agua artificiales; Río	1
Moderado	Cultivos transitorios; Mosaico de cultivos con espacios naturales; Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; Mosaico de pastos con espacios naturales; Mosaico de pastos y cultivos; Pastos enmalezados; Pastos limpios	1,3
Alto	Arbustales, Bosque de galería y ripario, Herbazal Denso; Vegetación secundaria o en transición	2

Fuente: presente estudio, 2017

- **Protección a erosión (PE)**

La calificación y descripción de las clases para este indicador, se determinaron teniendo en cuenta que los suelos desprovistos de cobertura vegetal son más propensas a sufrir erosión debido a la acción de la lluvia (golpe directo por goteo, lavado y arrastre), viento (desplazamiento de las partículas) y las acciones antrópicas directas como la ganadería. Mientras que los suelos conformados gradualmente por vegetación, como los arbustos y bosques naturales, tienen una calificación mediana a alta protección en contra de la erosión ya que proporcionan anclaje, agua y nutrientes al suelo.

Tabla 16. Calificación y valoración Protección a erosión.

Clase	Descripción	Valor
Muy Alto	Arbustales; Bosque de galería y ripario; Herbazal Denso	1
Alta	Vegetación secundaria o en transición	1,3
Moderado	Cultivos permanentes arbustivos; Cultivos transitorios; Mosaico de cultivos con espacios naturales; Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; Mosaico de pastos con espacios naturales; Mosaico de pastos y cultivos; Pastos enmalezados; Pastos limpios	1,6
Bajo	Río; Zonas urbanizadas; Cuerpos de agua artificiales	1,8
Muy Bajo	Tierras desnudas y degradadas	2

Fuente: presente estudio, 2017

- **Resistencia a sequía (RS)**

Para este indicador se determinaron las calificaciones teniendo en cuenta que a mayor cobertura vegetal, mayor almacenamiento y regulación de aguas lluvias. También las raíces de los árboles extraen agua del fondo del suelo y mantiene un ambiente regulado por la evapotranspiración de sus hojas. Lo anterior contribuye a generar una menor resistencia a la sequía del suelo, protegiéndolo gradualmente cuando hay mayor cobertura natural. Caso contrario sucede con un suelo desnudo, ya que cuando se presenta ausencia de las precipitaciones por largos periodos largos de tiempo, no hay un componen vegetal que ayude a mantener la humedad del suelo y los flujos constantes de agua, por falta de almacenamiento.

Tabla 17. Calificación y valoración resistencia a sequía.

Clase	Descripción	Valor
Alto	Arbustales; Bosque de galería y ripario; Herbazal Denso; Vegetación secundaria o en transición; Río	1
Moderado	Cultivos permanentes arbustivos; Cultivos transitorios; Mosaico de cultivos con espacios naturales; Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; Mosaico de pastos con espacios naturales; Mosaico de pastos y cultivos; Pastos enmalezados; Pastos limpios; Cuerpos de agua artificiales	1,6
Bajo	Tierras desnudas y degradadas; Zonas urbanizadas	2

Fuente: presente estudio, 2017

- **Uso intensivo del suelo (US)**

Los valores de las clases para este atributo, se determinaron teniendo en cuenta que cuando hay actividades antrópicas en el suelo como los cultivos y la ganadería, se presenta un mayor impacto por el uso intensivo. Pero cuando aumentan gradualmente hasta ser una cobertura densa natural como bosque, el impacto a la degradación del suelo será menor.

Tabla 18. Calificación y valoración para el indicador de Uso intensivo del suelo.

Clase	Descripción	Valor
Bajo	Arbustales, Bosque de galería y ripario; Herbazal Denso; Tierras desnudas y degradadas; Vegetación secundaria o en transición; Río	1
Moderado	Mosaico de cultivos con espacios naturales; Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; Mosaico de pastos con espacios naturales; Mosaico de pastos y cultivos; Pastos enmalezados	1,3
Alto	Cultivos permanentes arbustivos, Cultivos transitorios, Pastos limpios; Cuerpos de agua artificiales; Zonas urbanizadas	2

Fuente: presente estudio, 2017

- **Indicador cobertura y uso del suelo (CobUso)**

Con las calificaciones estimadas de los atributos, se aplicó la fórmula de sensibilidad para calcular espacialmente el submodelo o indicador de cobertura y usos del suelo (CobUso).

$$\text{CobUso} = (\text{RF} * \text{PE} * \text{RS} * \text{US})^{(1/4)}$$

Donde:

CobUso: Indicador o submodelo cobertura y uso del suelo

RF: Riesgo a fuego y capacidad de recuperación

PE: Protección a erosión

RS: Resistencia a sequía

US: Uso intensivo del suelo

Posteriormente se calificaron los valores de los pixeles y las descripciones de las clases del submodelo o indicador, basado en las estimadas por Correa (2015).

Tabla 19. Calificación y valoración para el submodelo o indicador de cobertura y usos del suelo

Clases	Valor
Baja	< 1,13
Media	1,13 – 1,44
Alta	> 1,45

Fuente. (Correa, 2015)

6.3.4 Clasificación y valoración de atributos para el modelo general. Áreas más sensibles a la desertificación de degradación del suelo.

Con la calificación y cálculo de los anteriores tres submodelos o indicadores (Climáticos, geomorfológico y de cobertura y uso del suelo), se agruparon a través del modelo general y aplicando la fórmula de sensibilidad ambiental a la desertificación se corrió el modelo para determinar espacialmente las áreas más propensas a sufrir degradación del suelo en el área de estudio.

Las categorías y calificaciones de los valores de los píxeles resultantes, se determinaron según el análisis del presente estudio, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 20. Calificación y valoración para el modelo general.

Clase	Valor
Baja	< 1,32174
Media	1,32174 – 1,54587
Alta	> 1,54587

Fuente: presente estudio, 2017

7 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados se desarrollaron en dos etapas: el estudio multitemporal comprendido para cuatro periodos (1987, 2000, 2010 y 2014) y el modelo espacial para determinar las áreas más sensibles a la degradación o desertificación del suelo en el área de estudio.

7.1 ZONIFICACIÓN DE COBERTURAS DEL SUELO PARA CUATRO PERIODOS: 1987; 2000; 2010 Y 2014.

7.1.1 Cálculo del factor del índice óptimo (OIF).

Con el valor estadístico del índice óptimo (OIF) se logró identificar las tres combinaciones más importantes para diferenciar las coberturas del suelo.

7.1.1.1 Índice óptimo (OIF) imágenes Landsat 5 y 8.

Las combinaciones más óptimas para tres bandas de la imagen Landsat 8, de acuerdo al Índice Óptimo (OIF), fueron “543”; “654”; “542” y “357”. Por lo tanto, corresponden a las combinaciones de bandas con menor correlación entre ellas y con mayor desviación estándar para cada banda. (Anexo A, B y C).

Mientras que para la imagen Landsat 5 las combinaciones más idóneas fueron las “452” y “453” (Anexo D, E y F).

7.1.2 Cobertura del suelo periodos; 1987,2000, 2010 y 2014.

Por medio de la clasificación supervisada y con la ayuda del índice de vegetación (NDVI) para discriminar las coberturas vegetales y el índice óptimo (OIF) para confirmar los contrastes de las categorías digitales, se procedió a la edición cartográfica de las diferentes cubiertas del suelo. Estos datos fueron comparados y verificados con los estudios de zonificación realizados por Ortiz (2013) y con los bancos de imágenes de los portales web de Arcgis, SAS.Planet y Google Earth.

Para la clasificación de las coberturas se utilizó la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, el cual permitió describir, caracterizar y codificar las coberturas de la tierra. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [IDEAM], El Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena [CORMAGDALENA], 2007).

7.1.2.1 Cobertura del suelo año 2014.

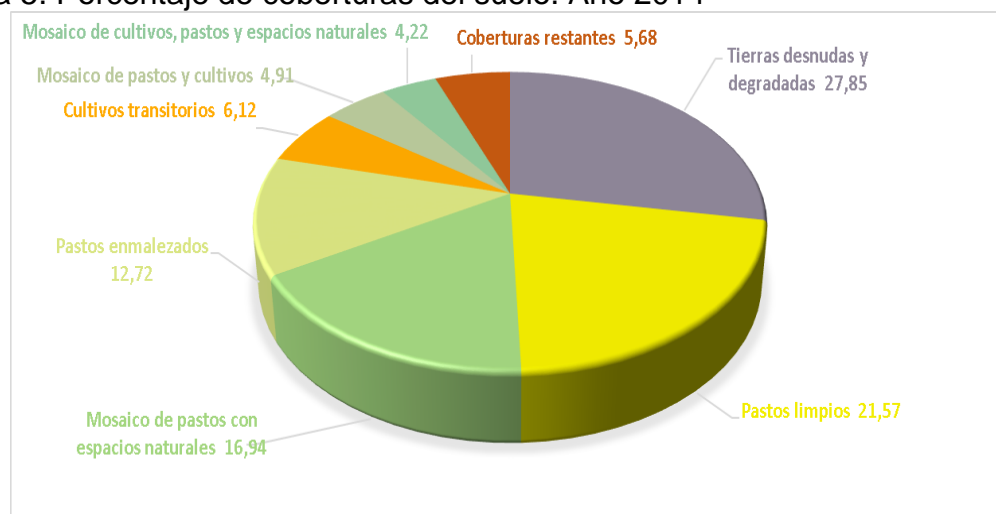
Partiendo de la zonificación espacial del año 2014, se determinó que las áreas desnudas y degradadas representan la cobertura de mayor superficie con un valor de 31933,77 ha (27,85 %) en relación con las demás cubiertas. Seguida por los pastos limpios (21,57 %), Mosaico de pastos con espacios naturales (16,94%), pastos enmalezados (12,72 %), cultivos transitorios (6,12 %), mosaico de pastos y cultivos (4,91 %) y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (4,22 %). Las coberturas restantes representaron el 5,68 %.

Tabla 21. Cobertura del suelo, año 2014.

Cobertura	Código	Área (Ha)	%
Arbustales	322	1406,89	1,23
Bosque de galería y ripario	314	2519,19	2,20
Cuerpos de agua artificiales	514	168,23	0,15
Cultivos permanentes arbustivos	222	27,11	0,02
Cultivos transitorios	21	7013,13	6,12
Herbazal Denso	321	83,94	0,07
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	269,32	0,23
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	4835,66	4,22
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	19423,27	16,94
Mosaico de pastos y cultivos	242	5634,17	4,91
Pastos enmalezados	233	14582,67	12,72
Pastos limpios	231	24727,38	21,57
Río	511	1734,74	1,51
Tierras desnudas y degradadas	333	31933,77	27,85
Vegetación secundaria o en transición	323	104,89	0,09
Zonas urbanizadas	11	195,75	0,17

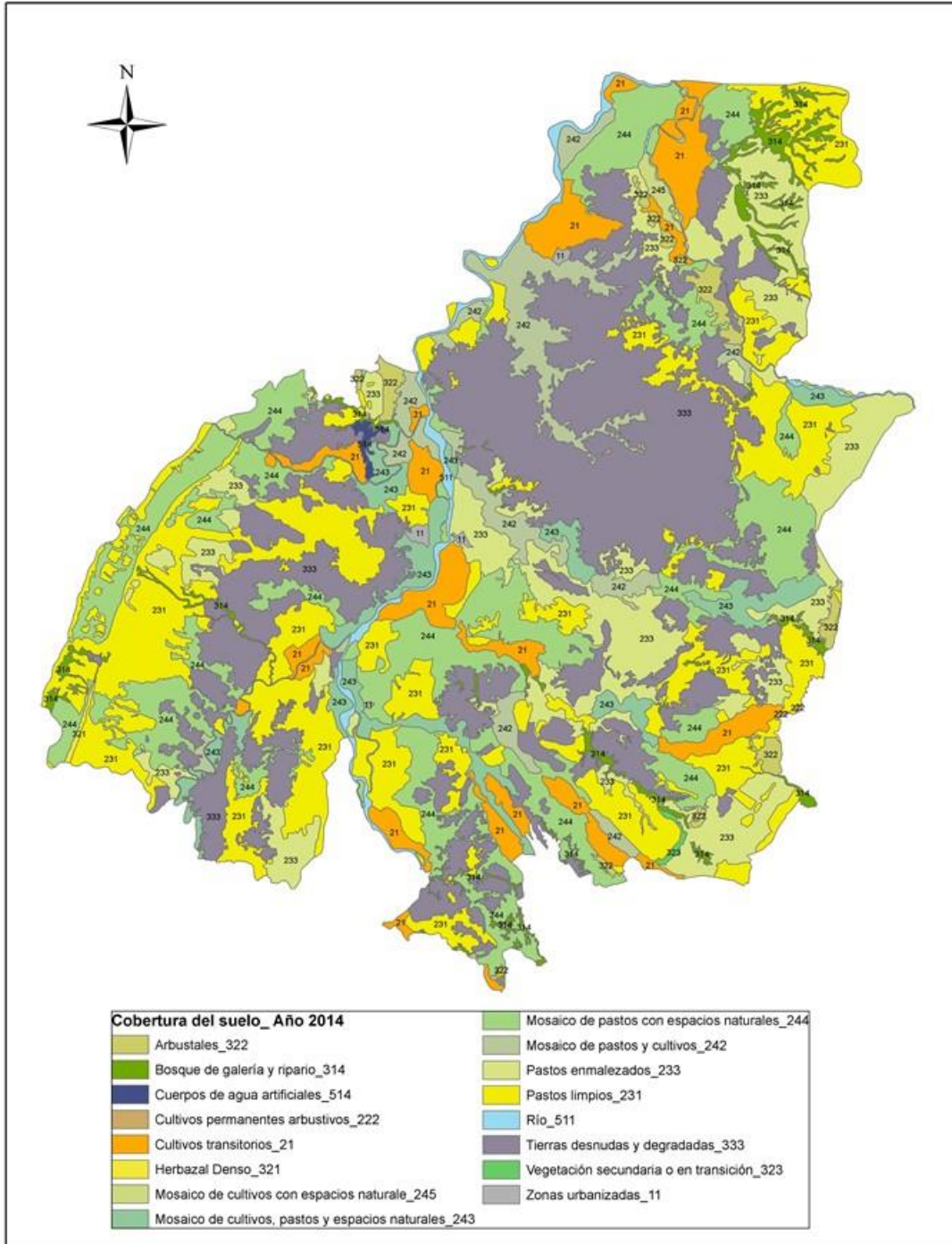
Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 5. Porcentaje de coberturas del suelo. Año 2014



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 6. Mapa de las coberturas del suelo, año 2014.



Fuente. Presente estudio, 2017.

7.1.2.2 Cobertura del suelo, año 2010.

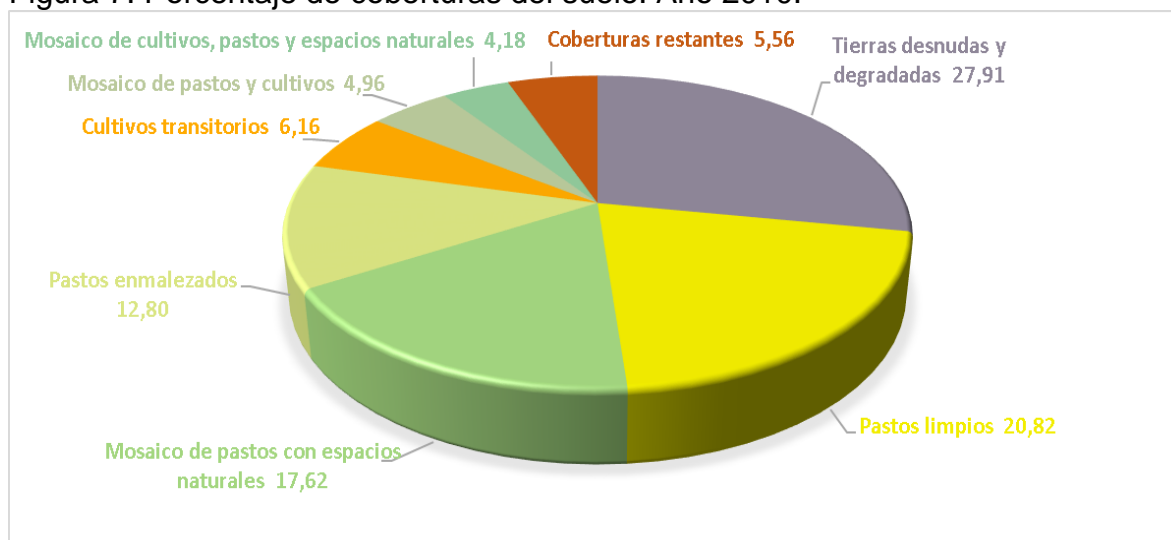
La cobertura de mayor superficie fueron las áreas desnudas y degradadas con un valor de 31995,18 ha (27,91 %) en relación con las demás cubiertas. Seguida por los pastos limpios (20,82 %), Mosaico de pastos con espacios naturales (17,62%), pastos enmalezados (12,8 %), cultivos transitorios (6,16 %), mosaico de pastos y cultivos (4,96 %) y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (4,18 %). Las coberturas restantes representaron el 5,56 %.

Tabla 22. Coberturas del suelo, año 2010.

Cobertura	Código	Área (Ha)	%
Arbustales	322	1406,59	1,23
Bosque de galería y ripario	314	2524,59	2,20
Cuerpos de agua artificiales	514	68,87	0,06
Cultivos permanentes arbustivos	222	27,11	0,02
Cultivos transitorios	21	7061,35	6,16
Herbazal Denso	321	83,94	0,07
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	266,65	0,23
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	4786,91	4,18
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	20202,9	17,62
Mosaico de pastos y cultivos	242	5684,42	4,96
Pastos enmalezados	233	14675,41	12,80
Pastos limpios	231	23875	20,82
Río	511	1694,66	1,48
Tierras desnudas y degradadas	333	31995,18	27,91
Vegetación secundaria o en transición	323	104,89	0,09
Zonas urbanizadas	11	195,75	0,17

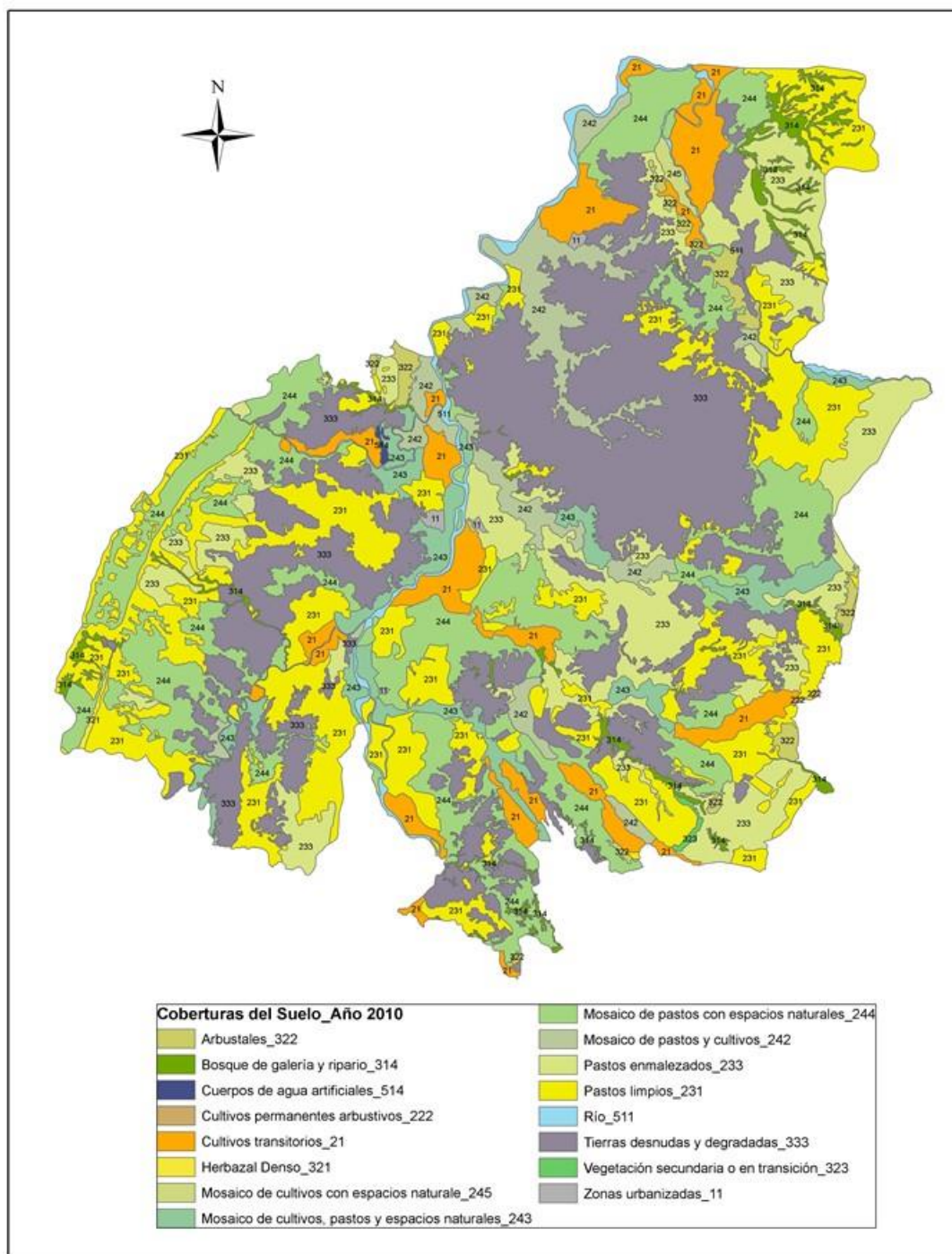
Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 7. Porcentaje de coberturas del suelo. Año 2010.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 8. Mapa de las coberturas del suelo, año 2010.



Fuente. Presente estudio, 2017.

7.1.2.3 Cobertura del suelo, año 2000.

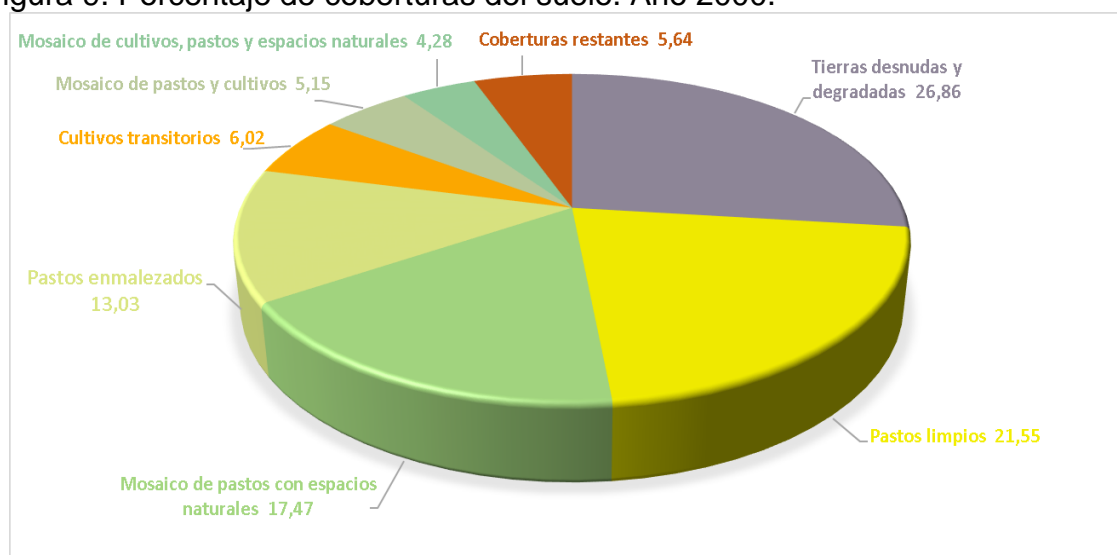
La cobertura de mayor superficie fueron las áreas desnudas y degradadas con un valor de 30798,9 ha (26,86 %) en relación con las demás cubiertas. Seguida por los pastos limpios (21,55 %), mosaico de pastos con espacios naturales (17,47%), pastos enmalezados (13,03 %), cultivos transitorios (6,02 %), mosaico de pastos y cultivos (5,15 %) y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (4,28 %). Las coberturas restantes representaron el 5,64 %.

Tabla 23. Cobertura del suelo, año 2000.

Cobertura	Código	Área (Ha)	%
Arbustales	322	1406,54	1,23
Bosque de galería y ripario	314	2531,3	2,21
Cultivos permanentes arbustivos	222	27,11	0,02
Cultivos transitorios	21	6898,06	6,02
Herbazal Denso	321	83,94	0,07
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	187,49	0,16
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	4909,69	4,28
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	20033,16	17,47
Mosaico de pastos y cultivos	242	5904,74	5,15
Pastos enmalezados	233	14942,7	13,03
Pastos limpios	231	24702,53	21,55
Ríos	511	1928,08	1,68
Tierras desnudas y degradadas	333	30798,9	26,86
Vegetación secundaria o en transición	323	104,89	0,09
Zonas urbanizadas	11	195,75	0,17

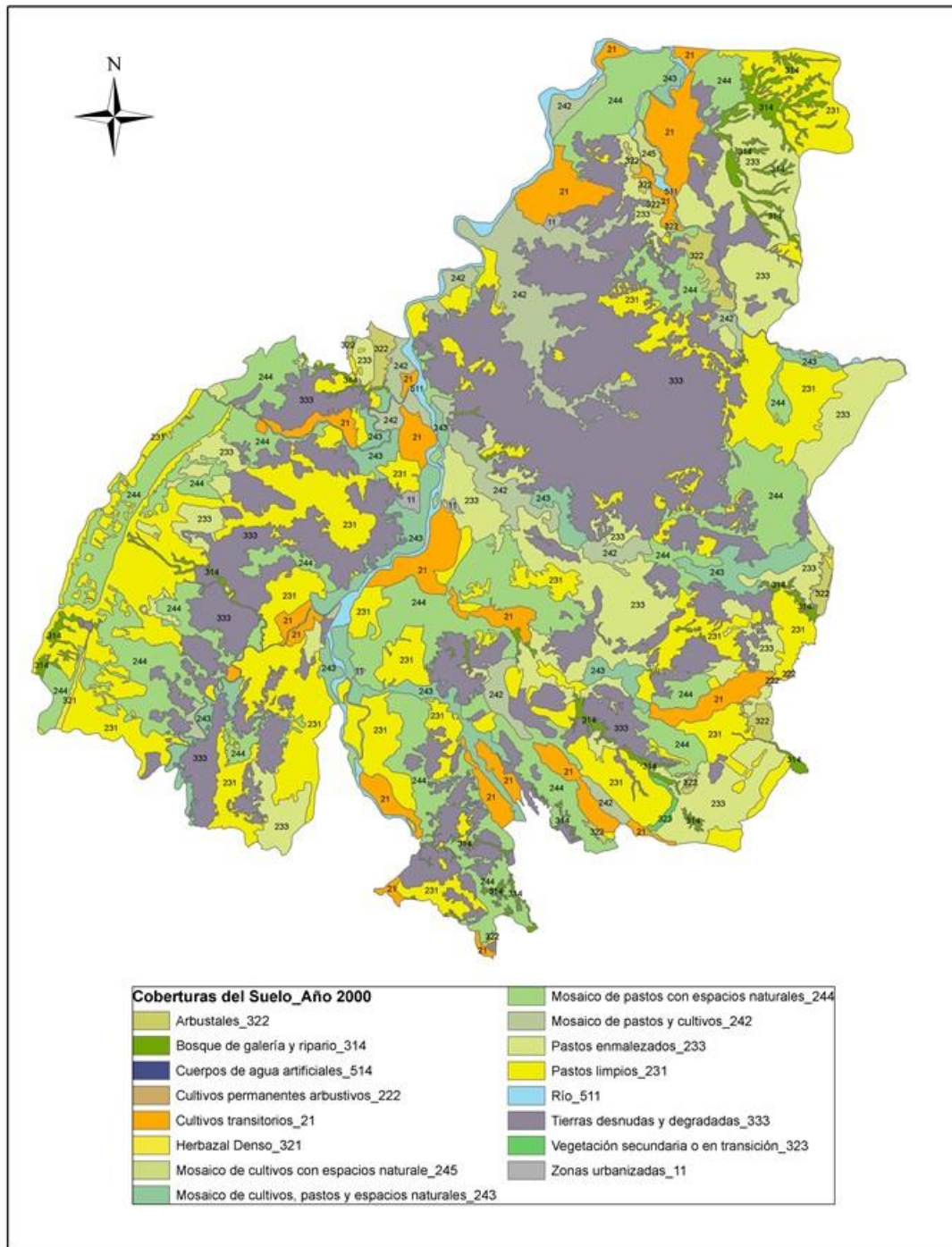
Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 9. Porcentaje de coberturas del suelo. Año 2000.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 10. Mapa de las coberturas del suelo, año 2000.



Fuente. Presente estudio, 2017.

7.1.2.4 Cobertura del suelo, año 1987.

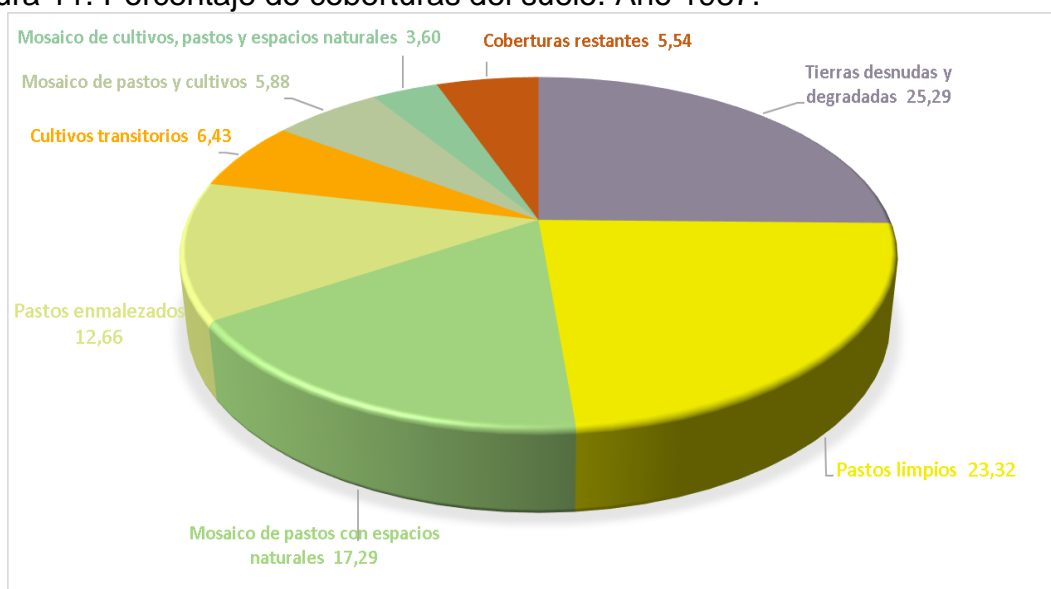
La cobertura de mayor superficie fueron las áreas desnudas y degradadas con un valor de 28984.66 ha (25,29 %) en relación con las demás cubiertas. Seguida por los pastos limpios (23,32 %), mosaico de pastos con espacios naturales (17,29 %), pastos enmalezados (12,66 %), cultivos transitorios (6,43 %), mosaico de pastos y cultivos (5,88 %) y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (3,60 %). Las coberturas restantes representaron el 5,54 %.

Tabla 24. Cobertura del suelo, año 1987.

Cobertura	Código	Área (Ha)	%
Arbustales	322	1406,81	1,23
Bosque de galería y ripario	314	2605,26	2,27
Cultivos permanentes arbustivos	222	22,83	0,02
Cultivos transitorios	21	7366,44	6,43
Herbazal Denso	321	83,94	0,07
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	232,48	0,20
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	4122,34	3,60
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	19814,7	17,29
Mosaico de pastos y cultivos	242	6737,67	5,88
Pastos enmalezados	233	14508,88	12,66
Pastos limpios	231	26722,21	23,32
Río	511	1691,7	1,48
Tierras desnudas y degradadas	333	28984,66	25,29
Vegetación secundaria o en transición	323	104,89	0,09
Zonas urbanizadas	11	195,75	0,17

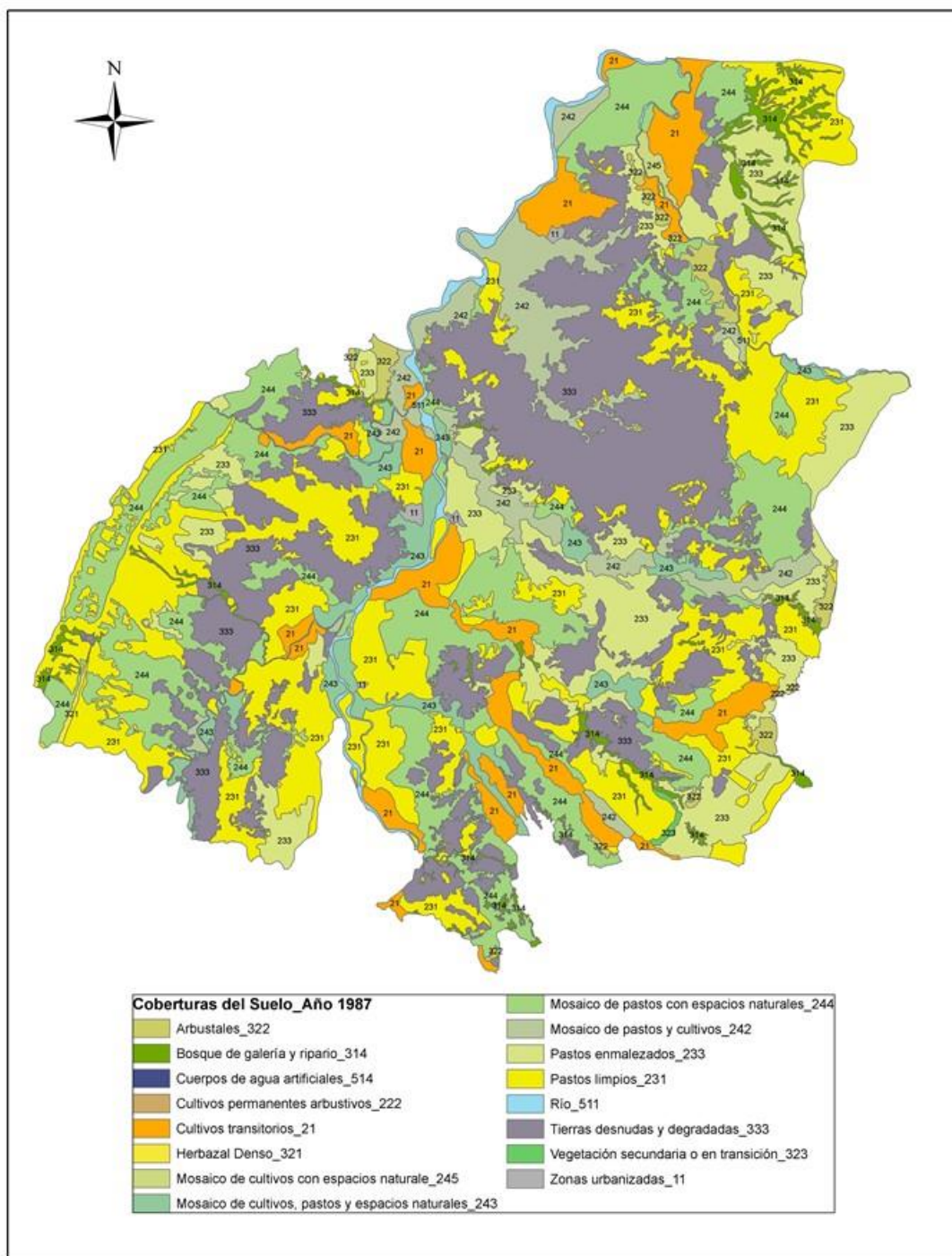
Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 11. Porcentaje de coberturas del suelo. Año 1987.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 12. Mapa de la cobertura del suelo, año 1987.



Fuente. Presente estudio, 2017.

7.1.3 Análisis multitemporal de las áreas degradadas.

Para el análisis multitemporal se utilizaron las áreas de los estudios de la zonificación espacial del año 1987 y 2014, el cual permitió determinar la permanencia o los cambios de las coberturas del suelo durante 27 años.

Se logró inferir que la degradación de los suelos debido al avance a las tierras desnudas o degradadas, ha aumentado del año 1987 al año 2014 en 2949,11 hectáreas.

Figura 13. Aumento de las tierras desnudas y degradadas.

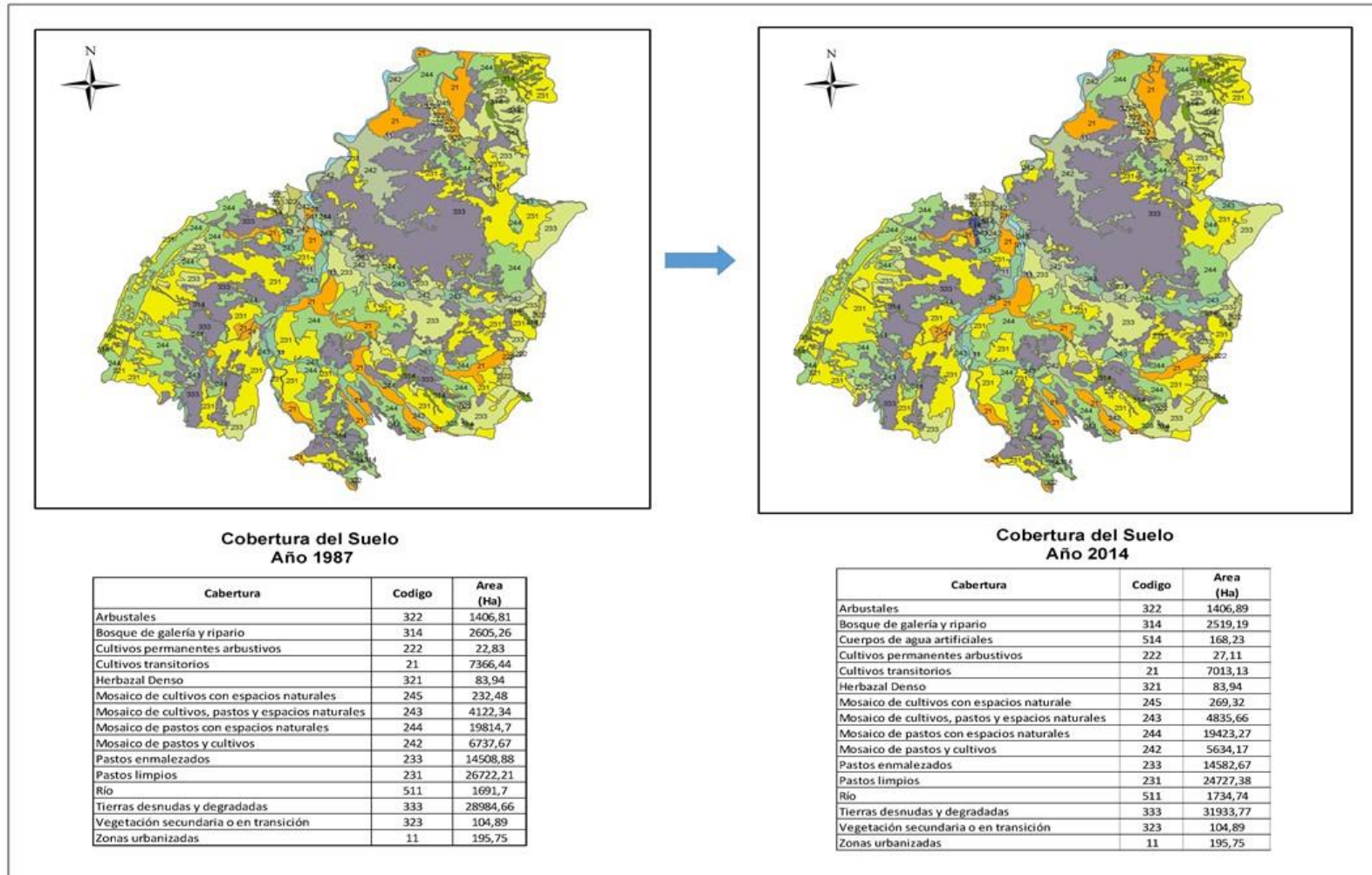


Fuente. Presente estudio año 2017

Debido al aumento de la cobertura de cuerpos de agua artificial en el periodo 2014 sobre las áreas degradadas cerca de la margen del río Magdalena, el área para esta cubierta disminuyó en 61,41 ha; en comparación con el área del año 2010.

El Anexo G, muestra las áreas de las coberturas que han permanecido o cambiado a otro tipo de cobertura del suelo durante los 27 años comprendidos durante del periodo total de estudio.

Figura 14. Mapa de la cobertura del suelo del año 1987 al 2014.



Fuente. Presente estudio, 2017.

7.2 MODELO ESPACIAL, ÁREAS SUSCEPTIBLES A LA DESERTIFICACIÓN

El modelo espacial permitió reunir los atributos que contribuyen a la desertificación o degradación de los suelos para el área de estudio y confrontarlos en tres submodelos (Geomorfológicos, Climáticos y de Cobertura y usos del suelo) para posteriormente integrarlos en un modelo general donde se definió la sensibilidad ambiental a la desertificación.

Cada submodelo reúne atributos que influye en el análisis de la degradación del suelo de acuerdo al contexto espacial y temático, los cuales se exponen a continuación.

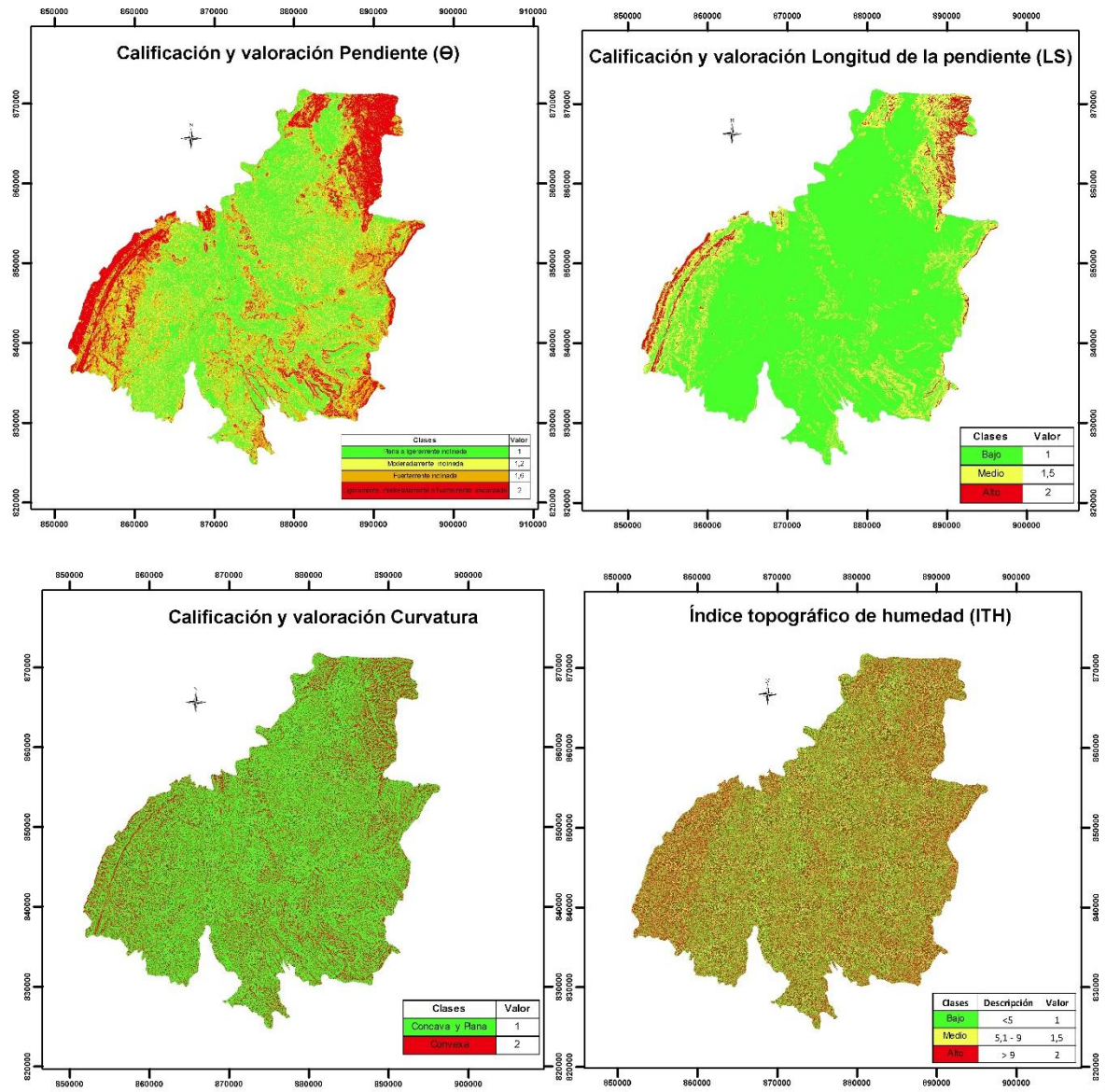
7.2.1 Estimación espacial de atributos geomorfométricos y submodelo.

La figura 15 muestra la distribución espacial para cada atributo, de acuerdo a las calificaciones y descripciones de las categorías expuestas en la metodología. El submodelo (figura 16) representa la integración de los atributos para general las áreas más sensibles geomorfológicamente a la desertificación o degradación del suelo, clasificadas en tres categorías; alta, media y baja (figura 17).

La tendencia del suelo a la generación de escorrentía, debido a que los perfiles de mayor humedad son más proclives a saturarse, porque la precipitación caída sobre ellos puede convertirse mucha más fácil en escorrentía; los cuales están representados por los valores más altos (> 9) en el Índice Topográfico de Humedad y están relacionados directamente con las formas cóncavas del terreno y el alta pendiente (fuertemente inclinadas y ligeramente, moderadamente o fuertemente escarpada). Estas áreas generan mayor transporte de sedimentos y lavados continuos del suelo por la fuerte energía gravitacional, afectando aún más las áreas desprovistas de coberturas densas.

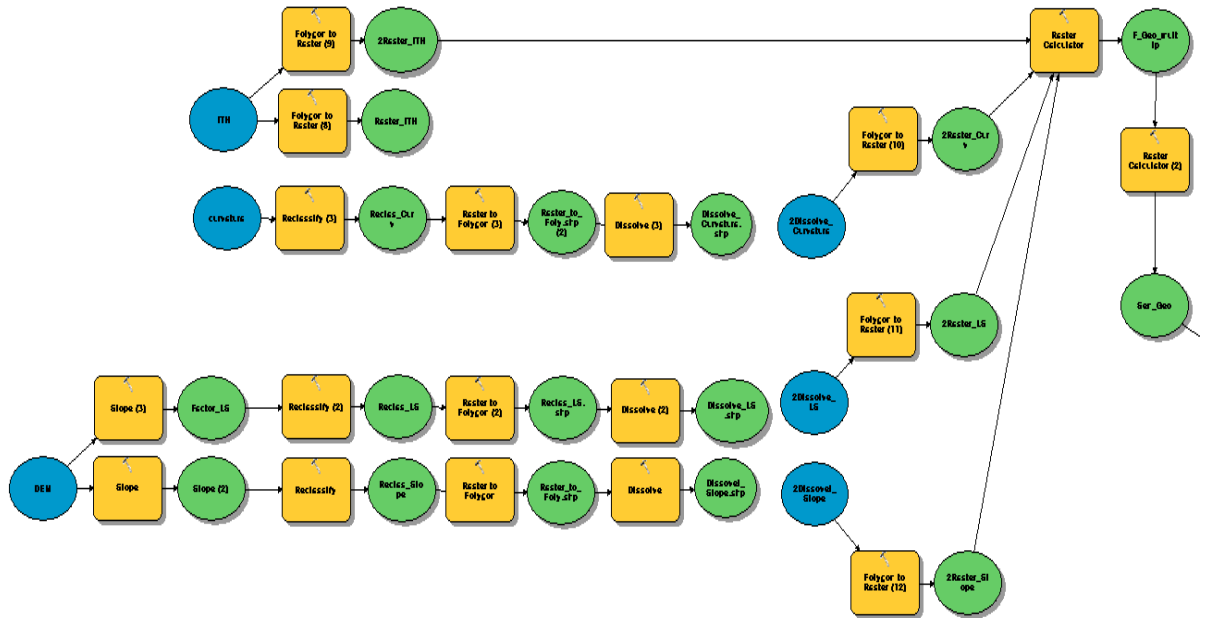
El submodelo de factores Gemorfológicos, mostró que las áreas más sensibles a degradarse (mayor a 1,45) son las que están descritas por una mayor pendiente, las cuales se encuentran al Occidente, Oriente y Nororiente del área de estudio (figura 17) formada por montañas y laderas. Las partes planas conformadas por el Valle del Magdalena no se ven tan afectados por la pendiente debido a su poca inclinación.

Figura 15. Mapa de atributos geomorfológicos.



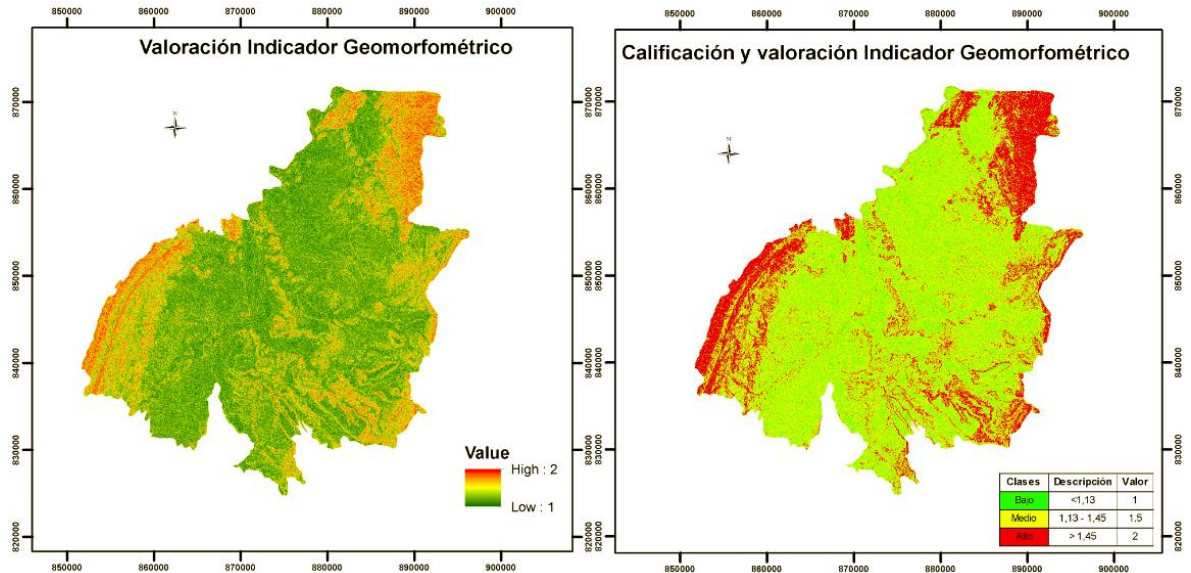
Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 16. Submodelo conceptual geomorfométrico



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 17. Resultado espacial del submodelo, donde se muestran las áreas más sensibles geomorfológicamente a la desertificación.



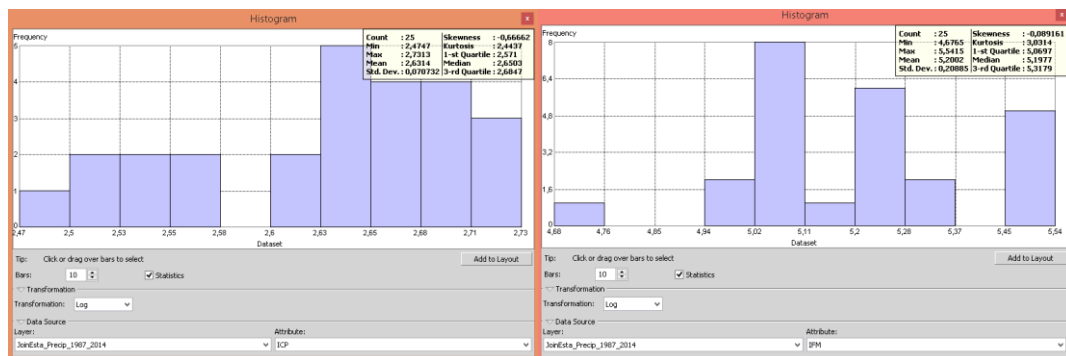
Fuente. Presente estudio, 2017.

7.2.2 Estimación de atributos climática y submodelo.

La figura 21 muestra la distribución espacial de los atributos, de acuerdo a su calificación y descripción de las categorías expuesta en la metodología. El submodelo (figura 22) representa la integración de los atributos para generar las áreas más sensibles climáticamente a la desertificación.

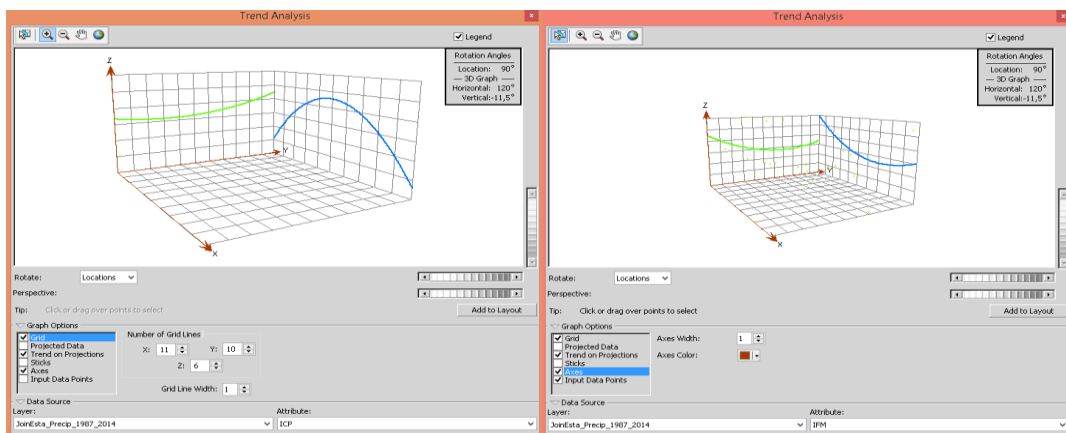
La interpolación de los índices de precipitación y agresividad climáticas se realizó con el método de Kriging con una transformación tipo Logarítmica debido a que la mediana y la media no presentan diferencia considerable para la interpolación (figura 18). Además, la poligonal que mejor se ajusta a la distribución de los datos es de tipo exponencial o de segundo orden, con anisotropía verdadera (figura 19 y 20).

Figura 18. Histograma para ICP e IFM.



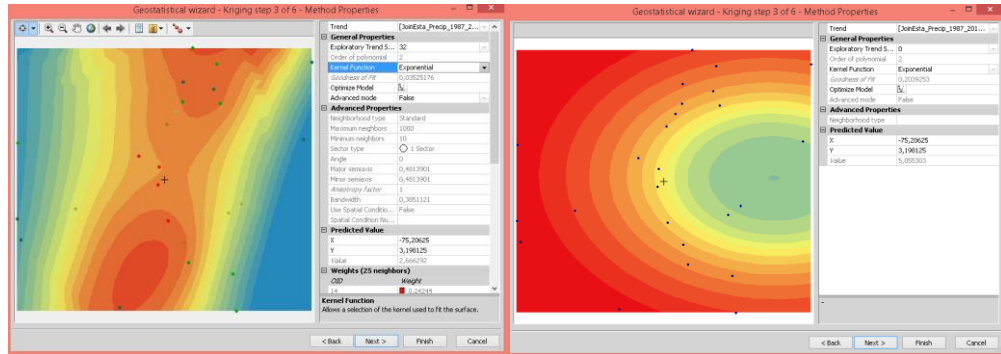
Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 19. Ecuación de segundo grado para interpola el ICP e IFM.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 20. Anisotropía verdadera para para interpolar los datos ICP e IFM.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Tabla 25. Datos ICP e IFM, promediados para un rango de 27 años (1987 a 2014).

Código	Estación	TOTAL ICP	TOTAL IFM	ICP	IFM
21130110	PRAGA	345,3174239	6898,14774	12,3327651	246,362419
21110330	POLONIA	396,2414157	4560,223726	14,1514791	162,865133
21115100	PALACIO-VEGALARGA	357,5894032	5736,609792	12,7710501	204,878921
21115020	APTO BENITO	410,692457	5702,061145	14,6675878	203,645041
21110040	HATO MILAGRO	427,6799508	5063,874526	15,274284	180,852662
21130180	ALTAMIRA DC HDA	414,2366616	5481,995369	14,7941665	195,785549
21115060	SAN JOSE	396,4132516	4496,219867	14,1576161	160,579281
21140100	SAN JUANITO	403,0160316	4919,610768	14,3934297	175,700385
21140110	TOMO EL	429,861599	4150,490613	15,3522	148,231808
21115160	MANILA LA HDA	386,8443377	4077,65104	13,8158692	145,630394
21110070	BARAYA	384,1429593	4369,576952	13,7193914	156,05632
21120040	POTRERITO	391,4830457	6997,147829	13,9815373	249,898137
21130040	SAN LUIS	358,9855788	7004,908178	12,8209135	250,175292
21115070	PORTAL EL	359,8721089	5368,460722	12,8525753	191,73074
21110120	YEGUERA LA	421,6309623	4456,703456	15,0582487	159,167981
21140030	ARIZONA	332,5853983	3006,919524	11,8780499	107,389983
21110180	HATO BOGOTA	415,2502004	5179,761532	14,8303643	184,991483
21110090	POTOSI	402,6471212	5129,761465	14,3802543	183,205767
21145040	SAN ALFONSO	410,1931775	4452,029853	14,6497563	159,001066
21130050	PEREZ HDA	396,7987301	4487,864705	14,1713832	160,280882
21110160	MESA REDONDA	401,6511108	4468,352474	14,3446825	159,584017
21110290	VICTORIA LA	399,9408353	5377,155593	14,2836013	192,041271
21115080	VILLAVIEJA	391,0424449	4295,643167	13,9658016	153,415827
21130080	ORGANOS	345,9522073	7141,689127	12,355436	255,060326
21140120	CRUCES LAS	368,3418799	6763,233753	13,1550671	241,544063

Fuente. Presente estudio, 2017

El índice de concentración de las precipitaciones (ICP) mostró una moderadamente estacionalidad (valores comprendidos entre 10 a 15), en la mayoría del área de estudio (112499,09 hectáreas) con un valor de influencia a la degradación del suelo de “1,8” (figura 21).

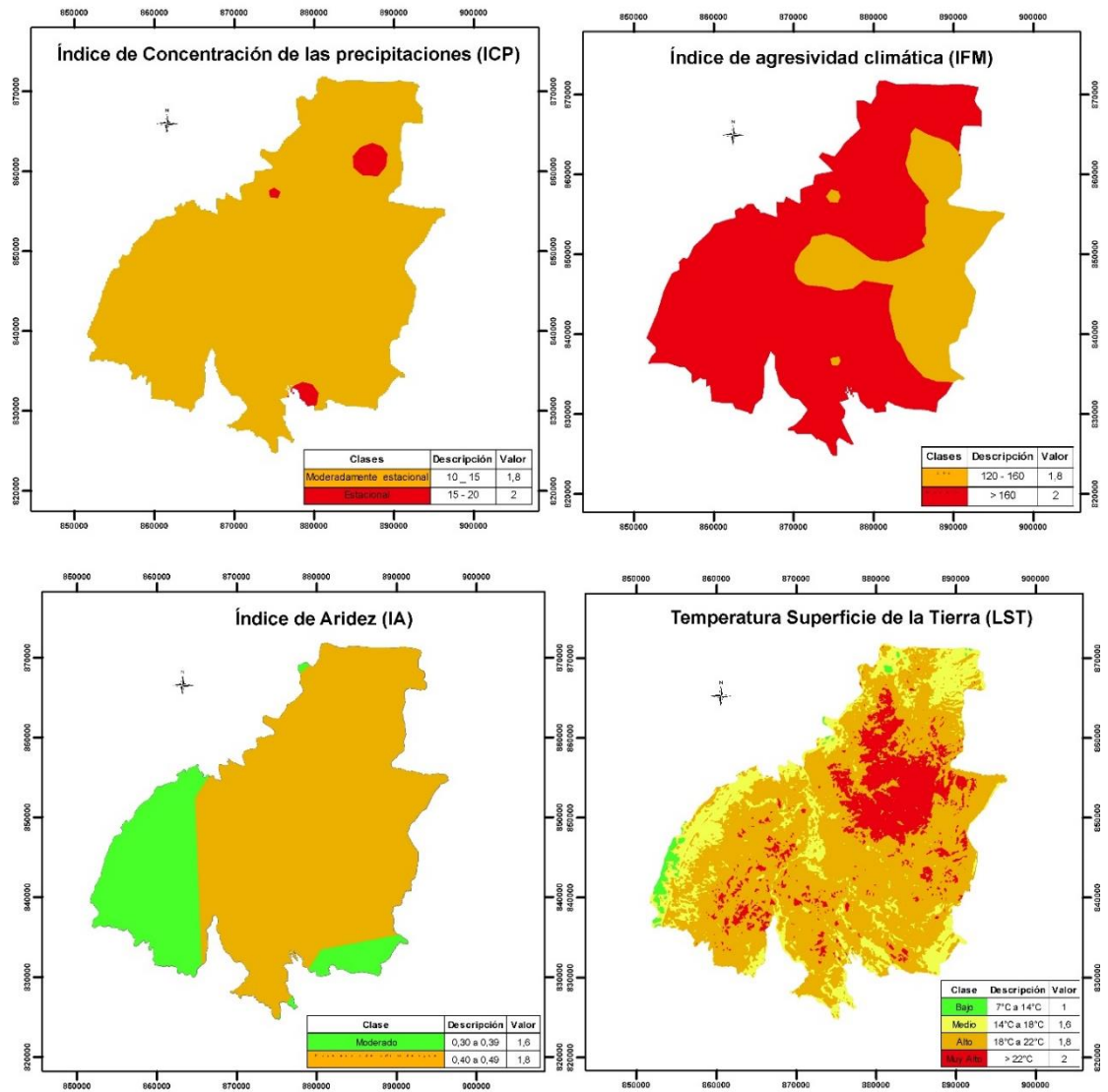
Con la interpolación del índice de agresividad climática (IFM), se determinó un área de influencia de 85948,14 hectáreas con un valor de influencia “Muy alto” a la degradación del suelo de “2”, espacializados hacia la parte central y occidente del área de estudio. En menor proporción se encuentra un área de 28677,85 hectáreas, calificada como de influencia alta y un valor de “1,8”; distribuido hacia el oriente.

Con el índice de aridez, se determinó un área moderada de 26818,24 hectáreas con un valor de influencia a la degradación de “1,6” espacializados hacia el occidente y Suroriente del área de estudio. La parte restante del área es de 87838,05 hectáreas con un valor de influencia moderada y deficitaria de agua de “1,8”.

La temperatura superficial de la tierra, muestra efectivamente que las áreas descubiertas de cobertura vegetal como por ejemplo los suelos degradados mantienen una temperatura mayor de 22 °C. Las cubiertas de pastos y pastos enmalezados tienen una temperatura media entre 14 °C a 18 °C. Los valores más bajos de temperatura están oscilando en las coberturas densas de bosque natural debido a la capacidad de regular el calentamiento de la superficie por su fisiología vegetal. Por lo anterior se puede inferir que a suelos desnudos mayor temperatura de superficie y a suelos cubiertos por coberturas vegetales menor temperatura (figura 21).

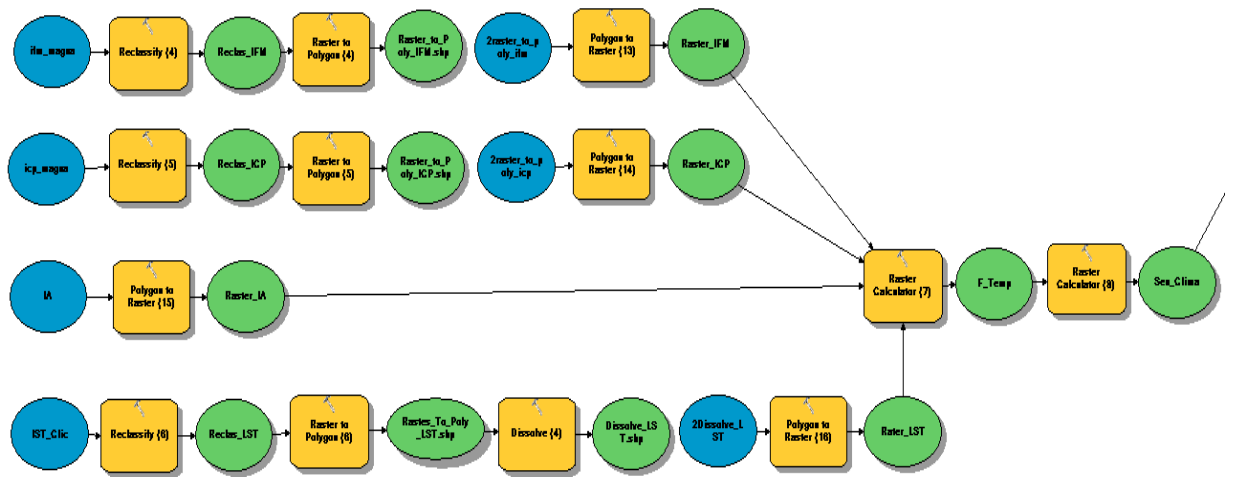
El resultado del Submodelo climático (figura 22) muestra que los valores de todos los pixeles del área de estudio están por encima del valor “1,45”; clasificando en un rango de influencia a la desertificación “alto”. Lo anterior debido a las calificaciones cercanas a “2” en las categorías de los atributos del Índice de aridez y la temperatura superficial realizadas por las consideraciones del presente estudio, afectada por las condiciones climáticas del lugar (figura 23).

Figura 21. Mapa de atributos climáticos.



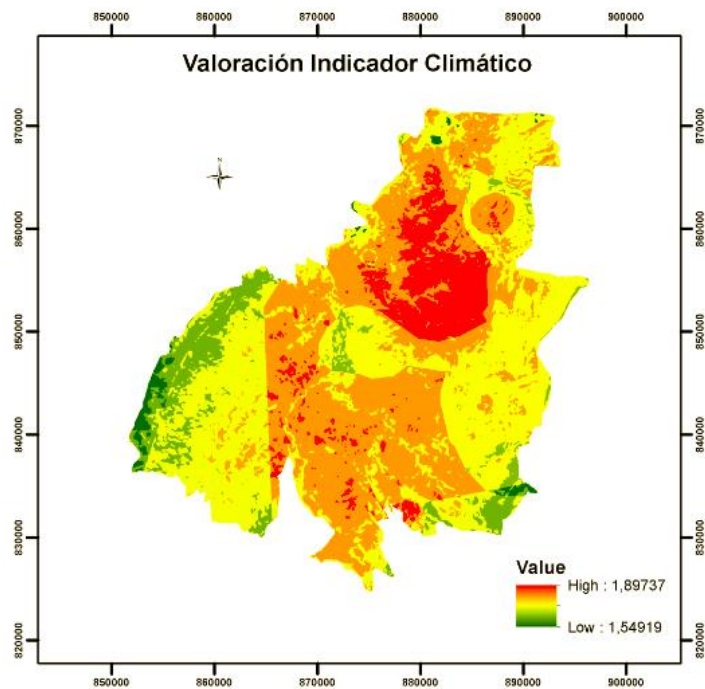
Fuente. Presente estudio, 2017

Figura 22. Submodelo conceptual climático.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 23. Resultado espacial del submodelo para mostrar las áreas más sensibles climáticamente a la desertificación. (Los valores de los pixeles dieron por encima de “1,45” por lo tanto toda el área de estudio está valorada dentro del rango de desertificación “alto”)



Fuente. Presente estudio, 2017.

7.2.3 Estimación de atributos de cobertura y uso del suelo y submodelo.

La figura 24 muestra la distribución espacial de los atributos, de acuerdo a su calificación y descripción de las categorías. El submodelo de manejo y usos del suelo (figura 25) representa la integración de los atributos para generar las áreas más sensibles de acuerdo al manejo y uso del suelo (figura 26).

El riesgo al fuego está estimado con más influencia en los valores del pixel mayores a "1,3" y representada por las coberturas donde existen material vegetal denso o natural. Por lo anterior es lógico que las coberturas constituidas por bosques y arbustos densos, sean los valores de mayor calificación. Los de menor valor, fueron los suelos desnudos o degradados.

La protección a la erosión tiene una relación similar al anterior, ya que los suelos desprovistos de material vegetal son más susceptibles a la erosión por diferentes factores como el viento, lavado de nutrientes por escorrentía y lluvia y usos del suelo por los diferentes sistemas agropecuarios. Por lo tanto las calificaciones más altas ("2") se encuentran en las áreas desnudas y degradadas. Y los valores más bajos ("1") en los bosques y arbustos naturales.

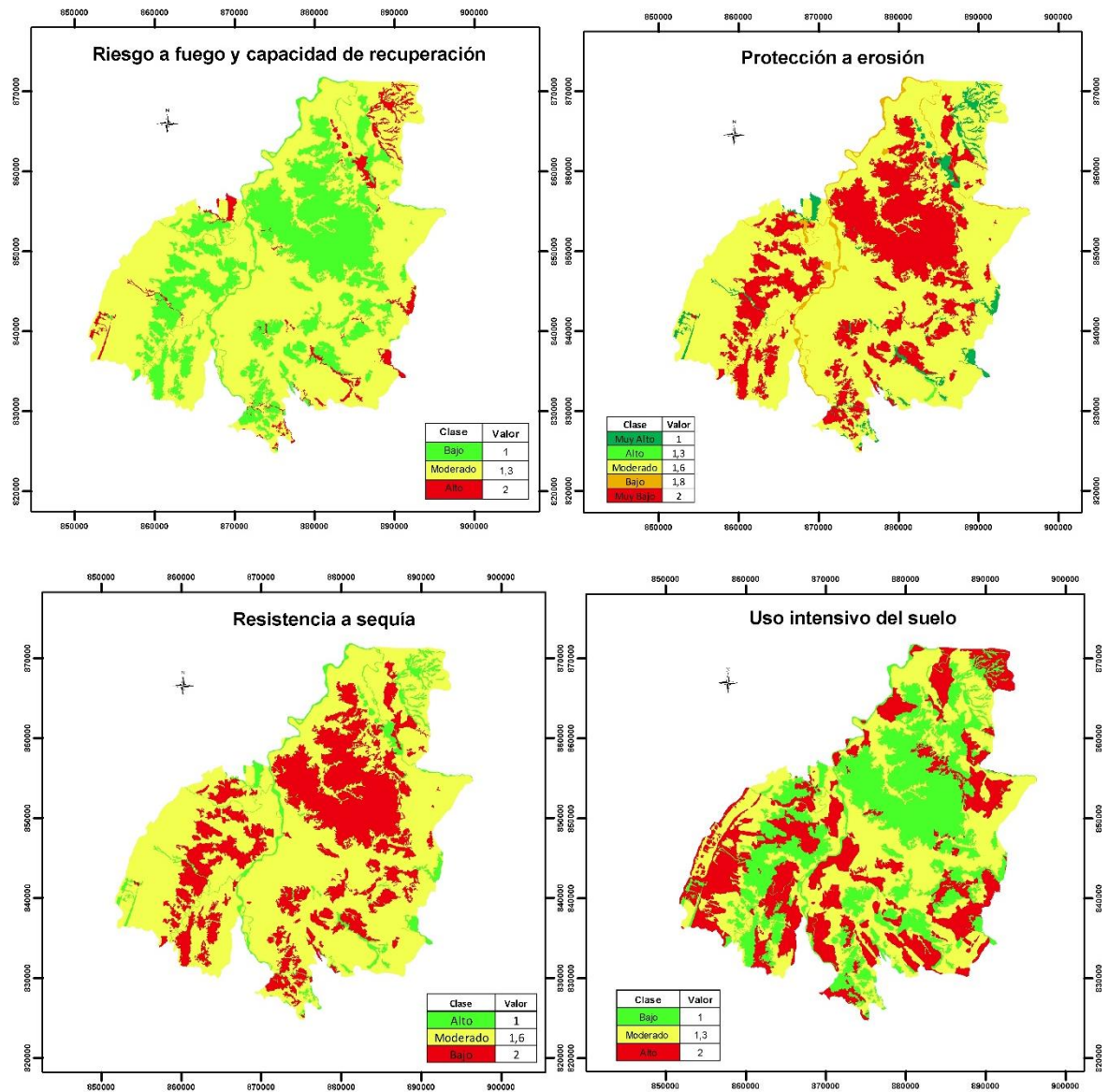
La resistencia a la sequía esta favorecida por las coberturas vegetales que pueden regular el agua al interior de las capas del suelo y mantener las propiedades físicas y químicas favorables para la fertilidad y calidad del mismo. Caso contrario con los suelos pobres en nutrientes sometidos a la radiación directa del sol y la degradación continua. El uso del suelo de acuerdo a la calificación y valoración de las coberturas, representa una mayor influencia en las áreas degradadas y con actividades agropecuarias como el monocultivo de arroz y la ganadería.

El uso intensivo depende de las actividades antrópicas realizadas directamente sobre el suelo, como los pastos limpios para la ganadería, los cultivos transitorios de cereales como el arroz y las áreas urbanas. Por lo anterior representan la mayor calificación. Las coberturas de bosques, arbustos y áreas degradadas, representan la menor calificación ya sea por el uso natural sin intervención antrópica o por que los suelos ya degradados no representan ningún tipo de uso productivo. Los mosaicos representan áreas intermedias.

Con la agrupación de los anteriores factores aplicados en la fórmula de sensibilidad ambiental (SA) a la degradación o desertificación y representada en la generación

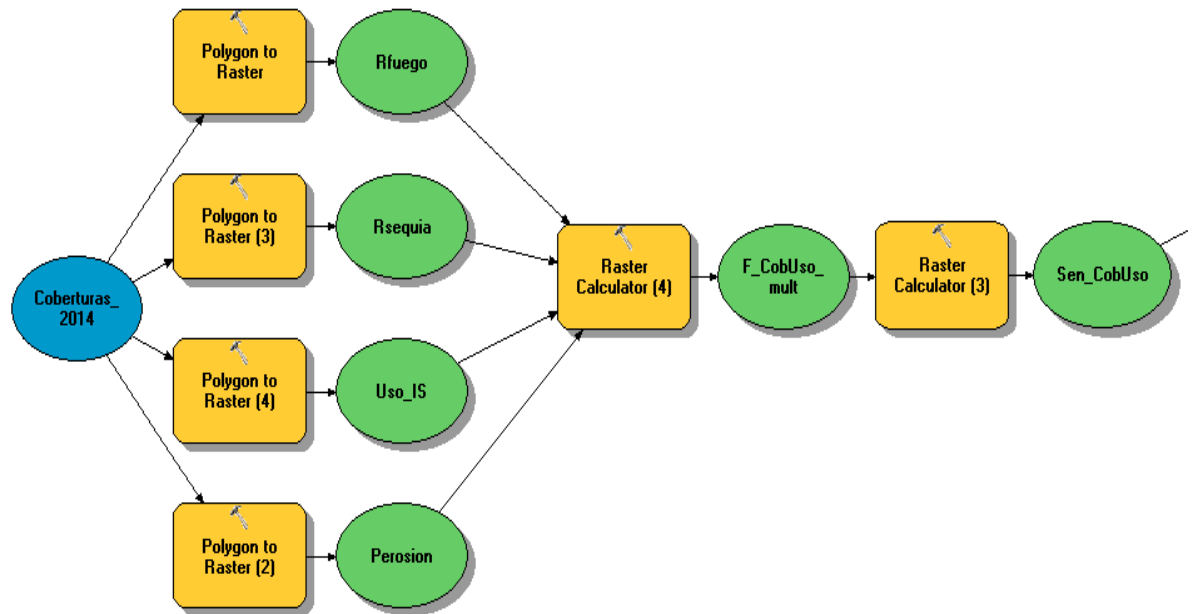
del submodelo de cobertura y usos, se observa que las más sensibles a la degradación están en las áreas compuestas por arbustos y bosque natural, cultivos pastos limpios y enmalezados.

Figura 24. Representación espacial de atributos del indicador de cobertura y uso del suelo.



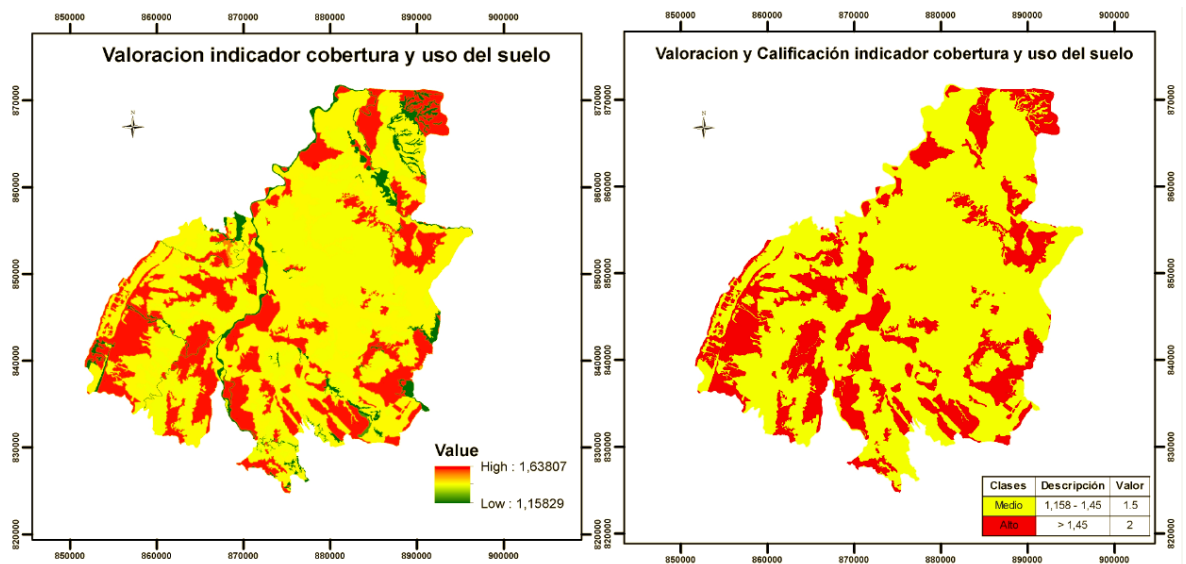
Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 25. Submodelo conceptual de cobertura y uso del suelo.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 26. Mapa de resultados del submodelo espacial de Cobertura y uso del suelo.



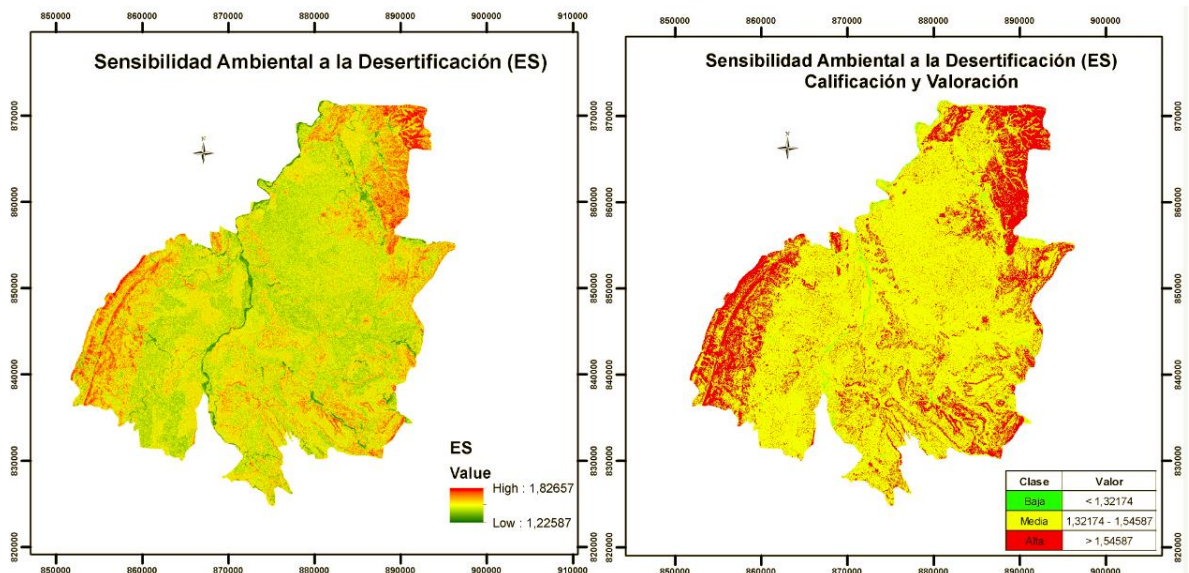
Fuente. Presente estudio, 2017.

7.2.4 Modelo total; sensibilidad ambiental a la desertificación.

El modelo general (figura 29) permitió combinar de los tres submodelos (Geomorfológico, climáticos y de cobertura y usos del suelo) a través de la fórmula de sensibilidad ambiental para determinar espacialmente las áreas más propensas a la degradación del suelo dentro del área de estudio. Las superficies más afectadas se resaltaron a partir de los valores de los pixeles mayores a “1,54” (Alto), ubicadas al occidente, oriente, nororiente y segmentos aislados al interior del área de estudio en los bordes de cambios bruscos de uso del suelo y en colindancia con suelos degradados, (Figura 27).

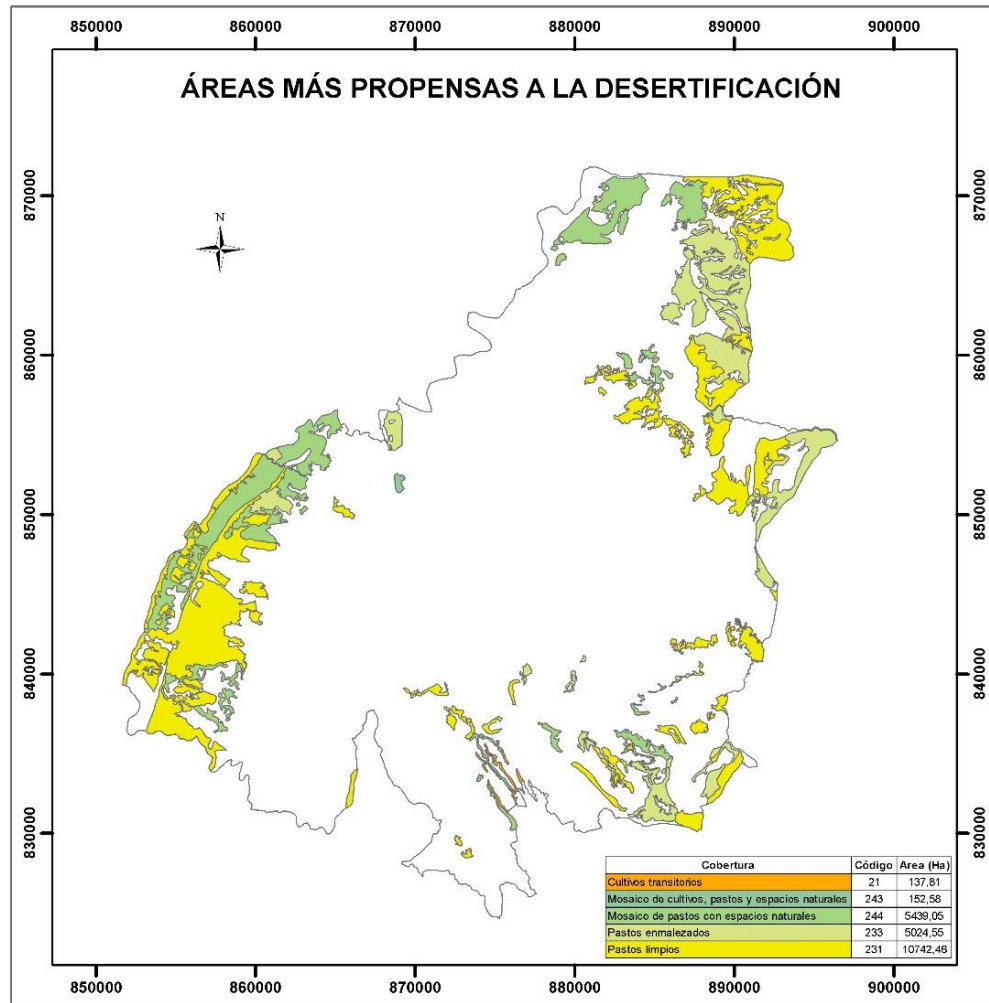
Las coberturas más sensibles a sufrir alta desertificación son; Cultivos transitorios (137,81 Ha); Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (152,58 Ha); Mosaico de pastos con espacios naturales (5439,05 Ha); Pastos enmalezados (5024,55 Ha) y Pastos limpios (10742,46 Ha), (Figura 28).

Figura 27. Mapa resultado del modelo total para generar la sensibilidad ambiental a la desertificación.



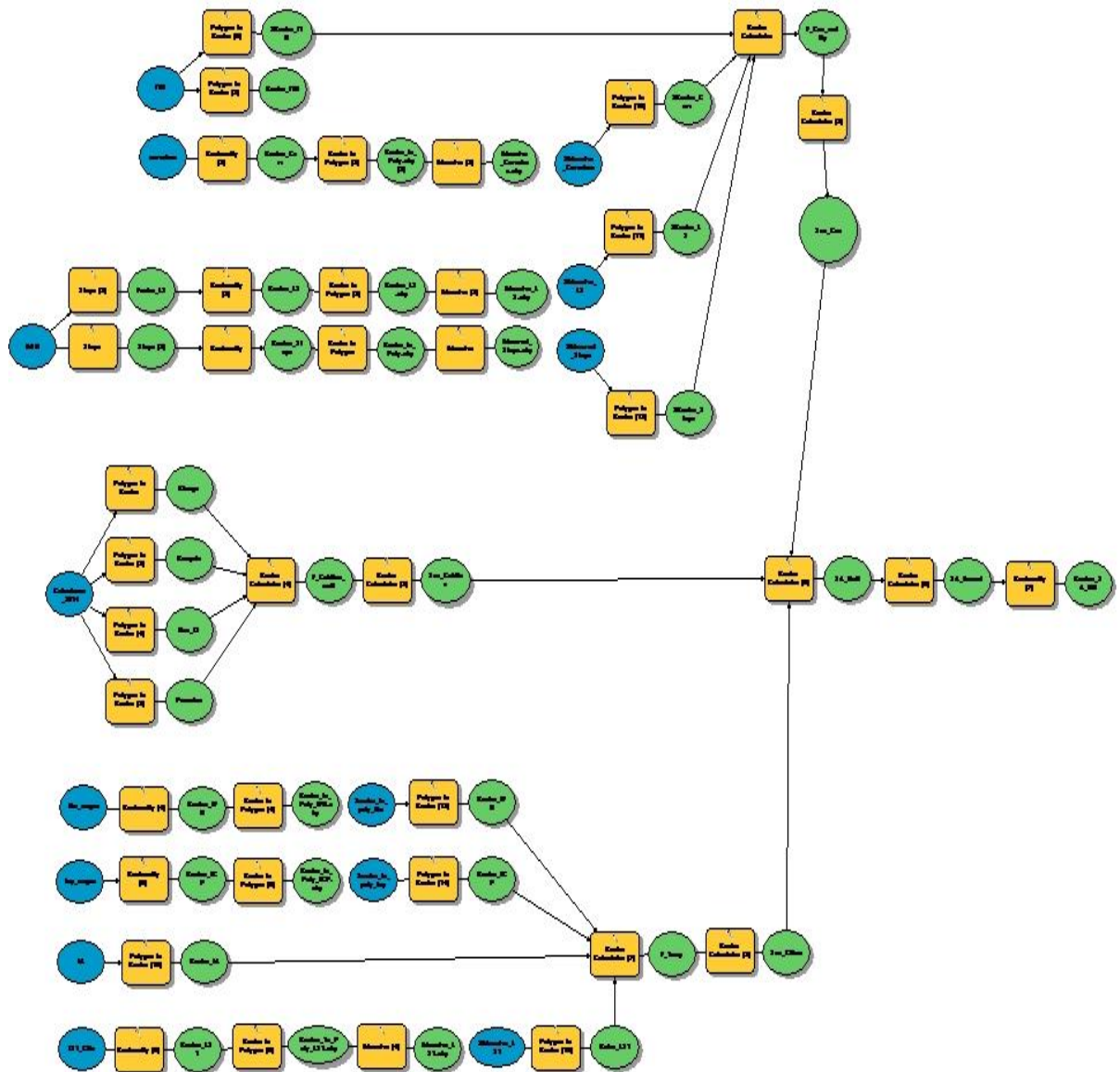
Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 28. Mapa de las áreas más propensas a la desertificación.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Figura 29. Modelo General para determinar las áreas ambientalmente sensibles a la desertificación.



Fuente. Presente estudio, 2017.

Las áreas más propensas a la desertificación (figura 26) representan el 18,75 % con respecto al área total. Estas zonas clasificadas como de sensibilidad alta a la desertificación, se encuentran localizadas en pendientes fuertemente inclinadas a escarpadas (mayores a 12 %), pero con algunos sectores en pendientes también planas por la influencia de los indicadores de usos del suelo por encontrarse en límites con áreas degradadas o por las líneas fronterizas entre dos tipos coberturas como los cultivos y pastos limpios que ejercen contante presión para el deterioro de los suelos. Las concentraciones de las precipitaciones son moderadamente estacionales, con un índice de agresividad climática alta a muy alta (mayor a 120). El 44,69 % del total de estas áreas tiene un índice de aridez moderado y el restante (55,31%) es deficitario de agua y moderado. La temperatura superficial promedio para estas coberturas es de 20 °C, teniendo en cuenta que a medida que disminuye la cobertura vegetal este valor aumenta.

Las áreas calificadas como de desertificación media representan el 51,89 % con respecto al área total. Se encuentran en pendientes planas a moderadamente inclinadas (0% a 12 %) del valle del río Magdalena. Conformadas por mosaicos de coberturas entre pastos, rastrojos, cultivos y espacios naturales. También hay parches que se encuentran en pendientes fuertemente inclinadas a escarpadas, pero por su contenido de coberturas vegetal natural como arbustos el modelo general lo clasificó dentro de esta categoría. Al igual que en el anterior, las concentraciones de las precipitaciones son moderadamente estacionales, con algunos sectores estacionales y con un índice de agresividad climática que va de alta a muy alta (mayor a 120). El 86,73 % del total de estas áreas tiene un índice de aridez moderado y deficitario de agua, mientras el restante 13,27 % es moderado.

Los cuerpos de agua naturales como ríos fueron clasificados por el modelo general como de desertificación baja con el 1,51 % del área total. Mientras que las áreas desnudas y degradadas representa el 27,85 %.

7.3. Importancia del trabajo de investigación y comparaciones.

El presente trabajo de investigación es importante para establecer e implementar a través de técnicas de teledetección, una referencia metodológica espacial, enfocada en la identificación de las áreas más propensas a sufrir las consecuencias de la desertificación. Se agruparon los efectos de los factores de influencia más relevantes que interactúan para acelerar los procesos constantes de degradación del suelo.

El modelo propuesto y utilizado no se puede considerar como definitivo o cerrado para otras variables, por lo tanto, puede ser alimentado con otros atributos que sean causantes del deterioro de la tierra. El modelo en consecuencia está abierto a la reestructuración para incluir elementos de tipo climático, geomorfológico y de cobertura del suelo, o también para nuevos indicadores que necesiten de trabajos de campo para estimarlos con métodos geoestadísticos.

El enfoque de la investigación estuvo basado en los datos recolectados de sensores remotos y estaciones climáticas, ordenados y clasificados de acuerdo al principio de sensibilidad ambiental, usado para la calificación de los submodelos en el modelo general.

El modelo general se asemeja al calculado por Correa (2015) para la amenaza a la desertificación. Con la diferencia de haber incluido un atributo de temperatura de superficie en el submodelo climático y con un calificativo de sensibilidad ambiental a todo el modelo, para estimar las áreas más críticas a convertirse en desérticas. El Riesgo estimado por Correa (2015) fue estimado con base al producto de los indicadores de amenaza y la vulnerabilidad. Obtenidas a través de operaciones de álgebra de mapas sobre un modelo general para confrontar los atributos espaciales en un contexto clasificado y valorado acorde con calificaciones establecidas para estimar las áreas con mayor probabilidad a sufrir desertificación.

Con respecto al realizado por Ortiz (2013), basó sus estudios en la identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico del desierto de la Tatacoa, en el Municipio de Villavieja, en Norte del Departamento del Huila. Donde elaboró mapas de coberturas para los años 1975 - 1993, teniendo como base el "indicador de criticidad" correspondiente a los suelos donde se ha perdido la cobertura vegetal permanente, y el proceso de erosión y desertificación es progresivo. Obteniendo los siguientes resultados; Cambio de cobertura del año 1975 de un área de 2581,4 ha (5%) a 15723,8 Ha (30,4%) en el año 2010, lo que le dió una velocidad promedio de desertificación de 375,5 Ha /año y con una dirección de expansión alta hacia el Occidente, el Norte, el Oriente y Suroriente correspondiente a las veredas La Victoria, San Nicolás Gaviotas, Potosí, El Líbano, El Cabuyal, Palmira, El Cuzco, Doche y La Chivera.

A diferencia de lo anterior, el presente estudio identificó las áreas más sensibles a la desertificación, utilizando un modelo espacial en donde se integraron los factores más influyentes para el proceso de degradación. Estos fueron seleccionados teniendo en cuenta las experiencias de los programas a nivel nacional e internacional contra la lucha a la desertificación, expuesto en el marco teórico y especialmente a las investigaciones científicas como las de Correa (2015). El modelo multitemporal para el periodo total (1987 - 2014), también determinó el

avance de las tierras desnudas y degradadas para el área de estudio representada en un 2,57 % (2949,11 Ha) para un periodo de 27 años. Las áreas más propensas que arrojó el modelo espacial, fueron las que están al occidente, oriente, nororiente y segmentos aislados al interior del área de estudio en los bordes de cambios bruscos de uso del suelo y en colindancia con suelos degradados.

Con respecto al modelamiento de la tendencia a la desertificación realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2008) para Colombia, se extrajeron espacialmente los resultados del mapa (anexo H) para compararlos con los obtenidos por el modelo general en el área de interés. Se pudo inferir según el IDEAM, que la zona de mayor riesgo comprende una superficie total de “29785,84” Hectáreas (Ha) y se localizan en las Tierras desnudas y degradadas de acuerdo con la zonificación para el año 2014. Las Áreas con baja desertificación representan un área total de “9814,27” Ha; ubicadas en las pendientes planas por coberturas de pastos limpios, mosaico de pastos con espacios naturales y tierras desnudas o degradadas. Las superficies que no representan tendencia a la desertificación, tienen una superficie de “15410,72” Ha, y están conformadas por cuerpos de agua, pastos limpios y Mosaico de pastos con espacios naturales; localizadas hacia el Occidente con pendientes fuertemente inclinadas a escarpadas. A diferencia con el modelo general, estas sí muestran áreas con sensibilidad alta a la desertificación ya que se evalúan las superficies que tienen algún grado de producción natural (bosque y arbustos naturales) o antrópicas (ganadería) para indicar a través de los factores de influencia el grado de sensibilidad a la desertificación. Mientras que el modelo generado por el IDEAM, muestra las ponderaciones altas en las zonas ya degradadas (tierras desnudas). Finalmente se pudo argumentar, con la intersección de las áreas con mayor sensibilidad a la desertificación entre los resultantes del modelo general y las expuestas por el IDEAM (2008), que estas están conformadas por Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (18,66 Ha), Mosaico de pastos con espacios naturales (1376,75 Ha), Pastos enmalezados (832,72 Ha) y Pastos limpios (1084,28).

8 CONCLUSIONES

El análisis multitemporal durante un periodo total de 27 años (1987 a 2014), demostró el avance de la degradación del suelo en área de estudio, producto de la pérdida parcial o potencial de la calidad productiva del suelo a causa de los diferentes factores climáticos, geomorfológicos y de uso y cobertura del suelo. Las tierras desnudas o degradadas aumentaron en 2949,11 hectareas.

Los indicadores climáticos (índice de concentración de las precipitaciones, índice de agresividad climática, índice de aridez y a temperatura superficial de la tierra) determinaron en el Submodelo, una distribución de influencia alta (valor mayor a "1,45"), el cual se constituye en un elemento importante dentro del modelo general debido a los valores de los pixeles cercanos a "2".

Los indicadores Geomorfológicos, se caracterizaron por presentar más afectación a la degradación en las áreas con mayor pendiente, curvatura cóncava y alto índice topográfico; debido al transporte de sedimentos y lavados continuos del suelo por la fuerte energía gravitacional, afectando aún más las áreas desprovistas de coberturas naturales densas. Los indicadores de uso del suelo representan una mayor influencia en las áreas degradadas por actividades del monocultivo y sistemas pecuarios.

El modelo general demostró que las coberturas más sensibles a la degradación del suelo producto de la interacción de los factores climáticos, geomorfológicos y de uso y cobertura del suelo son los cultivos transitorios (137,81 Ha); mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (152,58 Ha); mosaico de pastos con espacios naturales (5439,05 Ha); pastos enmalezados (5024,55 Ha) y pastos limpios (10742,46 Ha).

Para el procesamiento de las imágenes de satélite en el estudio mutitemporal realizadas con imágenes Landsat para los años: 1987, 2000, 2010 y 2014, se utilizaron varias técnicas para la zonificación de las coberturas. Como punto de partida se hicieron recortes de las imágenes para mejorar los contrastes y algunas características particulares para la interpretación visual, posteriormente se calculó el índice óptimo para determinar las mejores combinaciones entre las tres bandas de cada imagen satelital y poder discriminar las cubiertas del suelo. Con el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) se identificaron las cubiertas vegetales; lo anterior permitió contextualizar las diferentes clases de cubiertas, complementadas con zonificaciones de la región. Finalmente se hizo un estudio supervisado y no supervisado con el algoritmo del software ERDAS y se procedió a editar las cubiertas para su clasificación, apoyado por todos los procesamientos descritos.

El desarrollo del modelo general ejecutado en el presente estudio para espacializar la tendencia a la desertificación, estuvo fundamentado en los planteamientos realizados por Kosmas et al. (1999), Basso et al. (2000) y Correa (2015), con sus investigaciones para modelar las áreas más afectadas por la degradación del suelo, a través de la integración de elementos de influencia (capas de información tipo raster) aplicando la fórmula de sensibilidad ambiental. Esta última nos permitió calificar y evaluar cada elemento en rango de influencia comprendidos entre 1 a 2, siendo los valores menores (cercaos a 1) con influencia baja y los valores altos (cercaos a 2) con mayor influencia. Cada submodelo estuvo representado por sus elementos en común de acuerdo al contexto espacial (clima, geomorfológico y de cobertura y uso del suelo) y al número de capas para poder ejecutar los submodelos en la fórmula. Posteriormente, estos últimos se agruparon en el modelo general con un número de capas de 3 submodelos para obtener el valor de cada pixel comprendido entre la escala de influencia y mostrar con las salidas gráficas la sensibilidad ambiental a la desertificación.

El presente estudio es importante para el análisis de las áreas degradadas por los procesos de desertificación, por que plantea una metodología de modelamiento espacial a través de técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélite, para entender la influencia de los diferentes factores ambientales, geomorfométricos y socioeconómicos que interactúan de manera directa o indirecta para mostrar las áreas más sensibles ambientalmente a la desertificación, y poder ayudar a encaminar los proyectos regionales y nacionales de manera más eficiente para contrarrestar el avance de las tierras que dejan de ser productivas.

El modelo propuesto y utilizado no se puede considerar como definitivo o cerrado para otras variables, por lo tanto, puede ser alimentado con otros atributos que sean causantes del deterioro de la tierra. El modelo en consecuencia está abierto a la reestructuración para incluir elementos de tipo climático, geomorfológico y de cobertura del suelo, o también para nuevos indicadores que necesiten de trabajos de campo para estimarlos con métodos geoestadísticos.

Finalmente, se considera que un posible trabajo futuro que le dé continuidad al presente proyecto, podría estar enfocado a la definición de la metodología para el proceso de validación y además definir en el modelo la manera de realizar ponderaciones independientes por indicador, permitiendo controlar y evaluar la incidencia individual al proceso de desertificación, llegando al punto de definir la utilidad en el uso de los indicadores propuestos.

9 REFERENCIAS

- Aguilar, C. (2014). *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. Tesis de maestría en geomatica. La plata: Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, 2014. 57 p.
- Alaske Satellite Facility (UAF). (2017). Recuperado de: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>
- Alatorre, L. & et al. (2015). Analysis of the Temporal and Spatial Evolution of Recovery and Degradation Processes in Vegetated Areas Using a Time Series of Landsat TM Images (1986-2011): *Central Region of Chihuahua, México*. *Open Journal of Forestry*, (5), 162-180. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4236/ojf.2015.52016>
- Basso, F., Bove, E., Dumontet, S., Ferrara, A., Pisante, M., Quaranta, G., Taberner, M. (2000). Evaluating environmental sensitivity at the basin scale through the use of geographic information systems and remotely sensed data: an example covering the Agri basin (Southern Italy). University of Basilicata, Potenza Italy, University of Bristol, Bristol, UK. *Elsevier, Catena* 40 (19-35).
- Begni, G., Escadafal, R., Fontannaz, D., y Nguyen, A. (2005). Remote sensing: a tool to monitor and assess desertification. Recuperado de <http://www.csf-desertification.org/bibliotheque/item/library-remote-sensing>
- Boluda, R; Gil, C y Vidal, V. (2005). *La hidroclimatología e impactos ambientales: degradación ambiental y desertificación*. Revista de Geografía da UFC. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/2736/273620645010.pdf>
- Buitrago, E. (2011). *Desarrollo de un modelo de visualización de erosión hídrica en el municipio de Samacá (Boyacá)* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Bogotá.
- Centro de Estudios Estratégicos Latinoamericanos (CEELAT). (2013). Degradación de suelos y desertificación en Colombia. Recuperado de: <http://ceelat.org/mapas/degradacion-de-suelos-y-desertificacion-en-colombia/>

- Collado, A., Chuviecow C., & Camarasaw, A. (2012). Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina. Published by Elsevier Science Ltd, 52: 121–133. doi:10.1006/jare.2001.0980
- Colparques. (2017). Desierto de la tatacoa. Recuperado de:
<http://www.colparques.net/TATACOA>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2005). *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*. Santiago de Chile, Chile: Publicación de las Naciones Unidas. Recuperado de
http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2448/1/S0500967_es.pdf
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2007). *Agricultura, desarrollo rural, tierra, sequía y desertificación: resultados, tendencias y desafíos para el desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile, Chile: Publicación de las Naciones Unidas. Recuperado de
http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3611/S2008295_es.pdf?sequence=1
- Correa, M. D. (2015). *Indicadores de riesgo de desertificación en zonas del Valle del Cauca (Colombia)*. Tesis presentada como requisito al título de Doctor en ciencias agropecuarias, Línea de investigación: Manejo de suelos y aguas. Universidad Nacional de Colombia. Palmira.
- Corso, M., Navone, S., Pietragalla, V., Bosio M., y Maggi, A. (2011). Variaciones del proceso de desertificación en la cuenca del río Santa María, Catamarca. *Revista de la Facultad de Agronomía*. Disponible en:
<http://www.researchgate.net/publication/236455208>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid, España: Rialps, S.A,
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2007). *Agricultura, Desarrollo Rural, Tierra, Sequía y Desertificación: Resultados, Tendencias y Desafíos para el Desarrollo Sostenible de América Latina y el Caribe*, Foro llevado a cabo Sobre la Aplicación regional Sostenible, Ciudad Santiago de Chile.
- Dascal, G. (2012). *La vulnerabilidad de las tierras desertificadas frente a escenarios de cambio climático en América Latina y el Caribe*. Colección Documentos de

- proyectos comisión económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile, p.102.
- Febles, G., y Ruiz, T. (2004). La desertificación y la sequía en el mundo. Avances en *Investigación Agropecuaria*, 8(2), 19-23. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83780201>
- Gallardo, A. (2006). *Geoestadística*. Ecosistemas, 2006/3. Recuperado de <https://fjferrer.webs.ull.es/Bibliog/Biblio/Geoestadistica.pdf>
- Guamal, M. (2015). Obtención de la temperatura de la superficie de la tierra a través de imágenes Landsat 8. Recuperado de: <https://sig-aplicaciones.blogspot.com.co/2015/06/obtencion-de-la-temperatura-de-la.html>
- Hountondji, C., Sokpon, N., & Ozer, P. (2005). *Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982–1999) for the monitoring of desertification*. Environmental Sciences and Management Department, University of Liege. Faculty of Agronomy, University of Parakou. International Journal of Remote Sensing, Vol. 27, No. 5, 10, 871–884.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA). (2007). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca, Metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia*, escala 1:100.000.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2008). *Tendencia a la desertificación*. Recuperado de: http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/PDF/DesertDeglacNal_Am_V2.pdf?
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). *Índice de aridez*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/ia>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2014). *Coberturas Nacionales*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). *Solicitud de Información*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. IGAC. (2011). *Manual de prácticas de percepción remota*. Bogotá, Colombia: Posada Elena.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial (MAVDT). 2010. *Protocolo para la identificación y evaluación de los procesos de degradación de suelos y tierras por desertificación*. Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de:
http://www.ideam.gov.co/documents/11769/241818/20120814_Protocolo_desertificacion.pdf/c34ac460-215b-4cb8-8ffe-a8f9218e2bac
- Kosmas, C., Kirkby, M., & Geeson, N. (1999). *The Medalus project: Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification*. European Union 18882, ISBN 92-828-6349-2. Recuperado de:
<https://www.kcl.ac.uk/projects/desertlinks/downloads/publicdownloads/ESA%20Manual.pdf>
- Lam, D., Rimmel, T., & Drezner T. (2011). *Tracking Desertification in California Using Remote Sensing: A Sand Dune Encroachment Approach*. Department of Geography, York University, 4700 Keele Street, N430 Ross Building, Toronto, ON, M3J 1P3, Canada. NASA. (2007). Landsat 7 Science Data Users Handbook.
- Lavado, J.F., Schnabel, S., Gómez, A., y Pulido, M. (2010). *Sensibilidad ambiental a la degradación en Extremadura (España)*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, N. ° 53 – 2010, 147 – 164. Recuperado de:
file:///C:/Users/oscar/Downloads/Dialnet-SensibilidadAmbientalALaDegradacionEnExtremaduraEs-3321222_1.pdf
- Leiva, G. (2015). Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio, citado por Correa, M. Indicadores de desertificación en zonas del Valle del Cauca (Colombia). Palmira: Universidad Nacional de Colombia, 2015. p. 36.

- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (1993). *Hidrología comparada: Un enfoque ecológico a los recursos hídricos y de suelo*. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, p.491.
- Olaya, A., Sánchez, M., y Acebedo, J. (Ed.). (2001). *La Tatacoa: Ecosistema Estratégico de Colombia*. Neiva, Colombia: Editorial Surcolombiana.
- Ortiz, P. N. (2013). Identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico Desierto de la Tatacoa. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Maestría en ecología y gestión de ecosistemas estratégicos. Universidad Sur Colombiana.
- Plan de Acción Nacional. (PAN). (2005). *Lucha Contra La Desertificación y la Sequía en Colombia*. Recuperado de:
www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Zonas-Secas/5596_250510_plan_lucha_desertificacion.pdf
- Patiño, J.F. (2001). *Expresiones mórficas de erosión intensa en el "desierto de la Tatacoa"*. Recuperado de
<http://www.unalmed.edu.co/~geomorfo/ArticulosComportamientos/010c0020a.htm>
- Sobrino, J.A., Raissouni, N., Kerr, Y., Olioso, A., López – Garcia, M.J., Belais, A., El Kharraz, M.H., Cuenca, J., Dempere, L., (2000). *Teledetección*. Sobrino, J.A. (Ed.), Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia (ISBN 84-370-4220-8), Valencia (España).
- Symeonakis, E., & Drake, N. (2012). Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. *Taylor & Francis Ltd*, VOL. 25, NO. 3, 573–592. doi: 10.1080/0143116031000095998
- UNCCD. (2007). *Tercer Informe Nacional de Implementación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía*. (3º). Recuperado de:
http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Zonas-Secas/5638_010610_tercer_informe_desertificacion.pdf
- United States Geological Survey (USGS). (2016). Using the USGS Landsat 8 Product. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>

United States Geological Survey (USGS). (2017). Recuperado de: <http://glovis.usgs.gov/>

Verbist, K., Santibañez, F., Gabriels, D. y Soto, G. (2015). Atlas de Zonas Áridas de América Latina y El Caribe. Recuperado de:

http://www.cazalac.org/2015/fileadmin/templates/documentos/Atlas_de_Zonas_Aridas_de_ALC_Espanol.pdf

Younis, M., Gilabert, M., y Melía, J. (1999). *La dinámica de la vegetación como indicador de la desertificación en la cuenca del guadalentín*, de España. Departament de Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de Valencia.

ANEXOS

Anexo A. Desviación estándar para bandas de imagen Landsat 8.

Banda	Desv. Estandar
1	8474,742
2	8503,582
3	8304,825
4	8508,052
5	10634,546
6	8438,185
7	6761,369
8	8370,698
9	2749,188
10	11415,431
11	10049,516

Fuente. Presente estudio, 2017

Anexo B. Tabla de correlación de bandas imagen Landsat 8.

Banda	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0,9984	0,9956	0,9885	0,9546	0,9502	0,9650	0,9902	0,8237	0,5902	0,6166
2	0,9984	1	0,9987	0,9949	0,9420	0,9422	0,9616	0,9950	0,7945	0,5498	0,5768
3	0,9956	0,9987	1	0,9978	0,9374	0,9426	0,9626	0,9959	0,7782	0,5316	0,5585
4	0,9885	0,9949	0,9978	1	0,9173	0,9330	0,9576	0,9958	0,7443	0,4893	0,5163
5	0,9546	0,9420	0,9374	0,9173	1	0,9628	0,9425	0,9265	0,8816	0,7308	0,7513
6	0,9502	0,9422	0,9426	0,9330	0,9628	1	0,9880	0,9350	0,8481	0,6945	0,7126
7	0,9650	0,9616	0,9626	0,9576	0,9425	0,9880	1	0,9571	0,8207	0,6231	0,6447
8	0,9902	0,9950	0,9959	0,9958	0,9265	0,9350	0,9571	1	0,7614	0,5118	0,5387
9	0,8237	0,7945	0,7782	0,7443	0,8816	0,8481	0,8207	0,7614	1	0,8236	0,8376
10	0,5902	0,5498	0,5316	0,4893	0,7308	0,6945	0,6231	0,5118	0,8236	1	0,9939
11	0,6166	0,5768	0,5585	0,5163	0,7513	0,7126	0,6447	0,5387	0,8376	0,9939	1

Fuente. Presente estudio, 2017

Anexo C. Índice Óptimo imagen Landsat 8 (OIF).

Nº	RGB	Suma correlación coef.	Suma desviaciones estándar	OIF
1	123	2,9926	25283,1490	8448,4220
2	234	2,9914	25316,4590	8463,1874
3	345	2,8525	27447,4230	9622,2471
4	456	2,8131	27580,7830	9804,5310
5	245	2,8542	27646,1800	9686,2615
6	134	2,9819	25287,6190	8480,2702
7	764	2,8786	23707,6060	8235,8013
8	765	2,8933	25834,1000	8928,8781
9	753	2,8425	25700,7400	9041,5866
10	754	2,8173	25903,9670	9194,4744

Fuente. Presente estudio, 2017

Anexo D. Desviación estándar para bandas de imagen Landsat 5.

Banda	Desv. Estandar
1	44,31
2	24,979
3	27,668
4	43,277
5	52,079
6	70,164
7	25,058

Fuente. Presente estudio, 2017

Anexo E. Tabla de correlación de bandas imagen Landsat 5.

Banda	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,96471	0,94495	0,91369	0,93502	0,82848	0,93413
2	0,96471	1	0,99024	0,86985	0,89923	0,70967	0,93728
3	0,94495	0,99024	1	0,81735	0,89042	0,65522	0,95039
4	0,91369	0,86985	0,81735	1	0,92084	0,88580	0,84195
5	0,93502	0,89923	0,89042	0,92084	1	0,86410	0,96683
6	0,82848	0,70967	0,65522	0,88580	0,86410	1	0,75420
7	0,93413	0,93728	0,95039	0,84195	0,96683	0,75420	1

Fuente. Presente estudio, 2017

Anexo F. Índice Óptimo Landsat 5 (OIF).

Nº	RGB	Suma coef. correlación	Suma desviaciones estándar	OIF
1	123	2,89990019	96,957	33,4346
2	234	2,67743232	95,924	35,8269
3	345	2,62860234	123,024	46,8021
4	245	2,68990853	120,335	44,7357
5	134	2,77233662	115,255	41,5732

Fuente. Presente estudio, 2017.

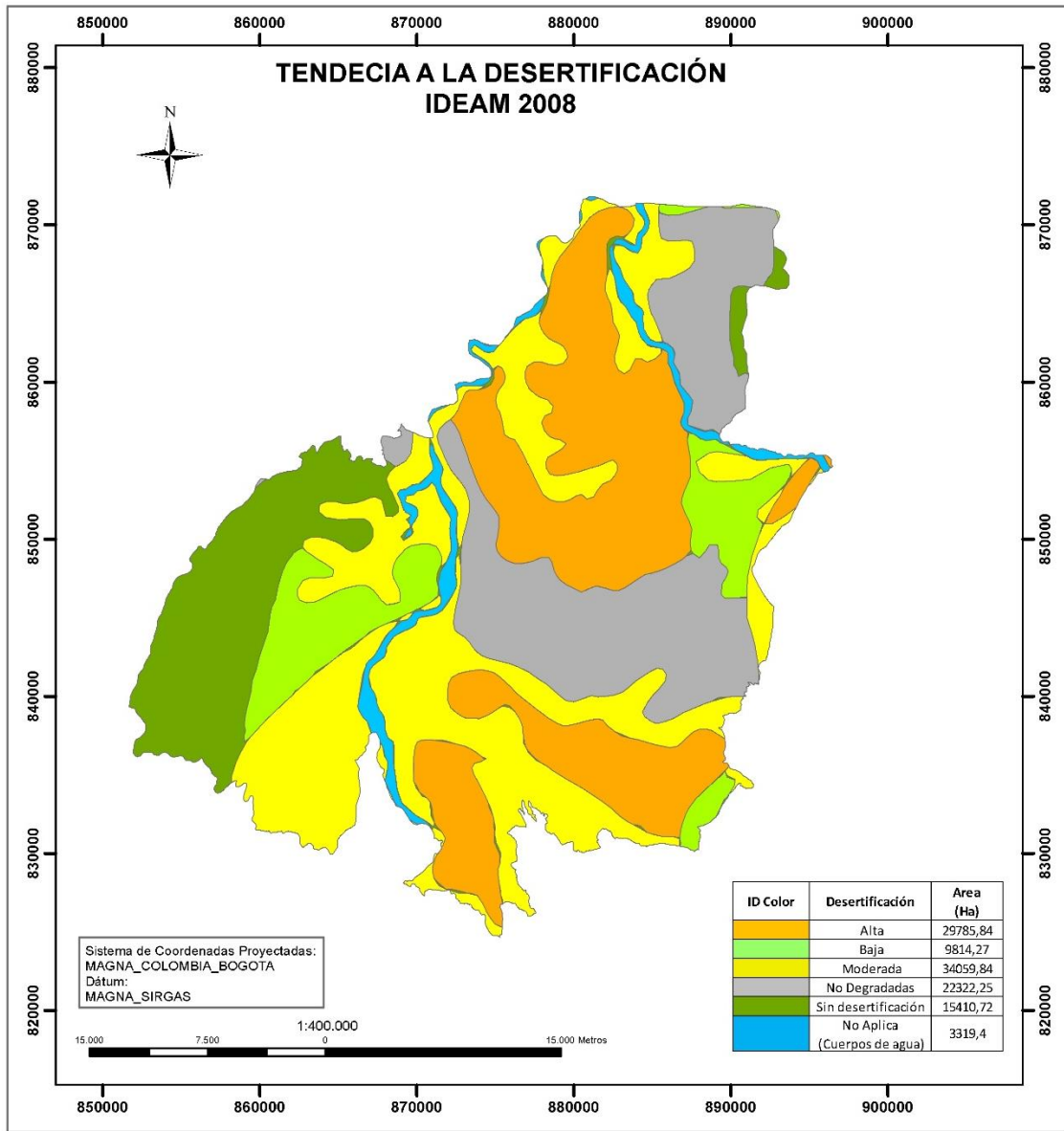
Anexo G. Cambios en la cobertura del suelo ocurrido en el periodo 1987 - 2014.

Cobertura Año 1987		Cobertura Año 2014		Área (Ha)
Cobertura	Código	Cobertura	Código	
Arbustales	322	Arbustales	322	1404,8582
Arbustales	322	Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	0,2735
Arbustales	322	Río	511	1,6796
Bosque de galería y ripario	314	Bosque de galería y ripario	314	2519,1859
Bosque de galería y ripario	314	Cultivos transitorios	21	5,4044
Bosque de galería y ripario	314	Pastos enmalezados	233	56,8376
Bosque de galería y ripario	314	Pastos limpios	231	2,7351
Bosque de galería y ripario	314	Tierras desnudas y degradadas	333	21,1013
Cultivos permanentes arbustivos	222	Cultivos permanentes arbustivos	222	22,8256
Cultivos transitorios	21	Cuerpos de agua artificiales	514	3,8133
Cultivos transitorios	21	Cultivos permanentes arbustivos	222	4,283
Cultivos transitorios	21	Cultivos transitorios	21	6685,0442
Cultivos transitorios	21	Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	31,8505
Cultivos transitorios	21	Mosaico de pastos con espacios naturales	244	63,0307
Cultivos transitorios	21	Mosaico de pastos y cultivos	242	391,7854
Cultivos transitorios	21	Pastos enmalezados	233	12,9634
Cultivos transitorios	21	Pastos limpios	231	84,1266
Cultivos transitorios	21	Río	511	83,4045
Cultivos transitorios	21	Tierras desnudas y degradadas	333	6,1367
Herbazal Denso	321	Herbazal Denso	321	83,9364
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	Cultivos transitorios	21	18,6216
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	178,2192
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	Mosaico de pastos con espacios naturales	244	0,0771
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	Pastos enmalezados	233	0,0024
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	Pastos limpios	231	5,7954
Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	Río	511	29,7651
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Sin área de cobertura	0	3,8403
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Cuerpos de agua artificiales	514	10,8405
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Cultivos transitorios	21	5,7503
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	3622,9587
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Mosaico de pastos con espacios naturales	244	266,4618
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Mosaico de pastos y cultivos	242	3,1931
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Pastos enmalezados	233	1,2865
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Pastos limpios	231	0,8299
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Río	511	155,5806
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	Tierras desnudas y degradadas	333	51,594
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Cultivos transitorios	21	155,1236
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Mosaico de cultivos con espacios naturales	245	9,4791
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	234,9672
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Mosaico de pastos y cultivos	242	0,0394
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Pastos limpios	231	679,4754
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Río	511	100,2159
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Tierras desnudas y degradadas	333	108,9667
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Mosaico de pastos con espacios naturales	244	18526,4265
Mosaico de pastos con espacios naturales	244	Tierras desnudas y degradadas	333	3,9948

Mosaico de pastos y cultivos	242	Sin área de cobertura	0	5,7695
Mosaico de pastos y cultivos	242	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	686,0601
Mosaico de pastos y cultivos	242	Mosaico de pastos y cultivos	242	5140,2023
Mosaico de pastos y cultivos	242	Pastos enmalezados	233	21,2624
Mosaico de pastos y cultivos	242	Pastos limpios	231	355,3844
Mosaico de pastos y cultivos	242	Río	511	34,7478
Mosaico de pastos y cultivos	242	Tierras desnudas y degradadas	333	493,9844
Mosaico de pastos y cultivos	242	Mosaico de pastos con espacios naturales	244	0,2634
Pastos enmalezados	233	Sin área de cobertura	0	0,9489
Pastos enmalezados	233	Cultivos transitorios	21	0,7875
Pastos enmalezados	233	Mosaico de cultivos con espacios naturale	245	8,2724
Pastos enmalezados	233	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	1,417
Pastos enmalezados	233	Pastos enmalezados	233	13589,6702
Pastos enmalezados	233	Pastos limpios	231	557,3517
Pastos enmalezados	233	Río	511	12,9394
Pastos enmalezados	233	Tierras desnudas y degradadas	333	337,4959
Pastos limpios	231	Sin área de cobertura	0	2,8644
Pastos limpios	231	Arbustales	322	0,0637
Pastos limpios	231	Cuerpos de agua artificiales	514	80,9178
Pastos limpios	231	Cultivos transitorios	21	57,2078
Pastos limpios	231	Mosaico de cultivos con espacios naturale	245	10,5623
Pastos limpios	231	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	200,1251
Pastos limpios	231	Mosaico de pastos con espacios naturales	244	474,6494
Pastos limpios	231	Pastos enmalezados	233	886,3461
Pastos limpios	231	Pastos limpios	231	22936,444
Pastos limpios	231	Río	511	74,769
Pastos limpios	231	Tierras desnudas y degradadas	333	1998,2568
Río	511	Sin área de cobertura	0	78,2766
Río	511	Arbustales	322	1,9637
Río	511	Cultivos transitorios	21	85,1898
Río	511	Mosaico de cultivos con espacios naturale	245	30,6679
Río	511	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	85,3797
Río	511	Mosaico de pastos con espacios naturales	244	92,3638
Río	511	Mosaico de pastos y cultivos	242	98,9494
Río	511	Pastos enmalezados	233	14,2967
Río	511	Pastos limpios	231	75,2496
Río	511	Río	511	1128,7601
Río	511	Tierras desnudas y degradadas	333	0,6074
Tierras desnudas y degradadas	333	Cuerpos de agua artificiales	514	72,6627
Tierras desnudas y degradadas	333	Río	511	0,3715
Tierras desnudas y degradadas	333	Tierras desnudas y degradadas	333	28911,6283
Vegetación secundaria o en transición	323	Vegetación secundaria o en transición	323	104,8892
Zonas urbanizadas	11	Zonas urbanizadas	11	195,7545
Sin área de cobertura		Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	4,7558
Sin área de cobertura		Mosaico de pastos y cultivos	242	0,0018
Sin área de cobertura		Pastos limpios	231	29,9911
Sin área de cobertura		Río	511	112,5086

Fuente. Presente estudio, 2017

Anexo H. Tendencia a la desertificación. IDEAM 2008.



Fuente. IDEAM, 2008.