



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Indicadores de riesgo de desertificación en zonas del Valle del Cauca (Colombia)

Indicators of desertification risk in areas of Valle del Cauca (Colombia)

Diana Lucia Correa Moreno

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela de Posgrados
Palmira (Valle), Colombia

2015

Indicadores de riesgo de desertificación en zonas del Valle del Cauca (Colombia)

Indicators of desertification risk in areas of Valle del Cauca (Colombia)

Diana Lucia Correa Moreno

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Directores:

I. A. Ph. D. Álvaro García Ocampo

I. A. Ph. D. Carlos Escobar Chalarca

Línea de Investigación: Manejo de Suelos y Aguas

Grupo de Investigación:

“Uso y Manejo de Suelos y Aguas con Énfasis en Degradación de Suelos”

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Escuela de Posgrados

Palmira (Valle), Colombia

2015

Dedicatoria

A Dios por su inmensa generosidad conmigo.

*A mi mejor presente y luz en todo camino: mi esposo
John Jairo y mi hijo Alejandro.*

*A mi mamá Amparo, mi hermana Paola,
Juancito, mi Abuelita Felicidad, Bernardo y demás
familiares, por su confianza, apoyo y fé ciega en
todos mis propósitos.*

*A mi primer gran maestro de letras y vida, mi
tío padrino Jorge Moreno (Q.e.p.d), por enseñarme
en sus actos, que con constancia, disciplina,
tenacidad y mucho amor, se logra lo que anhelamos.*

***“Tu eres lo que es el profundo deseo que
te impulsa. Tal como es tu deseo es tu voluntad.
Tal como es tu voluntad son tus actos. Tal como
son tus actos es tu destino”.***
Brihadaranyaka Upanishad.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira por la formación académica y personal y la financiación parcial de este trabajo.

A mis maestros, en particular al Dr. Álvaro García Ocampo por su ejemplo, orientación y amistad.

A los investigadores Andrés Javier Peña y Jeiner Yobany Buitrago por sus aportes, sus enseñanzas y su amistad.

A los jurados Doctores Jesús Antonio Castillo Franco, Jorge Fernando Navia y en especial a la Doctora Yolanda Rubiano Sanabria, por sus valiosos aportes.

Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), por el suministro de información y datos para este trabajo, a través del convenio con la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

A la Corporación Autónoma regional del Valle (CVC), por el suministro de información climática a través del convenio suscrito con la Sede Palmira de la Universidad.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) y a los investigadores del C. I. Palmira, por el tiempo, la confianza y animarme a culminar esta tarea.

A Camilo, Cristina, Melissa, Ruby Stella, Jaime Humberto y Carmen Rosa, por acogerme como un miembro más de su grupo de trabajo en la sede Bogotá.

A mi Esposo John Jairo Álvarez (Asesor, compañero y amigo), mi hijo Alejandro, y demás familiares por cederme el tiempo sagrado de compartir en familia.

A mis amigos de siempre, los que llevo en el corazón, en mi mente y en mis sonrisas.

A todos los que colocaron obstáculos en este meta, porque éstos me fortalecieron y me dieron la oportunidad de abrirme a un campo del conocimiento con impacto local, nacional y global.

Resumen

Esta investigación tuvo 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). Este incluye: (1) la estimación de la amenaza a desertificación, a través del uso de indicadores climáticos, geomorfométricos y de coberturas y usos del suelo (2) 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 (3) la obtención del índice de riesgo a desertificación. La aplicación y calibración del modelo en la cuenca del río Amaimé (Valle del Cauca - Colombia), zona piloto, permite afirmar que a través de esta aproximación metodológica, es posible diferenciar 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.

Palabras Clave: Amenaza; vulnerabilidad; cambio climático.

Abstract

This research aimed to evaluate biophysical indicators of desertification risk in areas of Valle del Cauca, by multifactorial methodological model generated for integral analysis of Desertification risk (MARD). This includes: (1) estimation of the threat desertification, through the use of climate, geomorfometric and coverage and land uses indicators (2) the generation of soil vulnerability index, reached by estimating the inherent quality soil (exposure, sensitivity and adaptability) and (3) obtaining desertification risk index. The application and calibration of the model at the Amaime river basin (Valle del Cauca - Colombia), pilot area, allows to affirm that through this methodological approach, it is possible to differentiate areas with higher or lower risk, supported in the analysis by spatial modeling of data surfaces available, pondering at regional level the influence of biophysical factors on the processes of desertification and land degradation, with greater accuracy and resolution, applicable to similar regions.

Keywords: Threat; vulnerability; climate change.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XIV
Introducción	1
1. Capítulo 1. Desertificación	3
1.1 Evolución del concepto de desertificación.....	3
1.2 Desertificación versus degradación de tierras.....	5
1.3 Origen, causas y consecuencias de la desertificación	7
1.3.1 Origen y causas	7
1.3.2 Consecuencias.....	8
1.4 Contexto geográfico de la desertificación.....	9
1.5 Indicadores de desertificación.....	11
1.5.1 Clasificación de indicadores	13
2. Capítulo 2. Modelo metodológico para el análisis del riesgo de desertificación	15
2.1 Introducción	15
2.2 Modelo para el análisis del riesgo a desertificación (MARD).....	17
2.2.1 Estructura general.....	17
2.2.2 Procesamiento y obtención de datos para análisis del riesgo de desertificación	27
3. Capítulo 3. Análisis Integral del Riesgo a Desertificación (AIRD)	37
3.1 Introducción.....	37
3.2 Metodología.....	41
3.2.1 Descripción del área de estudio.	41
3.2.2 Estimación de la Amenaza a desertificación.	46
3.2.3 Estimación del índice de Vulnerabilidad edáfica a desertificación:	50
3.2.4 Estimación del índice de riesgo a desertificación:	52
3.3 Resultados y discusión.	53
3.3.1 Amenaza a desertificación.	53
3.3.2 Evaluación de la vulnerabilidad edáfica a desertificación	71
3.3.1 Análisis del riesgo a desertificación:.....	76

4. Conclusiones	79
A. Anexo A: Modelo Cartográfico para el análisis del riesgo de desertificación (MARD)	81
B. Anexo B: Amenaza desertificación en la cuenca del río Amaime (Valle del Cauca-Colombia)	83
C. Anexo C: Vulnerabilidad edáfica a desertificación en la Cuenca del rio Amaime (Valle del Cauca – Colombia).	91
Bibliografía	93

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1 Modelo metodológico para el análisis del riesgo a desertificación (MARD).	18
Figura 3-1. Ubicación Cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).	42
Figura 3-2. Amenaza a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). Índices de amenaza natural y antrópica a desertificación.	54
Figura 3-3. Amenaza Natural a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). Tendencia de Indices de amenaza climática y geomorfométrica.	56
Figura 3-4. Distribución espacial y temporal de la precipitación y evapotranspiración en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). a. Precipitación promedio anual. b. Evapotranspiración promedio anual. c. Distribución mensual de la precipitación en grupos de estaciones.....	57
Figura 3-5. Tendencia de índices climáticos de desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).	59
Figura 3-6. Tendencia de indicadores geomorfométricos de desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca. (Colombia).	64
Figura 3-7. Tendencia de índices de Amenaza antrópica en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).	68
Figura 3-8. Vulnerabilidad edáfica a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). Índice de vulnerabilidad.....	72
Figura 3-9. Vulnerabilidad edáfica a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). Índices de exposición, sensibilidad y capacidad de resistencia a degradación.....	74
Figura 3-10. Riesgo a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).	77

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Clasificación y relación de atributos seleccionados para estimación de índices de amenaza y vulnerabilidad edáfica en el MARD.	19
Tabla 2-2. Descripción de atributos para estimación de los índices de amenaza climática y geomorfométrica del MARD.....	22
Tabla 2-3. Descripción de atributos para estimación de índices de vulnerabilidad edáfica del MARD (Exposición, Sensibilidad y Capacidad de resistencia a degradación).....	26
Tabla 2-4. Clasificación y valoración de atributos climáticos y geomorfométricos para estimación de índices de amenaza natural del MARD.	30
Tabla 2-5. Clasificación y valoración de atributos de coberturas y uso de la tierra para la estimación de índices de amenaza antrópica del MARD.	31
Tabla 2-6. Clasificación y valoración de atributos edáficos para la estimación de índices de vulnerabilidad del suelo del MARD.....	32
Tabla 3-1. Características biofísicas de la Cuenca del río Amaime.	44
Tabla 3-2. Estaciones utilizadas para el análisis de amenaza climática en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).....	48
Tabla 3-3.. Regiones de análisis de riesgo a desertificación (RARD) presentes en la cuenca del río Amaime para evaluación de vulnerabilidad edáfica a desertificación.	51

Introducción

La desertificación se ha definido como “la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas”. Es un problema de carácter global que afecta un 40% del área del planeta y a la mayoría de los países en todos los continentes, siendo los menos desarrollados los más vulnerables y afectados por este fenómeno (UNCCD, 2000; Reynolds et al., 2007).

Es un proceso biofísico que tiene grandes repercusiones económicas, sociales, políticas y culturales, ya que afecta la productividad y disponibilidad de alimentos, la oferta de la calidad y cantidad de agua, la diversidad biológica, la convivencia social y la calidad de vida de las comunidades involucradas, generando procesos de migración y desplazamiento de zonas rurales a los centros poblados.

En Colombia la Implementación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación y Sequía (UNCCD), logró que en el año 2003 se hiciera una primera aproximación al proceso de la desertificación en el territorio nacional, la cual se llevó a cabo mediante estimación de áreas degradadas por erosión, salinización y susceptibilidad a la compactación con datos preexistentes a escalas generales (IDEAM - MAVDT, 2003).

Posteriormente, como parte de los acuerdos de implementación del plan de acción nacional contra la desertificación (PAN) y con la participación de varias instituciones se elaboró el protocolo de identificación y evaluación de la degradación por desertificación (IGAC et. al., 2010). Pero hasta el momento, no se cuenta con una red especializada de cubrimiento y seguimiento que permita validar la evolución de los procesos de degradación excepto para casos muy locales.

Ahora se hace necesario validar la información existente sobre degradación de suelos y desertificación, delimitar áreas a escala más detallada y generar una línea base de indicadores estandarizados, reconocidos internacionalmente, que proporcionen información y faciliten el seguimiento de los procesos y la toma de decisiones a escala regional, que coadyuven a disminuir el avance de la desertificación tanto a nivel regional como local.

Las razones expuestas justificaron la presente investigación cuyo objetivo general, se enfocó en establecer e identificar indicadores que permitieran estimar el riesgo de desertificación. Particularmente, generar una propuesta metodológica para evaluar el riesgo de desertificación, apoyada en herramientas de sistemas de información geográfica y sensoramiento remoto y, validarla mediante la evaluación de indicadores biofísicos de amenaza y vulnerabilidad de desertificación, en la Cuenca del río Amaime – Palmira-Cerrito, Valle del Cauca, Colombia.

El documento tiene la siguiente estructura: en el capítulo 1, se consigna el marco teórico general de la investigación, que incluye aspectos relacionados con la conceptualización de desertificación y degradación e indicadores biofísicos en el contexto de cambio climático, adaptables a la evaluación y monitoreo del proceso de desertificación que involucran indicadores de calidad del suelo, clima y coberturas.

El capítulo 2, corresponde al objetivo específico uno enfocado a la formulación de una propuesta metodológica para la evaluación y monitoreo del riesgo de desertificación. Presenta el modelo metodológico para el análisis del riesgo de desertificación, propuesto en esta investigación, que se apoya en el análisis espacial de información de indicadores biofísicos de amenaza y vulnerabilidad.

El capítulo 3, responde al objetivo específico dos: evaluar indicadores biofísicos de riesgo de desertificación en zonas del Valle del Cauca. Hace referencia a los resultados de la validación de la metodología propuesta, mediante aplicación del modelo de análisis integral de riesgo de desertificación (AIRD), en caso de estudio en la cuenca del río Amaime, municipios de Palmira y Cerrito, en el Valle del Cauca, Colombia. Y el capítulo 4, sintetiza los resultados y las conclusiones del estudio.

1. Capítulo 1. Desertificación.

1.1 Evolución del concepto de desertificación

El término “desertificación”, fue introducido por el botánico y ecologista francés Aubreville en 1949 para indicar el “avance de las arenas de los desiertos” sobre las tierras fértiles (Dregne, 2002; Barbero-Sierra *et al.*, 2013). Desde entonces su interpretación ha sido ampliamente cuestionada, al confundirse la formación natural de desiertos con la aparición de áreas degradadas e infértiles producto de la interacción de condiciones climáticas, factores biofísicos y patrones socioeconómicos y culturales.

En la conferencia de las Naciones Unidas sobre desertificación realizada en Nairobi en 1977, surgieron numerosas definiciones que coinciden en describir la desertificación como un proceso ambiental adverso, condicionando el cambio de un estado favorable a un estado menos favorable, respecto a la calidad de los recursos, al valor social y a la estabilidad ecológica.

Dunjó (2004), relaciona las descripciones negativas utilizadas, en aproximadamente cien definiciones oficiales, entre las que se incluyen: deterioro de los ecosistemas, degradación de la diversidad vegetal, destrucción del potencial biológico, detrimento de sistemas productivos, reducción de la productividad biológica, alteración de la biomasa, intensificación de condiciones de desierto y empobrecimiento del ecosistema.

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación y Sequía (UNCCD, siglas en inglés) (UNCCD, 1994), definió la desertificación como “la degradación de tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas”.

Esta definición es hoy, oficialmente aceptada y difundida por la secretaria de la UNCCD y la evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EM – MEA, siglas en inglés), y adoptada por

la mayoría de los países del mundo, signatarios de la Convención. Una vez establecida y aceptada esta definición, se elaboraron los Atlas Mundiales de la Desertificación (PNUMA, 1997, 2010), se emprendieron numerosas investigaciones y se han generado publicaciones a escala global: Le Houérou, (1996); Glenn *et al.*, (1998); Evans y Geerken (2004); del Barrio *et al.*, (2010); Martínez-Sánchez *et al.*, (2011); Dawelbait y Morari, (2012); y Zucca *et al.*, (2012), entre otros.

Sin embargo, la definición oficial, es todavía considerada vaga y ambigua por generar confusión al no diferenciar de manera clara el proceso del estado de desertificación, sus causas exactas y las regiones geográficas y ecosistemas en las que aplica y también, por el desconocimiento de los procesos complejos del entorno social, económico y ambiental que están asociados al fenómeno, tal como lo indican Alfaro (2005), Barbero-Sierra *et al.*, (2013) y D'Odorico *et al.*, (2013).

La definición de la UNCCD, enmarca la desertificación en áreas bioclimáticas que van desde zonas áridas a subhúmedas secas, consideradas como ecosistemas frágiles desde el punto de vista biofísico, y con muy baja probabilidad de recuperación. Se subraya, que los procesos de degradación se pueden dar con mayor intensidad, si sobre una misma área se combinan, la ocurrencia de eventos climáticos extremos y el desarrollo de actividades antrópicas que conllevan a la intensificación del uso del suelo.

El Consorcio de la Ciencia Aplicada a las Tierras Secas para el Desarrollo (DSD, por sus siglas en inglés) (DSD, 2009), concluye que la distinción hecha en la definición de desertificación, obedece a las políticas y al radio de acción de la UNCCD. Precizando que “aunque las tierras secas y no secas difieren en muchos aspectos, la degradación de la tierra como un proceso con un estado final llamado desertificación puede aplicarse a ambas zonas”.

Por tanto, la lucha contra la desertificación, es relevante para las dos zonas, aunque la degradación del suelo y la desertificación en las tierras secas siguen siendo el foco de intervención de la UNCCD.

1.2 Desertificación versus degradación de tierras

A nivel mundial, se discute y plantea la semejanza entre la terminología usada en el contexto de desertificación, degradación de la tierra y degradación del suelo. Las expresiones utilizadas para referirse al tema de desertificación, conceptualmente generan confusión si no se comprenden: la escala de acción, las causas y las implicaciones de estos procesos.

En Barrow (1994), se hace mención a los términos más frecuentes para referirse a la degradación de tierras secas, entre los que se incluyen: desertificación, desertización, avance del desierto, aridización, aridificación y xerotización. Donde, los dos primeros son utilizados para indicar el cambio a condiciones más áridas, en algunos casos, pueden indicar diferencias en el grado de degradación. Este documento establece que desertificación se usa para denominar la degradación inducida por el hombre y desertización para la degradación producida por causas naturales.

En tanto que Dunjón (2004), precisa que aunque ambos procesos "desertificación" y "degradación" conducen a suelos parcial o totalmente improductivos, estos vocablos no son sinónimos. La degradación se refiere a cambios en las propiedades físicas, químicas, y biológicas del suelo, que afectan el crecimiento vegetal; en tanto que la desertificación se centra en los factores ambientales y antrópicos, que afectan la productividad del suelo.

La degradación de tierras tal como la define la UNCCD (1994), "la reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica de diferentes ecosistemas" coincide con la de Barrow (1994), quien enfatiza, que esta aplica tanto para las zonas secas como para las húmedas, y puede ser causada por los sistemas de utilización de la tierra, por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y patrones de poblamiento.

El Banco Mundial (2008); FAO (2011), y Morales y Parada (2005), coinciden en que la degradación de la tierra, involucra procesos que ocasionan el detrimento de recursos naturales como el suelo, el agua y la vegetación natural, siendo aplicable para zonas secas y húmedas. Consideran la degradación de suelos como el principal factor de

desertificación, primordial en el deterioro de otros recursos y en consecuencia de manera global en la degradación de las tierras, bajo condiciones climáticas diferentes.

La degradación del suelo se produce cuando hay una disminución en su calidad o capacidad productiva como resultado de cambios adversos en sus propiedades biológicas, químicas, físicas e hidrológicas. Lal, (1998) y MEA (2005), en relación con la desertificación, afirman que la disminución de la calidad del suelo tiene un impacto adverso sobre las funciones ecológicas y ambientales de los suelos que mantienen la calidad del agua y del aire; por lo que la degradación del suelo lleva a la desertificación y en consecuencia contribuye al cambio global del clima con la pérdida de la capacidad de captura de carbono del suelo y el aumento del albedo de la superficie terrestre.

La degradación de la vegetación implica una combinación de procesos naturales que incluyen cambios drásticos en el clima, que pueden conducir a la pérdida de ciertas especies y hábitats, reducción de la diversidad biológica y biomasa, por una menor disponibilidad de humedad o por la invasión de especies exóticas (Banco Mundial, 2008). Su evaluación se centra en los cambios adversos en la cantidad, calidad y diversidad de las plantas, que se encuentran en las zonas de pastizales, bosques y matorrales y en la cuantificación de la biomasa y productividad vegetal y animal en función del tiempo y de las condiciones climáticas (Allington y Valone, 2010; Yiran *et al.*, 2012).

La degradación de recursos hídricos, incluye procesos que involucran cambios en la cantidad y calidad del agua y en alteraciones en el régimen hidrológico. Factores que deterioran los ecosistemas acuáticos y modifican la biodiversidad y disponibilidad del recurso para consumo humano y animal (Asefa *et al.*, 2012; Boy-Roura *et al.*, 2013).

Para el Banco Mundial (2008), la degradación hídrica surge de la sobreexplotación de las tierras en las cuencas, conjugada con un manejo inadecuado del agua. Entre sus efectos se incluyen: manifiesto incremento de la vulnerabilidad a inundaciones y derrumbes, escasez de agua en la estación seca, disminución en la calidad del agua debido al incremento de sedimentos y nutrientes, mayores costos para los sistemas hidroeléctricos, de irrigación y de agua potable, menor productividad de la acuicultura en tierra firme, daño a la pesca marina y daño permanente a cuencas y pantanos.

Matallo (2005) plantea que el uso de vocablos que asocian o asimilan a la desertificación con otros fenómenos como la sequía, son producto de la falta de claridad conceptual y del desconocimiento de los fundamentos teóricos que los sustentan.

También, comenta que la sequía es un fenómeno más reconocido y más “visible” que la desertificación, y que es un evento perceptible en el tiempo a diferencia de la desertificación, considerada como un proceso que ocurre durante lapsos de tiempo relativamente extensos (diez o más años); razón por la cual las pérdidas de productividad y producción son atribuidas a la sequía, que es más evidente, y no a la desertificación.

1.3 Origen, causas y consecuencias de la desertificación

1.3.1 Origen y causas

La desertificación es un proceso complejo que involucra agentes naturales y antropogénicos en su origen y expansión. Geist y Lambin (2004), mediante un análisis de 132 casos locales de degradación de tierras secas, en diferentes lugares del mundo, encontraron que la desertificación era causada por factores climáticos, económicos, institucionales, políticos y por el crecimiento de la población, que condicionaban la expansión de la agricultura, la ganadería y la infraestructura a nivel local.

Aunque la dinámica de la desertificación puede ser monitoreada y valorada mediante la combinación de observaciones satelitales e información in situ, las causas de la desertificación difieren ampliamente en regiones con diferentes características climáticas y condiciones socioeconómicas. Lo cual impide su identificación precisa, por las múltiples interacciones que se dan entre factores biofísicos y socioeconómicos (Yang *et al.*, 2007, Xu *et al.*, 2010).

A escala global, se puede afirmar que la deforestación en las regiones húmedas y el pastoreo excesivo en las zonas áridas, son los que más contribuyen a la degradación de las tierras del mundo. En tanto que la erosión del suelo en las tierras agrícolas de secano, y el deterioro químico y físico del suelo son los causantes de la salinidad y las inundaciones

en las zonas áridas irrigadas, siendo identificados estos como los principales problemas relacionados con la degradación (Kassas, 1995; D'Odorico *et al.*, 2013).

En zonas secas, Salvati y Bajocco (2011), atribuyen a la combinación de factores humanos y climáticos, la responsabilidad del aumento de la desertificación, al provocar el desequilibrio entre la demanda y el suministro de los servicios de los ecosistemas presentes en estas áreas.

Para MEA (2005), las fuerzas que dirigen la sobreexplotación incluyen: el aumento de la población, las necesidades humanas y procesos sociopolíticos, económicos y de desarrollo nacional. Factores que orientan el cambio de la economía de subsistencia a la comercial, la expansión de la producción de cultivos comerciales y el aumento de los conflictos por el uso de la tierra y el agua.

1.3.2 Consecuencias

Entre las consecuencias de la desertificación se pueden citar, pérdidas económicas, degradación ambiental, inestabilidad política y desigualdad social, razón por la cual determinar sus causas es el objetivo de muchas investigaciones y disciplinas. Para Zucca *et al.*, (2009), los principales problemas a nivel mundial, causados por la desertificación son la pérdida de la productividad biológica y económica, y la pérdida de complejidad en el paisaje, refiriéndose a la diversidad en las tierras de cultivos de secano, regadío, pasturas y bosques.

Las manifestaciones de la desertificación varían dependiendo del uso de la tierra, y son afectadas por las interrelaciones entre el clima, el suelo, el tipo de cobertura vegetal y los patrones de producción y manejo del suelo (Zhao *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2007; Allington y Valone, 2010; Martínez-Sánchez *et al.*, 2011).

Para MEA (2005), la desertificación no es un problema aislado, sino que está plenamente relacionado con el cambio climático, la conservación de la biodiversidad y la necesidad del manejo sustentable de los recursos naturales, pues esta problemática es un síntoma de la ruptura del equilibrio entre el sistema de recursos naturales y el sistema socioeconómico que los explota. También, considera que los impactos sociales y políticos de este proceso

se extienden fuera de las tierras secas, las sequías y la pérdida de productividad de la tierra, son factores predominantes en la migración de poblaciones ya que la competencia por los escasos recursos naturales, generan conflictos sociales, étnicos, políticos internos y transfronterizos.

D'Odorico *et al.*, (2013), al analizar el impacto social de la desertificación, menciona la migración ambiental como un problema mayor respecto a la ocasionada por conflictos sociopolíticos y resalta la figura de los refugiados ambientales, por causa de la degradación de las tierras y el cambio climático.

Autores como Alfaro (2005) y Morales (2005), consideran entre los numerosos efectos socioeconómicos y ambientales de la desertificación, la pobreza, la ruptura de las estructuras sociales y familiares, la inestabilidad económica, la migración, la extinción de flora y fauna, el calentamiento global, la reducción de las precipitaciones y los caudales, las sequías y las inundaciones. Parada (2005), considera que la pobreza y la desertificación se presentan como “círculo dilemático”, sin solución pronta, requiriendo en muchas áreas atención urgente debido a sus enormes costos sociales.

1.4 Contexto geográfico de la desertificación

En la década de los setenta, la atención a la desertificación, se dirigió a la región de Sahel en África, afectada por una fuerte sequía, cuatro décadas más tarde, más de cien países del mundo, reconocen el problema. Hoy se estima que alrededor de 3,600 millones de hectáreas (70%, de las tierras secas del mundo, excluyendo los desiertos hiperáridos), muestran evidencias del proceso, que se constituye en una amenaza para el bienestar y supervivencia de 1000 millones de personas, una sexta parte de la población mundial, (Kosmas *et al.* (2000); Reynolds *et al.*, (2007)).

Sin embargo, Barbero-Sierra *et al.*, (2013) consideran que los datos de las áreas afectadas por desertificación, no son claros y que con un nivel de incertidumbre medio las estimaciones podrían oscilar entre el 10 al 25% de las zonas secas del mundo. Entre tanto, D'Odorico *et al.*, (2013), afirman que las estimaciones de las áreas afectadas por la

desertificación muestran grandes variaciones que dependen de las definiciones y metodologías utilizadas en la evaluación de la degradación de la tierra.

A escala regional, Asia, África y América Latina, son las regiones con mayor número de áreas degradadas. En África, se estima que los procesos de desertificación ocupan el 46% de la superficie, y de estos el 55% corre un riesgo alto a muy alto de desertificación, que afecta a 485 millones de personas.

En Asia aproximadamente 988 millones de hectáreas de tierras secas tienen algún grado de desertificación, siendo Asia Central, la zona más perjudicada. La zona del Pacífico, incluida Australia, tiene alrededor de 104 millones de hectáreas degradadas esencialmente por deforestación; en tanto que para Europa se estima un 23% de degradación de tierras, principalmente por erosión; y en América Latina se encuentra el 20% del total de áreas degradadas del mundo. (PNUMA, 2002).

Para Méndez (2010), la desertificación amenaza el 75% de las tierras áridas y semiáridas de América Latina, donde resaltan México, Brasil, Argentina y Perú, éste último con la zona más hiperárida del mundo, y que se constituyen como los puntos rojos del avance de la desertificación en América Latina. A lo largo de la Cordillera de los Andes, es posible encontrar núcleos de tierras desertificadas en etapas avanzadas del proceso degradativo, tanto en zonas bajas como en elevaciones con más de 4.000 msnm (Quintero, 2006).

En Colombia cerca del 17% del territorio muestra evidencias de desertificación y un 15% adicional, es susceptible al mismo. Cifras que condicionan y alertan al país acerca de su vulnerabilidad a la desertificación (IDEAM y MAVDT, 2003; IGAC *et. al.*, 2010). Se estima que el 78.9% de las zonas secas presentan algún nivel de degradación del suelo, derivado de procesos de erosión y salinización, un 48% de las tierras en el país, tienen algún nivel de erosión; el 74% es susceptible a la compactación y el 90% de las áreas secas tienen evidencias de salinidad (IGAC *et. al.*, 2010).

Las áreas del territorio colombiano con alta vulnerabilidad a desertificación son: la región Caribe, la región Andina (Valles interandinos de los departamentos del Tolima, Huila y Valle del Cauca, Altiplano Cundiboyacense y Nariñense, la zona del Alto Patía y el cañón del

Chicamocha) y la región de la Orinoquia bien drenada de los departamentos de Meta y Guaviare (MAVDT, 2005).

Los departamentos de Atlántico y Guajira poseen más de 75 % de la superficie con algún nivel de desertificación, Magdalena, Sucre y Córdoba tienen entre el 50 y 75 %. (IGAC *et al.*, 2010).

El Valle del Cauca, presenta problemas de desertificación que alcanzan una extensión del 24%, particularmente en los municipios de Andalucía, Bugalagrande, El Cerrito, Guacari, La Unión, Palmira, Roldanillo, Yotoco, Yumbo, San Pedro, Candelaria, Cartago, La Victoria, Obando y Zarzal, con procesos de erosión y salinización, que afectan entre el 50 al 96% de su territorio (MAVDT, 2005).

1.5 Indicadores de desertificación

Los indicadores de desertificación, han sido catalogados por la UNCCD, como herramientas útiles para caracterizar el grado de afectación de los procesos de degradación sobre los recursos naturales y las poblaciones. Zucca *et al.*, (2012), señalan, que para la UNCCD un "indicador" es un parámetro, o un valor derivado de parámetros, que indican, proporcionan información y describen el estado de un fenómeno, con un significado directamente asociado a un valor paramétrico dado.

En el contexto de desertificación, los indicadores son variables que pueden demostrar, que se presenta degradación de la tierra, tal como lo manifiestan autores como Kosmas *et al.*, (1999), Dunjón (2004) y Waswa *et al.*, (2013). Estas variables no necesariamente son aquellas que controlan la degradación actual, pues tales indicadores pueden identificar algún aspecto relacionado con el proceso potencial de degradación y pérdida de calidad de la tierra.

Para FAO (2003), los indicadores de degradación de la tierra, deben cumplir con las siguientes características: capacidad de integrar aspectos de temas complejos; amplia aceptación por parte de los interesados, para garantizar su uso efectivo y el uso de información precisa. Y añade, coincidiendo con Ferrara *et al.*, (2012), que los criterios más

importantes para la selección de tales indicadores son: relación causal con la degradación de la tierra, disponibilidad y sencillez de uso, posibilidad de actualización permanente, costos de evaluación y legibilidad para cubrir grandes áreas con una alta resolución espacial.

La dinámica metodológica internacional para la evaluación y el monitoreo de la desertificación, ha permitido que se designen indicadores globales, regionales y locales que involucran numerosas variables socioeconómicas y biofísicas (Zucca et al., 2012).

Para Dunjón (2004), los indicadores a escala nacional o global, son aquellos obtenidos a partir de datos ecológicos y económicos, tales como: porcentaje de tierras áridas y semiáridas, áreas y porcentaje de deforestación y reforestación, superficie cultivada y producción de alimentos per cápita, sistemas de producción, balance entre la producción y el consumo, o las migraciones entre otros; mientras los indicadores locales se derivan de los datos recopilados en zonas piloto seleccionadas como representativas de áreas mayores.

A nivel global la UNCCD, ha propuesto un set mínimo de once indicadores de desertificación, a partir de los cuales se deben esquematizar las metodologías de monitoreo para los niveles regional y local. Estos indicadores se han enfocado en dos áreas de interés para la UNCCD: el aumento de áreas con manejo sostenible y la reducción de la pobreza en áreas afectadas (Nachtergaele y Licota, 2009).

Ferrara *et al.*, (2012), proponen variables como cobertura vegetal, aridez del clima, precipitación y protección de la tierra como indicadores de desertificación, aplicables a escala global y regional. A nivel local, Lal (1994) y Nachtergaele y Licona (2009), en el tema de degradación de suelos, destacan la selección de indicadores de calidad del suelo.

Sobre estos últimos, autores como Andrews *et al.*, (2004), Zornoza *et al.*, (2007) y Cécillon *et al.*, (2009), manifiestan que para ser prácticos en el manejo, tales indicadores deben suministrar información relevante sobre las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos, y ser adecuados para valorar una situación específica de su funcionamiento, un servicio ecosistémico o una amenaza.

1.5.1 Clasificación de indicadores

En el enfoque más clásico, los indicadores de desertificación se clasifican en dos categorías socioeconómica y biofísica, las cuales se subdividen atendiendo a factores relacionados con el clima, el suelo, el agua, la vegetación y la biodiversidad. Son temas objeto de investigación ligados a desertificación, los expuestos por Verón *et al.*, 2006, Zheng *et al.*, 2006 (indicadores edáficos y climáticos); Helldén y Tottrup, (2008) (indicadores climáticos y de vegetación); y Zika y Erb, 2009 (indicadores socioeconómicos), entre otros.

Kosmas *et al.*, (1999), dividen los indicadores en cuatro categorías, que permiten delimitar Áreas Ambientalmente Sensibles a Desertificación (ESA, siglas en inglés): (a) calidad del suelo (textura, fragmentos de roca, profundidad del suelo, material parental, drenaje y pendiente), (b) Calidad del clima (lluvia, índice de aridez y aspecto), (c) calidad de la vegetación (riesgo al fuego, protección a la erosión, resistencia a la sequía y cobertura) y (d) calidad del manejo y factores humanos (tipo de uso de la tierra, uso intensivo del suelo y políticas).

Existen otros criterios que se utilizan en contextos institucionales, en los cuales los indicadores pueden ser clasificados de acuerdo con el sector económico e institucional de pertinencia, como agrícola, industrial y en políticas comerciales.

Al respecto, el proyecto *Land Degradation Assessment in Drylands* (LADA, siglas en inglés) ha generado un listado de indicadores biofísicos, socioeconómicos e institucionales, los cuales ha clasificado acorde con la escala de aplicación a nivel global, regional, local y en unidades productivas (LADA, 2003). De estos, los principales indicadores a nivel global utilizados por el proyecto LADA son: Productividad Primaria Neta (NPP, siglas en inglés), uso eficiente de la lluvia (RUE, siglas en inglés), índice de aridez y riesgo de erosión (Nachtergaele y Licota, 2009).

El proyecto DESERTLINKS generó un Sistema de Indicadores de Desertificación para la Europa Mediterránea (DIS4ME), el cual según Brandt *et al.*, (2003), ha cotejado una lista de aproximadamente 140 indicadores de desertificación, que han sido clasificados en (a) indicadores físicos y ecológicos (clima, agua, escorrentía, suelos, vegetación y fuego); (b)

indicadores económicos (agricultura, gestión del suelo, uso del suelo, cultivo, ganadería y empleo de agua, turismo y macro economía); (c) indicadores sociales y, (d) indicadores institucionales.

En Latinoamérica Abraham y Salomón (2006), han desarrollado listados de indicadores que son la base de los sistemas MONITOR y REDATAM. En estos sistemas, los indicadores han sido clasificados según factores físico-biológicos, socioeconómicos e institucionales y organizacionales. Para el soporte físico-biológico se tuvieron en cuenta los temas: clima, agua, suelo, vegetación, fauna y procesos físicos. En relación al sistema socioeconómico fueron considerados el uso de la tierra, aspectos sociales y económicos, organizaciones sociales, población, tenencia, administración de recursos, procesos antrópicos, degradación y control y manejo de recursos.

2. Capítulo 2. Modelo metodológico para el análisis del riesgo de desertificación

2.1 Introducción

El riesgo se define como la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas de vidas, personas, heridos, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental, resultado de interacciones entre los peligros de origen natural o humano, en un periodo de referencia (De-Lange, 2010).

La evaluación del riesgo en su forma más simple, acogida en esta investigación, proviene del análisis de la definición expuesta por Turner *et al.*, 2003; Adger, 2006 y De-Lange, *et al.*, (2010), quienes manifiestan que el riesgo es el resultado de relacionar la amenaza, la vulnerabilidad y los elementos bajo riesgo (sujeto), con el objetivo de determinar las consecuencias sociales, económicas y ambientales de un evento, las cuales resultan de cambios, en uno o más de estos parámetros, que modifican el riesgo en sí mismo; o sea, el total de pérdidas esperadas en un área dada por un evento particular.

Por tanto, para la evaluación del riesgo son fundamentales: (1) la evaluación de la amenaza o peligro, que representa la recurrencia estimada y la ubicación geográfica de eventos probables; (2) el análisis de la vulnerabilidad y (3) la cuantificación del riesgo (Cardona, 2003). En el contexto del cambio climático, aplicable a desertificación, la amenaza se refiere a un peligro latente o factor de riesgo externo climático o antrópico, de un sistema o de un sujeto expuesto, en tanto que, la vulnerabilidad, se considera como el grado en que un sistema es susceptible o incapaz de afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad y extremos climáticos así como acciones antrópicas que conllevan a la degradación (Antwi-Agyei *et al.*, 2011; IPCC, 2012).

En el mundo, son varios los programas e instituciones avalados por la UNCCD, que se han dedicado a desarrollar metodologías e indicadores globales y regionales para para la

evaluación del riesgo o monitoreo de la desertificación, las cuales incluyen, entre otros, la opinión de expertos, observación y medición directa, modelos matemáticos y ecuaciones paramétricas, teledetección y estimación de variables o indicadores relacionados con la degradación de la cobertura vegetal, el suelo, los recursos hídricos, la variación del clima y patrones de uso y manejo de la tierra (Collado *et al.*, 2002; Randriamiarina, 2009; Santini *et al.*, 2010; Xu *et al.* 2010; Salvati *et al.*, 2011; de Paul Obade & Lal, 2013; Alkharabsheh *et al.*, 2013; Waswa *et al.*, 2013).

La metodología ESA, propuesta por el proyecto “Desertificación y Uso del Suelo en el Mediterráneo” (MEDALUS) de la Unión Europea (Kosmas *et al.*, 1999), es reportada como referente y base de innumerables investigaciones y proyectos a nivel mundial, para la determinación de áreas con diferentes grados de desertificación. Consiste en una aproximación multifactorial de la calidad de variables climáticas, edáficas, coberturas y manejos del suelo mediante indicadores establecidos y aplicados por Basso *et al.*, 2000; Brandt *et al.*, 2003; Contador *et al.*, 2009; Bakr *et al.*, 2012, entre otros.

De manera similar, se destaca la metodología utilizada por el proyecto *Land Degradation Assessment in Drylands* (LADA) de la FAO, con la cual se ha logrado la valoración del funcionamiento de los sistemas en tierras secas y una aproximación al monitoreo de los procesos de desertificación. Según Nachtergaele y Licota (2009), el componente global de LADA, provee una línea base para la valoración de tendencias globales de degradación de tierras, usando un rango de indicadores colectados a partir del procesamiento de datos satelitales y bases de datos globales, que son interpretados sobre la base de un mapa global de sistemas de uso de la tierra.

Cada grupo metodológico dedicado a la evaluación y monitoreo de desertificación tiene características particulares en su estructura y en el tipo de herramientas utilizadas. Pero en general, la dinámica de estas metodologías permite la utilización de indicadores e índices globales, regionales y locales constituidos por variables socioeconómicas y biofísicas, acorde al planteamiento de la UNCCD. Así, los indicadores, son instrumentos idóneos para apoyar la evaluación del avance, determinar las causas y cuantificar los impactos de la desertificación, y para realizar el seguimiento de la eficacia de las acciones de mitigación emprendidas (Bouma e Imeson, 2000; Macagno *et al.*, 2005).

2.2 Modelo para el análisis del riesgo a desertificación (MARD).

El modelo metodológico para análisis del riesgo a desertificación aquí propuesto tiene como base el análisis y combinación de indicadores biofísicos y socioeconómicos de degradación de la tierra. Los cuales permiten la identificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo para la evaluación integral de la desertificación a nivel regional y local apoyándose en el procesamiento de la información mediante análisis espacial

2.2.1 Estructura general.

La estructura general del modelo propuesto para análisis integral del riesgo a desertificación, se fundamenta en los planteamientos expuestos por IPCC, 2001, McCarthy et al., 2001; Turner et al., 2003 y Adger, 2006 entre otros, que manifiestan que el riesgo es el resultado de relacionar la amenaza, la vulnerabilidad y los elementos bajo riesgo (sujeto o sistema). Matemáticamente, el riesgo puede ser representado por la función (Cardona, 2003 y De-Lange, 2010):

$$\text{Riesgo} = (\text{Amenaza} * \text{Vulnerabilidad})$$

Donde la amenaza y la vulnerabilidad se constituyen como los componentes principales del modelo, los cuales se encuentran representados por indicadores biofísicos y socioeconómicos de degradación que permiten el análisis integral del riesgo a desertificación (figura 2-1).

La selección e identificación de indicadores de amenaza y vulnerabilidad para el análisis del modelo propuesto, se hizo a partir de la categorización y clasificación de variables que permiten la descripción de estos componentes del riesgo, inmersas en el modelo Presión, Estado, Respuesta (PER) propuesto por LADA (2003) que se detallan en la Tabla 2-1.

Figura 2-1 Modelo metodológico para el análisis del riesgo a desertificación (MARD).

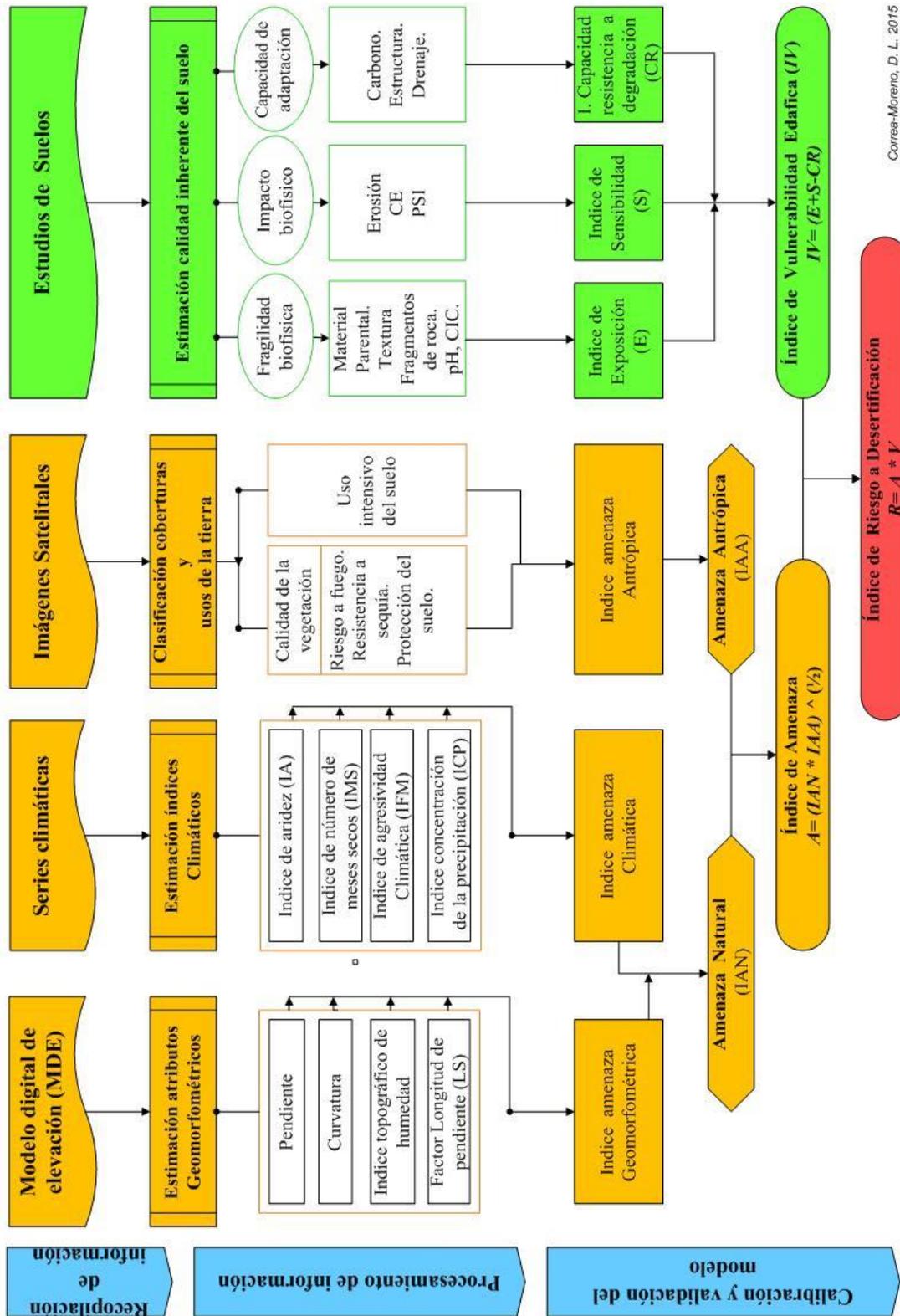


Tabla 2-1. Clasificación y relación de atributos seleccionados para estimación de índices de amenaza y vulnerabilidad edáfica en el MARD.

VARIABLE / INDICADOR	RELACIÓN A DESERTIFICACIÓN	INDICE / CLASIFICACIÓN PSR	FUENTE DE INFORMACIÓN
<p>Índice de Aridez (IA)</p> <p>Índice de número de meses secos (IMS)</p> <p>Índice de concentración de las precipitaciones (ICP)</p> <p>Índice de agresividad climática (IFM)</p>	<p>Déficit hídrico</p> <hr/> <p>Balance hídrico/ escorrentía</p> <hr/> <p>Escorrentía</p>	<p>Amenaza natural climática_AncI / Presión</p>	<p>Registros climáticos históricos.</p>
<p>Pendiente</p> <p>Curvatura</p> <p>Factor LS</p> <p>Índice topográfico de humedad (ITH)</p>	<p>Escorrentía / sedimentación</p> <hr/> <p>Acumulación y pérdida de humedad</p>	<p>Amenaza natural geomorfológica_Ang / Presión</p>	<p>Modelos digitales de elevación (MDE)</p>
<p>Calidad de la vegetación:</p> <p><i>Riesgo a fuego y capacidad de recuperación</i></p> <p><i>Resistencia a sequía</i></p> <p><i>Protección del suelo a erosión</i></p> <hr/> <p>Uso intensivo del suelo</p>	<p>Degradación biológica/ Física</p>	<p>Amenaza Antrópica_Aan / Presión</p>	<p>Imágenes satelitales. Datos existentes a diferentes escalas. Muestreos de campo.</p>
<p>Material Parental</p> <p>pH</p> <p>Capacidad de intercambio catiónico (CIC)</p> <p>Textura</p> <p>Fragmentos rocosos</p>	<p>Fertilidad del suelo</p> <hr/> <p>Fertilidad / Retención de humedad</p> <hr/> <p>Retención de humedad/ Protección a escorrentía</p>	<p>Vulnerabilidad Exposición_E / Estado</p>	
<p>Erosión</p> <p>Conductividad eléctrica (CE)</p> <p>Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)</p>	<p>Degradación Física</p> <hr/> <p>Degradación Química</p>	<p>Vulnerabilidad Sensibilidad_S / Estado</p>	<p>Datos existentes y levantamientos de suelos a diferentes escalas. Muestreos de campo.</p>
<p>Profundidad efectiva</p> <p>Drenaje</p> <p>Estructura</p> <p>Carbono (%)</p>	<p>Disponibilidad de agua y enraizamiento.</p> <p>Balance y almacenamiento de agua.</p> <p>Flujo de agua y aire.</p> <p>Almacenamiento de Carbono.</p>	<p>Vulnerabilidad Capacidad de resistencia a degradación_CR / Respuesta</p>	

- **Amenaza a desertificación.**

La amenaza a desertificación, primer componente del modelo para análisis del riesgo a desertificación está dada por el producto entre indicadores de presión asociados a las causas de degradación que pueden ser naturales o antrópicas, expuestos en la siguiente función:

$$A = (\text{Amenaza natural} * \text{Amenaza antrópica})^{1/2}$$

Los indicadores de amenaza natural utilizados en el modelo, 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; y como indicadores de amenaza antrópica, se consideran aquellos 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, entre otros (Tabla 2-1).

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 (Dascal, 2012).

Acorde al planteamiento del Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC) (Verbist, *et al.*, 2010), las tierras desertificadas serán más vulnerables si están afectadas por niveles más elevados de concentración e intensidad de las precipitaciones y si su balance hídrico anual o mensual es más deficitario o más prolongado en el tiempo.

Estos indicadores climáticos han sido propuestos y aplicados en la región por CAZALAC para elaborar el mapa de aridez de América Latina y el Caribe y en investigaciones a nivel regional (Lobo, 2004; García, 2007; Verbist, *et al.*, 2010; Cortez *et al.*, 2011). En los cuales se utiliza primero, indicadores que describen la deficiencia y disponibilidad climática de agua en un período específico de tiempo, como el índice de aridez (IA) definido por la UNEP (1997) y empleado por la UNCCD para la delimitación de zonas secas, y el índice de número de meses secos (IMS) que describe la longitud y la estacionalidad de los períodos secos y húmedos al cuantificar mensualmente la relación de déficit o exceso de lluvia respecto a la ETo.

Segundo, indicadores que describen la intensidad del régimen climático como el índice de concentración de las precipitaciones (ICP) y el Índice de Fournier modificado (IFM) o índice de agresividad climática, correlacionado con el factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para evaluación de procesos erosivos (Gabriels, *et al.*, 2006),

Los atributos geomorfométricos, se equiparan a indicadores del relieve que muestran tendencias de degradación y modelamiento hidrológico del paisaje, asociadas al movimiento de flujos que se manifiestan en escorrentía, erosión y pérdida de suelos y coberturas; y tendencias de agradación o ganancia dadas por sedimentación, deposición y acumulación de materiales orgánicos e inorgánicos y humedad en superficie (Tabla 2-2) (Moore *et al.*, 1991; Milevski *et al.*, 2007; Florinsky, 2008).

Las variables geomorfométricas son obtenidas a partir del modelo digital de elevación (MDE), y corresponden a indicadores utilizados para estimar escorrentía, erosión y sedimentación, pendiente, longitud de la pendiente, curvatura (horizontal y vertical) e indicadores para estimar la acumulación o pérdida de humedad en el suelo (índice topográfico de humedad), áreas susceptibles a salinización y patrones de distribución de la vegetación (Tabla 2-2).

Tabla 2-2. Descripción de atributos para estimación de los índices de amenaza climática y geomorfométrica del MARD.

Indicador o atributo climático	Relación a amenaza natural	Descripción del atributo
<p>Índice de Aridez (IA) (UNEP, 1997)</p> $IA = \frac{P_m}{E_{T_o}}$ <p>Donde: P_m = Precipitación media del periodo (mm) E_{to} = Evapotranspiración de referencia del periodo (mm)</p>		<p>Define lapsos de deficiencia y disponibilidad climática de agua en un periodo específico relacionando la precipitación y la evapotranspiración de referencia en el sistema considerado. Define 6 clases de aridez: Hiperárida, Árida, Semiárida, Subhúmeda seca, Subhúmeda húmeda y Húmeda (Verbist, <i>et al.</i>, 2010). UNESCO (1993) establece un rango del índice entre 0.05 y 0.75 para delimitar zonas secas.</p>
<p>Índice de Número de meses secos (IMS)</p> $LP_s = P < 0.5 E_{T_o}$ <p>Donde: LP_d = Longitud del periodo con déficit de agua (número de meses secos al año. 1 a 12 meses). E_{to} = Evapotranspiración de referencia del periodo.</p>	<p>Indicadores de Aridez / Déficit hídrico</p>	<p>Refleja la longitud y estacionalidad de los periodos secos y húmedos mediante la relación entre las precipitaciones y la evapotranspiración, medida mensualmente. La longitud del periodo seco corresponde al número de meses en el año que cumplen esta condición. Define 4 clases para el régimen hídrico: Árido: LDP < 75 días; Semi-árido: LDP entre 75 – 180 días; Sub-húmedo: LDP entre 180 – 270 días; y Húmedo: LDP > 270 días (Verbist, <i>et al.</i>, 2010).</p>
<p>Índice de concentración de las precipitaciones (ICP)</p> $ICP = 100 \frac{\sum P_i^2}{P^2}$ <p>Donde: P_i = Precipitación mensual (mm) P = Precipitación anual (mm)</p>	<p>Indicadores de la Variabilidad e Intensidad de Regímenes de Aridez / Balance hídrico/ Escorrentía</p>	<p>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, <i>et al.</i>, 2010).</p>
<p>Índice de Fournier modificado (IFM) o índice de agresividad climática</p> $IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$ <p>Donde: P_i = Precipitación mensual (mm) P = Precipitación anual (mm)</p>		<p>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 (Dascal, 2012).</p>
Indicador o atributo geomorfométrico	Relación a amenaza natural	Descripción del atributo
<p>Pendiente (e)</p>		<p>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).</p>
<p>Factor Longitud de la pendiente (LS)</p>	<p>Escorrentía / sedimentación</p>	<p>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 (Buitrago, 2011).</p>
<p>Curvatura (C)</p>		<p>Representa la relación entre el área de drenaje y la pendiente. Describe los sitios donde se presenta mayor acumulación de agua, zonas de saturación y la disposición a la dispersión de un flujo en forma de escorrentía en la zona de sedimentación. Controla las acumulaciones de flujo, la humedad del suelo, profundidad de la lámina de agua, evapotranspiración, profundidad del suelo, materia orgánica, contenido de limos y arenas y distribución de la cobertura vegetal (Leyva, 2012).</p>
<p>Índice Topográfico de Humedad (ITH)</p>	<p>Acumulación y pérdida de humedad</p>	

Los indicadores de amenaza antrópica se refieren al uso y manejo de la tierra y al cambio en las coberturas vegetales. El uso de la tierra hace referencia a la distribución espacial de los patrones de la vegetación natural y usos mayores de la tierra que se presentan en el territorio, y corresponden a la expresión integral de la interacción entre los factores bióticos y abióticos sobre un espacio determinado, como el resultado de la asociación espacio-temporal de elementos biológicos vegetales característicos y la utilización antrópica que se hace del medio biofísico, los cuales conforman unidades estructurales y funcionales (Marcial, 2001; IGAC, 2003).

El uso de la tierra en el modelo presión estado respuesta (PER), es calificado como indicador de presión, ya que a través de él es posible estimar la intensificación y la diversificación de los usos agrícolas de la tierra que pueden resultar en un aumento de la presión sobre la calidad de la misma (Rubiano, 2005). La vegetación y el uso de la tierra son factores relacionados con la intensidad y frecuencia de flujos superficiales y escorrentía que llevan a degradación física y biológica del suelo, considerados procesos dominantes en la desertificación (Dunjó, 2004).

Su inclusión en el modelo considera el porcentaje de cobertura vegetal, la calidad de la vegetación y el uso intensivo del suelo como indicadores de procesos de degradación física y biológica. Estos atributos son obtenidos de imágenes de coberturas de la tierra siguiendo metodología de la Coordinación de información ambiental de coberturas de la tierra (Siglas en inglés CORINE Land Cover - Coordination of information of the Environment), homologada para Colombia por el IDEAM (2010) y clasificada según Kosmas et al., (1999), en función de área de cobertura vegetal, el tipo de cobertura y uso intensivo del suelo.

La calidad de las coberturas vegetales, involucra aspectos relacionados con el tipo de material vegetal, la capacidad de la vegetación para su recuperación ante eventos de fuego y sequía y su contribución en la protección del suelo ante procesos erosivos (Kirkby y Kosmas, 1999; Dunjó 2004). Por tanto, los criterios para evaluación de la calidad de la vegetación incluidos en este modelo son riesgo a fuego y capacidad de recuperación, resistencia a sequía y protección del suelo a erosión.

El fuego es uno de los factores que influyen sobre la cobertura vegetal en las regiones con estaciones secas. Este afecta drásticamente ecosistemas donde existen especies con alto

contenido de resinas y aceites esenciales, altamente inflamables y combustibles, y sistemas agropecuarios que utilizan las quemadas inducidas para propiciar el rebrote de biomasa (Kosmas *et al.*, 1999).

La limitada capacidad de los ecosistemas para recuperarse y una frecuencia de incendios más allá de un cierto umbral de manera natural o inducida, puede conducir a una etapa de degradación. El intervalo de recurrencia entre las quemadas se vuelve tan corto que la vegetación y el suelo se deterioran, debido a su incapacidad para recobrar su condición inicial después y entre cada perturbación física (Barrow, 1994; Dunjón 2004).

Según Kosmas, *et al.*, (1999), existe una relación inversa entre la resistencia a la sequía de la vegetación y la protección del suelo a erosión. Por lo tanto la inclusión de estas variables en el modelo, se hace considerando que la principal respuesta de las plantas a la sequía o aumento de la aridez, es la reducción en el área foliar para disminuir la transpiración y por lo tanto menor cobertura vegetal, lo que aumenta la probabilidad de erosión del suelo cuando caen lluvias intensas después de periodos secos prolongados.

El uso intensivo del suelo obtenido a partir de la clasificación de coberturas vegetales (IDEAM, 2010), supone la utilización, frecuencia y tipo de prácticas (uso de variedades, mecanización, riego, uso de agroquímicos, quemadas, entre otras), asociadas al manejo de las coberturas vegetales dominantes, dependiendo de su naturaleza como zonas agrícolas, naturales o boscosas. Por lo tanto según clasificación de Kosmas *et al.*, (1999) en el modelo de análisis de riesgo de desertificación el uso intensivo se diferencia en categorías de bajo, medio y alto.

- **Vulnerabilidad edáfica a desertificación.**

El segundo componente del modelo para el análisis del riesgo a desertificación lo constituye la vulnerabilidad, la cual es considerada como la resultante de: (a) la exposición de un sistema a un factor estresante, (b) del efecto o la sensibilidad y (c) del potencial de recuperación de éste sistema (Turner *et al.*, 2003; Schröter *et al.*, 2005; Adger, 2006; De Lange *et al.*, 2009). En la metodología propuesta, el suelo se constituye como sistema de

análisis para evaluar la vulnerabilidad, descrita según Antwi-Agyei *et al.*, (2011) y Dascal (2012) por la siguiente función:

$$V = (E + S) - (CA)$$

Donde:

<i>V</i>	=	<i>Vulnerabilidad.</i>
<i>E</i>	=	<i>Exposición.</i>
<i>S</i>	=	<i>Sensibilidad.</i>
<i>CA</i>	=	<i>Capacidad de adaptación.</i>

La vulnerabilidad se compone de: (1) indicadores de estado, que representan el grado de exposición o fragilidad biofísica inherente del suelo frente a las amenazas, (2) indicadores de estado que reflejan, la sensibilidad del suelo o impacto exhibido por los procesos de degradación, y (3) indicadores de respuesta, que expresan características del suelo, que permiten la resistencia a degradación o la recuperación natural o inducida del sistema degradado (Tabla 2-3).

Los indicadores asociados al grado de exposición o fragilidad biofísica incluidos en el modelo, están ligados a características inherentes del suelo derivadas de su génesis tales como la geología o material parental y propiedades del suelo relacionadas a su calidad y fertilidad, como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la textura y la presencia de fragmentos rocosos. Estas características tienen gran relevancia en la disponibilidad y oferta de nutrientes para las plantas, la resistencia del suelo a la erosión, la regulación de los procesos hidrológicos, el movimiento del agua en el suelo (infiltración, escorrentía) y la capacidad de retención de humedad (Tabla 2-3).

En el caso del material parental la variedad de matrices litológicas conlleva a diferenciación en grados de erosión, tipo de vegetación y desertificación del suelo. Para (Kosmas *et al.*, 1999) áreas derivadas de calizas y materiales piroclásticos gruesos se caracterizan por suelos delgados, con alta erodabilidad, baja cobertura vegetal, lenta recuperación de la vegetación y alto riesgo de desertificación.

Tabla 2-3. Descripción de atributos para estimación de índices de vulnerabilidad edáfica del MARD (Exposición, Sensibilidad y Capacidad de resistencia a degradación).

Indicadores de Exposición (E) / Estado		
Indicador o atributo edáfico	Relación con vulnerabilidad	Descripción atributo
Material Parental		Confiere al suelo en su evolución rasgos característicos en su propiedades físicas (color, textura, profundidad, mineralogía), químicas (fertilidad potencial, aporte de nutrientes específicos o contaminantes) y biológicas (influye en la clase de vegetación, actividad biológica y tipo de humus) (Cortés y Malagón, 1984). Los diferentes materiales parentales asociados con rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas y en menor proporción con materiales orgánicos, presentan susceptibilidad a meteorización y fertilidad potencial diferencial de acuerdo a contenido de Silice y composición química (IGAC, 1995).
pH	Fertilidad del suelo	Indica Acidificación o alcalinización del suelo. Afecta la dinámica de los elementos aumentando o disminuyendo su solubilidad, mediante reacciones que se producen en el suelo en relación con elementos asociados con la fertilidad (Lal, 1994).
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)		Determina la retención de la mayoría de elementos requeridos para la nutrición vegetal y constituye una gran parte de la capacidad reguladora del medio (propiedad de evitar cambios bruscos de pH o capacidad amortiguadora contra ellos) (Lal, 1994).
Textura	Fertilidad del suelo / Retención de humedad	Proporción de arena, limo y arcilla referida al triangulo textural dentro de un sistema de clasificación seleccionado. Influye sobre la disponibilidad y regulación de nutrientes y agua en el suelo (Cortés y Malagón, 1984).
Fragmentos rocosos	Retención de humedad/ Protección a escorrentía	Los fragmentos de roca tienen un efecto variable sobre la escorrentía y la erosión del suelo, la conservación de la humedad del suelo y la producción de biomasa, por lo que juega un papel importante en la protección de la tierra especialmente en zonas secas (Lal, 1994).
Indicadores de Sensibilidad (S) / Estado		
Indicador o atributo edáfico	Relación con vulnerabilidad	Descripción atributo
Erosión (E)	Degradación Física	Pérdida de materiales de la superficie terrestre por acción del agua, hielo o viento. La susceptibilidad del suelo a esta se relaciona con el contenido de materiales orgánicos, textura y estructura. Los parámetros de evaluación incluyen pérdida del horizonte A, exposición de horizontes subyacentes y pérdida de suelo (Ton /Ha) (Cortés y Malagón, 1984).
Conductividad eléctrica (CE)	Degradación Química	Indican la acumulación de sales solubles (Cl, SO ₄ , Ca, Mg, Na, K) / Acumulación de iones de Sodio (Na) en el complejo de cambio (sodificación). Influyen en la dirección y magnitud de ciertos procesos como la infiltración, osmosis y difusión, iones intercambiables y la absorción y adsorción de nutrientes (Lal, 1994).
Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)		
Indicadores de Capacidad de resistencia a degradación (CR) / Respuesta		
Indicador o atributo edáfico	Relación con vulnerabilidad	Descripción atributo
Profundidad efectiva	Disponibilidad de agua / enraizamiento.	Estimativo de productividad y erosión potencial. Las características restrictivas del enraizamiento están asociadas a atributos físicos, químicos y nutricionales, como adensamiento, presencia de horizontes duros o capas con elementos tóxicos para las plantas (Lal, 1994).
Drenaje	Balance y almacenamiento de agua.	Característica hidrológica que condicionan la retención de humedad y propiedades de transmisión en el suelo. Influye en procesos de modificación del suelo como filtración, drenaje profundo, escorrentía y susceptibilidad a la desecación. Al interactuar con el clima y el uso de la tierra estos procesos conducen a anaerobiosis, aridización y eutrofización de aguas (Lal, 1994).
Estructura	Flujo de agua y aire.	Corresponde a la organización física de las partículas del suelo en unidades (peds, agregados) separadas por superficies de debilidad. Influye en procesos de degradación como compactación, adensamiento, sellamiento y encostramiento, infiltración y escorrentía. Estos procesos al interactuar con el clima pueden acentuar la degradación física que incluye erosión, desertificación y denudación (Lal, 1994).
Carbono (%)	Almacenamiento de Carbono.	Importante en la calidad del suelo por su efecto sobre la estructura, en la capacidad de almacenamiento de agua, en el flujo gaseoso, mineralización e incorporación de nutrientes y como amortiguador de fluctuaciones súbitas en las características del suelo (Lal, 1994).

Los fragmentos de roca también constituyen un importante factor en la protección del suelo, al presentar efecto variable sobre la escorrentía, erosión del suelo, conservación de humedad y producción de biomasa. En presencia de fragmentos de roca por encima del 20%, se encuentran limitados espacios entre rocas, disminuyendo la probabilidad de formación de surcos de infiltración y aumento de la escorrentía, limitando la pérdida de suelo (Kosmas *et al.*, 1999).

Aquellos indicadores ligados a la sensibilidad para el modelo, se asocian a indicadores de degradación como la erosión, salinización, acidificación, pérdida de nutrientes y disminución de materia orgánica del suelo. En el modelo propuesto, se incluyeron como variables erosión, conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable (Tabla 2-3).

Los indicadores usados para valorar la capacidad de adaptación o resistencia a degradación, están relacionados con la resiliencia del suelo o su capacidad para recuperar funciones tales como la capacidad de almacenamiento, retención y movimiento de agua, aireación, desarrollo de raíces y acumulación y disponibilidad de nutrientes y carbono en el suelo. Los indicadores seleccionados para este modelo corresponden a profundidad efectiva, drenaje, estructura y porcentaje de carbono (Tabla 2-3).

2.2.2 Procesamiento y obtención de datos para análisis del riesgo de desertificación

El modelo para análisis del riesgo de desertificación es expresado matemáticamente a partir del concepto de riesgo mediante el producto de los índices de amenaza y vulnerabilidad de la siguiente manera (IPCC, 2001; Turner *et al.*, 2003 y Adger, 2006):

$$R_{ij} = \left[(IAN_{ij} * IAA_{ij}) \right] * \left[(IEx_{ij} + IS_{ij}) - (ICR_{ij}) \right]$$

Dónde:

- R_{ij} = Índice de riesgo a desertificación.
- IAN_{ij} = Indicadores de Amenaza natural.
- IAA_{ij} = Indicadores de Amenaza antrópica.
- IEx_{ij} = Indicadores de Exposición.
- IS_{ij} = Indicadores de Sensibilidad.
- ICR_{ij} = Indicadores de Capacidad de resistencia a degradación.

Para lograr el producto de la amenaza por la vulnerabilidad se acudió al análisis y procesamiento espacial de la información y a la elaboración de cartografía digital.

Tal como se mencionó, en éste modelo el suelo actúa como sujeto de análisis y como parte integral del paisaje fisiográfico, lo que permite tomar las unidades cartográficas de suelos, como referente espacial y fuente de información de atributos externos e internos.

Las unidades cartográficas de suelos hacen referencia al conjunto de polígonos que tienen el mismo símbolo o el mismo color en el mapa de suelos, estas unidades son homogéneas (consociaciones) o heterogéneas (asociaciones, complejos y grupos no diferenciados). Cada unidad cartográfica en el mapa, tiene asociados los atributos de uno o más suelos seleccionados como modales, los cuales contienen a su vez la información alfanumérica de la cual se extraen los datos de las variables involucradas en el MARD.

Los atributos seleccionados que alimentan el modelo referido describen características internas y externas del suelo, tales como material parental, paisaje, tipo del relieve y forma del terreno, afloramientos rocosos o superficie cubierta por fragmentos de roca, tipo, clase y grado de erosión, profundidad efectiva, drenaje natural, nivel freático, cobertura actual o uso de la tierra, presencia de sales, sodio o las dos, propiedades químicas, físicas y mineralógicas.

Ya que las unidades cartográficas incluyen información climática, edáfica y sobre ellas es factible la superposición de variables socioeconómicas derivadas de la interpretación de sensores remotos, tales como la cobertura vegetal y el uso de la tierra, son los insumos con los cuales es posible alimentar el modelo, para definir y delimitar las Regiones de Análisis de Riesgo a Desertificación (RARD), sobre las cuales se apoyará el análisis de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la zona de estudio.

Las RARD, resultantes tendrán un grado de homogeneidad que permite trabajar territorios relativamente similares en términos de clima, geomorfología y suelos, considerados como factores condicionantes de la desertificación (Rubiano, 2005; Imeson, 2012).

Tabla 2-4. Clasificación y valoración de atributos climáticos y geomorfométricos para estimación de índices de amenaza natural del MARD.

INDICE DE AMENAZA NATURAL - CLIMA Y GEOMORFOMETRIA (AN)							
INDICE DE AMENAZA CLIMATICA (AN cl)							
Clases		Descripción	Valor	Clases		Descripción	Valor
Índice de Aridez (IA). Unesco 1993.			Índice de número de meses secos (IMS)				
1	Húmedas	> 1	1	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	0 - 4 (Prob. 25%)	1
2	Subhúmedas húmedas	0.75 - 1	1.3	2	Subhúmedo	5 - 6 (Prob. 50%)	1.6
3	Subhúmedas secas	0.50 - 0.75	1.8	3	Semiárido	7 - 8 (Prob. 67%)	1.8
4	Semiáridas; Áridas ; Hiperáridas	0.20 - 0.50; 0.03 - 0.20; < 0.03	2	4	Árido ; Xérico, hiperárido	9 - 10 ; > 11 (Prob. 86% ; 91%)	2
Índice de Concentración de las precipitaciones (ICP)			Índice de agresividad climática (IFM)				
1	Uniforme	8.3 - 10	1	1	Muy bajo	0 - 60	1
2	Altamente irregular ; Irregular	20 - 50 ; 50 - 100	1.3	2	Bajo	60 - 90	1.2
3	Moderadamente estacional	10 _ 15	1.6	3	Moderado	90 - 120	1.5
4	Estacional	15 - 20	2	4	Alto	120 - 160	1.8
				5	Muy alto	> 160	2
INDICE DE AMENAZA CLIMATICA (AN cl)							
			1	Baja	< 1.13		
			2	Media	1.13 - 1.45		
			3	Alta	> 1.45		
INDICE DE AMENAZA NATURAL - GEOMORFOMETRIA (AN g)							
Pendiente (e)			Curvatura (Horizontal / Vertical)				
1	Plana a ligeramente inclinada.	0 - 1 ; 1 - 3 ; 3 - 7	1	1	Concava / Concava ; Concava /Plana ; Plana / Concava ; Plana /Plana.	1	
2	Moderadamente inclinada.	7 - 12	1.2	2	Concava / Convexa ; Convexa / Concava	1.3	
3	Fuertemente inclinada.	12 – 25	1.6	3	Plana/Convexa ; Convexa / Plana	1.6	
4	Ligeramente, moderadamente o fuertemente escarpada.	25 - 50 ; 50 - 75 y > 75	2	4	Convexa / Convexa	2	
Factor Longitud de la pendiente (LS)			Índice Topográfico de Humedad (ITH)				
1	Bajo	0 - 20	1	1	Bajo	< 5	1
2	Medio	20.1 - 50	1.5	2	Medio	5.1 - 9	1.5
3	Alto	> 50	2	3	Alta	> 9	2
INDICE DE AMENAZA GEOMORFOMETRICA (ANg)							
			1	Baja	< 1.13		
			2	Media	1.13 - 1.45		
			3	Alta	> 1.45		
INDICE DE AMENAZA NATURAL CLIMA Y GEOMORFOMETRIA (AN)							
			1	Baja	< 1.13		
			2	Media	1.13 - 1.45		
			3	Alta	> 1.45		

Tabla 2-5. Clasificación y valoración de atributos de coberturas y uso de la tierra para la estimación de índices de amenaza antrópica del MARD.

INDICE DE AMENAZA ANTROPICA - COBERTURAS Y USO DE LA TIERRA (AAn)							
Clases		Descripción	Valor	Clases		Descripción	Valor
CALIDAD DE LA VEGETACION Riesgo a fuego y capacidad de recuperación				CALIDAD DE LA VEGETACION Protección a erosión			
1	Bajo	Cultivos permanentes arbustivos y arbóreos, cultivos agroforestales, cultivos confinados y áreas abiertas, sin o con poca vegetación.	1	1	Muy alta	Bosque denso, bosque abierto, bosque fragmentado, bosque de galería y ripario; Herbazal denso, arbustal denso.	1
2	Moderado	Mosaicos de cultivos; pastos y cultivos; cultivos, pastos y espacios naturales; cultivos y espacios naturales.	1.3	2	Alta	Herbazal abierto, arbustal abierto, vegetación secundaria o en transición.	1.3
3	Alto	Mosaico de pastos con espacios naturales, bosque denso, bosque abierto, bosque fragmentado, bosque de galería y ripario, plantación forestal. Herbazal denso y abierto, arbustal denso y abierto, vegetación secundaria o en transición.	1.6	3	Moderada	Plantación forestal. Cultivos permanentes arbustivos y arbóreos, cultivos agroforestales, cultivos confinados. Mosaicos de cultivos; pastos y cultivos; pastos con espacios naturales; cultivos, pastos y espacios naturales; cultivos y espacios naturales.	1.6
4	Muy Alto	Cultivos transitorios y permanentes herbáceos. Pastos.	2	4	Baja	Cultivos transitorios y permanentes herbáceos.	1.8
				5	Muy baja	Pastos y áreas abiertas, sin o con poca vegetación.	2
CALIDAD DE LA VEGETACION. Resistencia a sequía				USO INTENSIVO DEL SUELO (US)			
1	Alta	Cultivos agroforestales, bosque denso, bosque abierto, bosque fragmentado, bosque de galería y ripario, plantación forestal. Herbazal denso y abierto, arbustal denso y abierto, vegetación secundaria o en transición.	1	1	Bajo	Bosque denso, bosque abierto, bosque fragmentado, bosque de galería y ripario. Herbazal denso y abierto, arbustal denso y abierto, vegetación secundaria o en transición. Cultivos agroforestales. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación.	1
2	Moderada	Plantación forestal; Cultivos permanentes arbustivos y arbóreos, Mosaicos de cultivos; pastos y cultivos; pastos con espacios naturales; cultivos, pastos y espacios naturales; cultivos y espacios naturales.	1.6	2	Moderado	Plantación forestal; Mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales; pastos con espacios naturales; cultivos y espacios naturales.	1.3
3	Baja	Cultivos transitorios y permanentes herbáceos, cultivos confinados, pastos y áreas abiertas, sin o con poca vegetación.	2	3	Alto	Cultivos transitorios y cultivos permanentes herbáceos, arbustivos y arbóreos. Pastos. Mosaico de cultivos y mosaico de pastos y cultivos.	2
INDICE CALIDAD DE LA VEGETACION (CV)				INDICE DE AMENAZA ANTROPICA (AAn)			
1	Alta	< 1.13	1	Baja	< 1.13		
2	Media	1.13 - 1.44	2	Media	1.13 - 1.44		
3	Baja	> 1.45	3	Alta	> 1.45		

Tabla 2-6. Clasificación y valoración de atributos edáficos para la estimación de índices de vulnerabilidad del suelo del MARD.

INDICE VULNERABILIDAD DEL SUELO									
INDICE EXPOSICION - FRAGILIDAD BIOFISICA (E)									
Clases		Descripción		Valor	Clases		Descripción		Valor
Material Parental (Fertilidad potencial)					Textura (Retención de humedad)				
1	Buena	Básicas y Ultrabásicas (Sílice 45 - 52 % y Sílice < 45%): Gabro, basalto, diabasa, anfibolita, ecogilita, mármol, dolomita, caliza, peridotita, serpentina.		1	1	Buena	F, FAr, FA, FAr	1	
2	Moderada	Intermedias (Sílice 52 - 60%): Traquita, andesita, latita, diorita, toba de ceniza, pumita, toba de lapilli, aglomerados y brechas. Pizarra, cenizas, arenas, lapilli, arenas y cenizas volcánicas (piroclastos no consolidados). Monzonita, cantos y gravas, aluviones, coluviones, lodos, lahares, sedimentos.		1.7	2	Moderada	AAR, FL, FArL	1.2	
3	Pobre	Acidas (Sílice > 60%): Granito, cuarzo, monzonita, granodiorita, sienita, riolita, cuarzolita, cuarzdiorita, riocacita, dacita, esquistos. Conglomerado, brecha, tillita, cuarcita, neis, granulita, filita, arenisca. Limolita, lutita, shale, arcillolita, lodolita, marga.		2	3	Pobre	L, Ar, ArL	1.6	
4					4	Muy Pobre	A	2	
pH (Fertilidad)					CIC (meq/100g) (Fertilidad)				
1	Ligeramente ácido a neutro.	6.1 - 7.3		1	1	Muy alta	> 30.1	1	
2	Moderadamente ácido.	5.6 - 6.0		1.5	2	Alta	20.1 - 30	1.5	
3	Fuertemente ácido - ligeramente alcalino.	5.1 - 5.5 y 7.4 - 7.8		1.8	3	Media	10.1 - 20	1.8	
4	Muy fuertemente a extremadamente ácido - Moderadamente, fuertemente y muy fuertemente alcalino.	< 5.0 y > 7.9		2	4	Muy baja	< 10	2	
Fragmentos rocosos (%) (Retención de humedad)					EXPOSICION - FRAGILIDAD BIOFISICA				
1	Extremadamente abundante.	> 60		1	1	Baja	< 1.13		
2	Frecuente a abundante.	15.1 - 35 y 35.1 - 59		1.3	2	Media	1.13 - 1.44		
3	Ninguno a poco.	< 15		2	3	Alta	> 1.45		
INDICE SENSIBILIDAD - IMPACTO BIOFISICO (S)									
Erosión (ton / Ha)					Salinidad - CE (dS/m)				
1	Sin erosión	0		1	1	No salino	< 2	1	
2	Ligera	< 2.5		1.3	2	Muy ligera a ligera.	2.1 - 4	1.5	
3	Moderada	2.6 - 10		1.6	3	Moderada a fuerte.	4 - 8	1.8	
4	Severa a muy severa	> 11		2	4	Severa.	> 8	2	
PSI (%)					SENSIBILIDAD - IMPACTO BIOFISICO				
1	No sódico	0 - 7		1	1	Baja	< 1.13		
2	Ligeramente sódico	8 - 15		1.5	2	Media	1.13 - 1.44		
3	Sódico	> 15		2	3	Alta	> 1.45		
INDICE CAPACIDAD DE RESISTENCIA A DEGRADACION (CR)									
Profundidad efectiva (cm)					Estructura				
1	Profunda a muy profunda	> 101		1	1	Buena	Granular	1	
2	Moderadamente profunda	51 - 100		1.2	2	Moderada	Bloques	1.2	
3	Superficial	26 - 50		1.6	3	Pobre	Prismática y columnar	1.6	
4	Muy Superficial	< 25		2	4	Muy Pobre	Laminar, masiva, suelta.	2	
Drenaje					C %				
1	Bien drenado		1	1	1	Muy alto	> 4	1	
2	Moderadamente drenado - Moderadamente excesivo		1.2	2	2	Alto	2.5 - 4	1.5	
3	Pantanosos, muy pobre, pobre, imperfecto, excesivo.		2	3	3	Medio	1.5 - 2.5	1.8	
4				4	4	Bajo	< 1.5	2	
CAPACIDAD DE RESISTENCIA A DEGRADACION (CR)					INDICE VULNERABILIDAD DEL SUELO A DESERTIFICACION $V = (E + S - CR)$				
1	Baja		< 1.13	1	Baja		< 1.13		
2	Media		1.13 - 1.44	2	Media		1.13 - 1.44		
3	Alta		> 1.45	3	Alta		> 1.45		

Etapa 2. Agrupación de indicadores estandarizados y estimación de media geométrica:

Para la generación de índices de amenaza y vulnerabilidad, los indicadores estandarizados de cada unidad elemental en los diferentes índices son agrupados para la estimación de la media geométrica de sus componentes, dependiendo del caso de análisis, de la siguiente forma (Kosmas *et al.*, Basso *et al.*, 2000):

$$Indicador/ Índice (X)_{ij} = (Var/ Ind_{1_{ij}} * \dots * Var/ Ind_{n_{ij}})^{(1/n)}$$

Dónde:

- X = Indicador o Índice de atributos (Amenaza, vulnerabilidad etc.).
- Var/ Ind = Variables o indicadores de análisis.
- i, j = Valor de cada sitio. Representan las filas y columnas de una unidad elemental o pixel de cada capa.
- n = Número de variables o indicadores estimados.

Etapa 3. Generación de índices de amenaza y vulnerabilidad:

El índice de amenaza está dado por la combinación de los indicadores de amenaza natural, principalmente clima y geomorfometría y los indicadores de amenaza antrópica que describen el uso del suelo, el tipo de coberturas vegetales y su distribución entre otras (Tablas 2- 4 y 2- 5), expresado por la función:

$$A_{ij} = (IAN_{ij} * IAAn_{ij})^{(1/2)}$$

Los cuales son expresados de la siguiente forma para su estimación:

$$A_{ij} = \left[\left[(IANcl_{1_{ij}} * \dots * IANcl_{n_{ij}})^{(1/n)} * (IANg_{1_{ij}} * \dots * IANg_{n_{ij}})^{(1/n)} \right]^{(1/n)} * \left[(IAAn_{1_{ij}} * \dots * IAAn_{n_{ij}})^{(1/n)} \right]^{(1/2)} \right]$$

Dónde:

- A = Índice de amenaza.
- $IANcl_{ij}$ = Índice de Amenaza natural_ presión (climática).
- $IANg_{ij}$ = Índice de Amenaza natural_ presión (geomorfométrica).
- $IAAn_{ij}$ = Índice de Amenaza antrópica_ presión (coberturas vegetales).
- N = Número de variables o indicadores estimados.

El índice de vulnerabilidad, conformado por variables de calidad inherente del suelo clasificadas como indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta a degradación (Tabla 2-6), es expresado en la siguiente función:

$$V_{ij} = (IEx_{ij} + IS_{ij}) - (ICR_{ij})$$

Los cuales son expresados de la siguiente forma para su estimación:

$$IEx_{ij} = (IEx_{1ij} * \dots * IEx_{nij})^{(1/n)} + (IS_{1ij} * \dots * IS_{nij})^{(1/n)}$$

$$ICR_{ij} = (ICR_{1ij} * \dots * ICR_{nij})^{(1/n)}$$

Dónde:

V	=	<i>Índice de Vulnerabilidad.</i>
IEx_{ij}	=	<i>Índice de Exposición_estado.</i>
IS_{ij}	=	<i>Índice de Sensibilidad_estado.</i>
ICR_{ij}	=	<i>Índice de Capacidad de resistencia a degradación_respuesta</i>
n	=	<i>Número de variables, indicadores o índices estimados.</i>

Los índices de amenaza y vulnerabilidad obtenidos son procesados y espacializados para la elaboración de la cartografía descriptiva, apoyándose en el procesamiento de la información mediante análisis espacial y agrupación de regiones de análisis de riesgo a desertificación (RARD) con similar nivel de amenaza y vulnerabilidad del suelo de acuerdo a los siguientes niveles: Baja: <1.13 Media: 1.131 – 1.45 y Alta: > 1.451.

• **Generación del índice de riesgo a desertificación:**

Para la generación del índice de riesgo a desertificación la información de los índices de amenaza y vulnerabilidad de cada RARD es procesada para obtención del producto de estos acorde con lo expuesto por Cardona (2003) y De-Lange, (2010), apoyándose en el procesamiento de la información mediante análisis espacial y elaboración de cartografía.

A través de la diferenciación de escalas de riesgo, se logra como resultado la identificación de nodos con riesgo a desertificación, clasificados en tres categorías: Nodo 1 Riesgo bajo (< 1.5), Nodo 2 Riesgo moderado (1.501 – 2.5) y Nodo 3 Riesgo alto (> 2.5).

Estos nodos de riesgo constituyen el epicentro o punto focal de la aplicación del modelo a cada RARD y representan las manifestaciones de: (1) la presión ejercida por factores climáticos, topográficos y las actividades socioeconómicas, (2) la vulnerabilidad expresada como la fragilidad y capacidad de respuesta del suelo frente a la degradación, y (3) el estado de desertificación y avance de los procesos de degradación en el área evaluada.

3. Capítulo 3. Análisis Integral del Riesgo a Desertificación (AIRD)

3.1 Introducción.

La desertificación se explica por la combinación de múltiples factores sociales y biofísicos entre los que se consideran las actividades agrícolas, el incremento en los niveles de aridez, el aumento de infraestructura, y actividades extractivas (UNCCD, 1994; Geist y Lambin (2004); UNCCD, 2013; Salvati y Bajocco (2011)).

La diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo radica en que la amenaza se relaciona con la probabilidad de ocurrencia de un evento natural o provocado, y el riesgo se asocia a la posibilidad de manifestación de ciertas consecuencias, relacionadas con el grado de exposición de los elementos sometidos y por la susceptibilidad o vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento (Cardona, 2001; Turner *et al.*, 2003).

Para entender las causas de la desertificación como factor de amenaza es necesario considerar: (1) la dinámica natural y las variaciones de los componentes físicos y biológicos de ambientes áridos y semiáridos, su evolución en el tiempo, y su diversidad espacial; y (2) El uso histórico por parte de la población de los recursos naturales en una zona determinada, y el tipo de problemas ambientales que pueden provenir de diferentes formas de uso y manejo de la tierra (Adamo *et al.*, 2006).

El factor climático expresado en términos de la disminución de la precipitación, constituye la fuerza motriz que conduce a la desertificación a través del impacto indirecto de la variabilidad climática, que conlleva a cambios en el uso de la tierra o a su efecto directo sobre la cobertura vegetal, en forma de sequías prolongadas (Puigdefabregas y Mendizabal, 1998).

El déficit de humedad o aridez es el criterio climático más utilizado para la definición y delimitación de las tierras secas, producido cuando la evaporación potencial excede a las entradas de lluvia (($P/PET = 0.05 - 0.75$ (UNCCD, 1994)), a diferencia de las variaciones climáticas, en estos ecosistemas, que hacen referencia a la exacerbación del déficit por la presencia de precipitaciones bajas e irregulares, alta evapotranspiración y sequías cíclicas (WMO, 2005; Lobo, 2004).

La aridez se basa en indicadores que utilizan valores mensuales o anuales para calcular el déficit pluviométrico como el Índice de Aridez (IA) (UNEP (1997); Verbist, *et al.*, 2010) y el Régimen de Aridez calculado sobre la base de extensión del periodo seco (Numero de meses secos – NMS) (Sivakumar *et al.*, 2007); Indicadores climáticos como el índice de Fournier modificado (IFM) y el índice de concentración de las precipitaciones (ICP) se han utilizado a nivel regional como índices complementarios para la evaluación de la intensidad, agresividad y distribución de las lluvias, considerando que la intensidad de las pérdidas erosivas depende de la energía de la precipitación y de la duración de la temporada seca (Verbist, *et al.*, 2010).

La presión humana sobre la tierra y el suelo proviene principalmente del uso y las prácticas agrícolas inadecuadas y de las intervenciones en los ecosistemas naturales para extraer bienes y servicios de ellos (Geist y Lambin (2004), Amezcqueta, (2006), Wessels *et al.*, (2007), Oba *et al.*, (2008); Martínez-Sánchez *et al.*, (2011)).

En tanto que la vulnerabilidad, es definida como el grado de susceptibilidad a daños que un sistema o subsistema experimenta, causados por la exposición a estrés o a un factor estresante, los cuales pueden estar asociados con cambios ambientales y sociales y con la incapacidad de adaptación (Turner *et al.*, 2003; Newton y Weichselgartner, 2013). Esta es generalmente considerada como una función de: a) la exposición a un factor estresante, b) el efecto o la sensibilidad llamado también impacto potencial y c) el potencial de recuperación, denominado como la capacidad de recuperación o resiliencia y capacidad de adaptación (IPCC, 2001; Metzger y Schroter, 2006; De Lange *et al.*, 2010).

La exposición se define como la naturaleza y el grado de estrés ambiental o socioeconómico que un sistema puede experimentar. Las características de esta crisis incluyen su magnitud, frecuencia, duración y la extensión del área de peligro (Reed *et al.*,

2013). La sensibilidad refleja la respuesta positiva o negativa de un sistema a un estímulo; es definido en otros términos, como el grado de modificación o afectación que experimenta un sistema cuando es perturbado, y está determinado por las condiciones biofísicas o socioeconómicas inherentes del sistema (Antwi-Agyei *et al.*, 2011).

La capacidad de adaptación o resiliencia es la capacidad que tienen un sistema de evolucionar y recuperarse, en función de los riesgos ambientales o de los cambios en las políticas, reduciendo los daños potenciales, tomando ventaja de las circunstancias asociadas y ampliando el rango de variabilidad que puede soportar (IPCC, 2012).

Una aproximación para valorar la vulnerabilidad es la selección de un grupo representativo de indicadores y la estimación de índices o promedios de indicadores. Los factores edáficos asociados a desertificación, (indicadores de exposición) incorporan las propiedades más simples del suelo, para las cuales es factible diagnosticar su estado; en tanto que los indicadores de sensibilidad y adaptación, se refieren a la capacidad de funcionamiento, calidad del suelo (Lal, 1994).

En las últimas décadas, los estudios de desertificación han incorporado técnicas de teledetección, uso de imágenes de sensores remotos, modelos digitales de elevación (MDE), y SIG que agilizan los procesos de análisis y facilitan el seguimiento de la dinámica de cambio en el proceso de degradación de la tierra, por su alta sensibilidad en la detección de cambios multitemporales en las áreas afectadas (Adamo y Crews-Meyer, 2006; Perini, *et al.*, 2009; Salvati y Bajocco, 2011).

Los MDE hacen posible la caracterización del relieve, gracias a la extracción de parámetros cuantitativos tales como pendiente, aspecto, curvatura, índices topográficos y de convergencia y, longitud de la pendiente, todos ellos seleccionados como variables fundamentales para la valoración de los índices involucrados en la cuantificación de la amenaza natural.

Estos MDE pueden ser utilizados a diferentes escalas como fuentes de datos para construir indicadores de degradación de la tierra y de desertificación, en los cuales la influencia de la topografía es función del ambiente, puntualmente en áreas secas o húmedas, que

generan patrones útiles para la discriminación de vegetación y usos de la tierra, y en algunos casos, características externas del suelo (Moore *et al.*, 1991; Olaya, 2009; Imeson, 2012; Buitrago, 2011; Munar, 2010; y Leiva, 2012).

Estas técnicas admiten el monitoreo a largo plazo de tendencias de degradación mediante la comparación espacial de coberturas múltiples de la tierra en diferentes momentos para determinar cambios espaciales. En combinación con los SIG permiten por ejemplo, identificar las áreas de degradación actual y potencial de la tierra asociadas a unidades fisiográficas (Ibañez *et al.*, 2008; Salvati y Zitti, 2009; Santini *et al.*, 2010; Rasmy *et al.*, 2010).

El modelo metodológico propuesto en el capítulo dos fue utilizado para realizar el AIRD, se seleccionó como área de estudio la cuenca del río Amaine, ubicada en el municipio de Palmira, Valle del Cauca (Colombia). El AIRD, incluye: (1) la estimación de la amenaza a desertificación, a través del uso de indicadores climáticos, geomorfométricos y de coberturas y usos del suelo (2) 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 (3) la obtención del índice de riesgo a desertificación.

Este análisis responde al objetivo específico “evaluar indicadores biofísicos de riesgo de desertificación en zonas del Valle del Cauca”. Se efectuó a partir de información básica secundaria y primaria colectada para las unidades de análisis de riesgo a desertificación (RARD), mediante una aproximación multifactorial, con indicadores establecidos y el cálculo de índices climáticos, geomorfométricos y antrópicos. Los atributos evaluados fueron procesados para la generar la cartografía temática a escala 1:50.000. Se recurrió al análisis espacial asistido por un Sistemas de Información Geográfica (SIG).

3.2 Metodología.

3.2.1 Descripción del área de estudio.

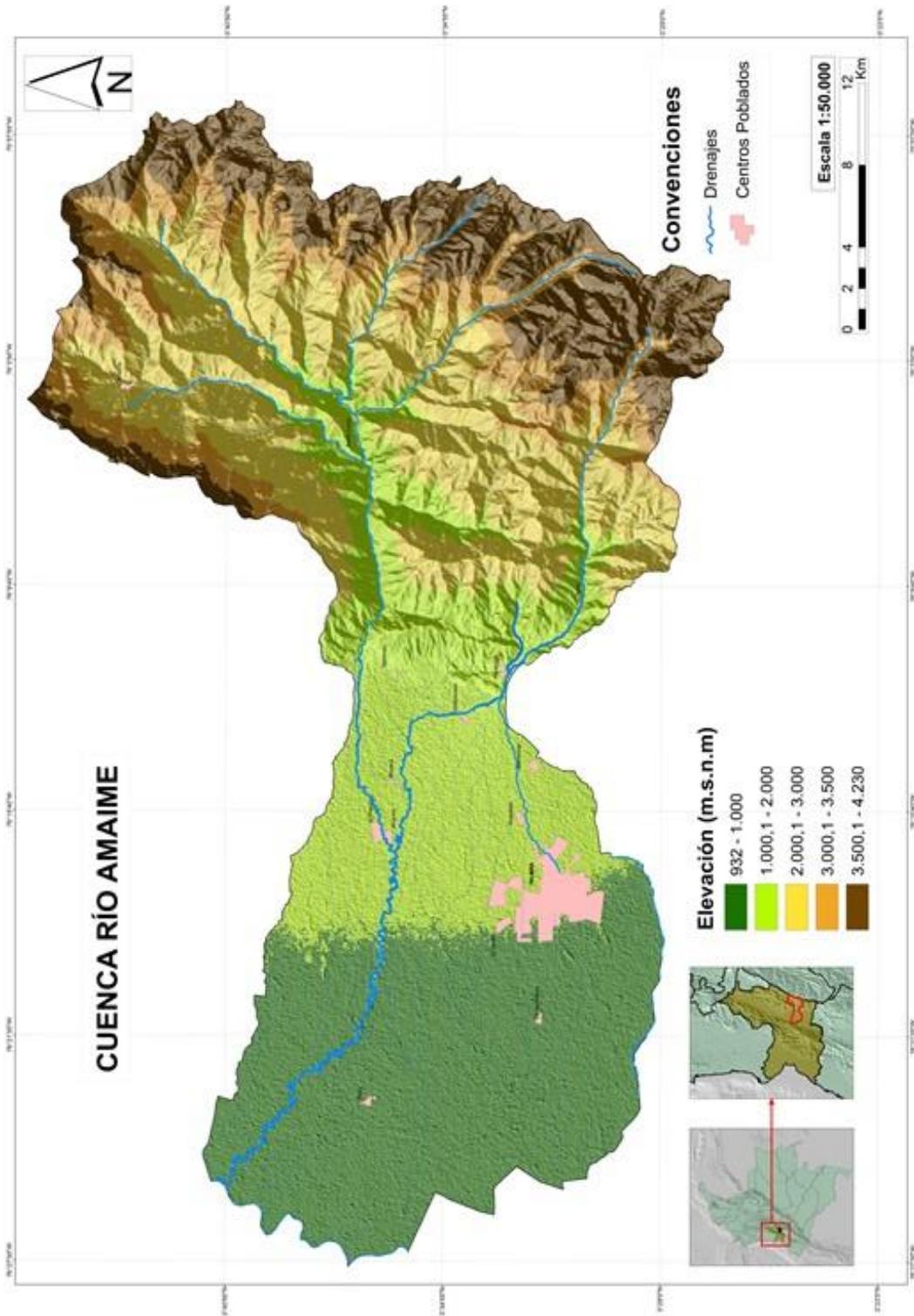
El área de estudio corresponde a la Cuenca del río Amaime, localizada en la vertiente occidental de la cordillera central de los andes de Colombia, más exactamente entre en el Municipio de Palmira y parte del municipio de Cerrito, departamento del Valle del Cauca, entre las coordenadas geográficas 3° 29' y los 3° 47' de latitud Norte y 75° 55' y los 76° 12' de longitud Oeste. (Figura 3-1).

El río Amaime nace en la Laguna La Negra, en el Páramo de La Estrella a una altura aproximada de 4.100 msnm y desemboca sobre la margen derecha del río Cauca. Sus afluentes principales son las quebradas, Cucuana, Teatino, La Tigra La Italia, Fuentelapeña, Corazón, La Honda, Platanillo y Naranjales y los ríos Cabuyal, Nima, Toche y Coronado (CVC, 2007; UNIVALLE, 2006).

El área total de la cuenca del río Amaime es de 104.342,02 ha, divididas entre una zona plana con 43.589,2 ha y una zona de ladera con 60.638,8 ha. Los centros urbanos se concentran en la parte plana, la cual además, posee una buena infraestructura vial y de servicios, en contraste con la zona de ladera que tiene una baja concentración de población y un acceso a servicios e infraestructura deficientes (Figura 3-1).

El régimen de lluvias es bimodal, con dos temporadas lluviosas una entre marzo y mayo y la otra entre septiembre y noviembre, el mes con los valores más bajos de precipitación es julio. La precipitación oscila entre 900 a 2.200 mm/año, y los menores valores reportados de lluvia se ubican en el centro de la cuenca, en los planos aluviales del valle de los ríos Cauca y Amaime, en tanto que las mayores precipitaciones, se registran en la parte media y alta de la cuenca y varían entre los 1.400 mm y 2.200 mm al año. La temperatura promedio anual se asocia a los pisos altitudinales y varía entre 23 °C en la parte baja a 4 °C en zona de páramo (CVC, 1999).

Figura 3-1. Ubicación Cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).



Las zonas de vida dominantes en la cuenca son el Bosque seco tropical (bs_T) que ocupa el 20,8% y el bosque seco premontano (bs-PM) con 21.1% del área, tal como lo muestra la tabla 3-1. El bosque seco premontano, se ubica en la parte media de la cuenca del río Amaime, corresponde a un enclave subhúmedo de gran importancia, caracterizado por sus condiciones climáticas, suelos y vegetación de tipo xerofítico (CVC, 1999).

La geología y los materiales parentales de los suelos son diversos y asociados a procesos orogénicos antiguos que intervinieron en la formación de la cordillera central y a eventos más recientes que derivan en un mosaico de materiales tales como: depósitos sedimentarios del cuaternario acumulados a lo largo del valle del río Cauca, rocas mesozoicas de cretáceo – jurásico y rocas metamórficas. La cuenca está afectada por fallas geológicas como la falla Romeral, considerada la estructura geológica más importante del país, y que origina una amenaza alta por sismos en el territorio (Tabla 3-1).

Diversos materiales parentales dan lugar a diversas geoformas, son comunes en la cuenca formas del terreno y tipos de paisajes de origen aluvial, coluvial, estructural y erosional. Las formas del terreno se ubican en los dos tipos de relieve dominantes: llanura aluvial del río Cauca con (34,4%) y montañas fluvio-erosionales que ocupan el 40,8 % del total de la cuenca, ostentan un relieve ondulado a escarpado y con alturas que pueden llegar hasta el páramo (Tabla 3-1).

Los cambios de la topografía se aprecian a través de la distribución de pendientes. La zona de estudio tiene seis rangos de pendiente con topografías planas, ligeramente planas, ligeramente onduladas, onduladas, quebradas y escarpadas. Se diferencian claramente un área plana a ligeramente plana con pendiente 0 al 3% que ocupa aproximadamente la mitad de la cuenca (48,59%), con procesos activos de ganancias (alta deposición de sedimentos) de los ríos Nima, Amaime y Aguaclara y las zonas con pendientes mayores al 50%, en el 35.45 % del área, que corresponden a zonas de protección forestal de la cuenca y a zonas de paramos.

Tabla 3-1. Características biofísicas de la Cuenca del río Amaime.

Zonas de vida							
Clase	Bosque seco tropical	Bosque seco premontano	Bosque húmedo premontano	Bosque húmedo montano bajo	Bosque muy húmedo montano bajo	Bosque muy húmedo montano	Páramo pluvial subandino
	<i>bs_T</i>	<i>bs_PM</i>	<i>bh_PM</i>	<i>bh_MB</i>	<i>bmh_MB</i>	<i>bmh_M</i>	<i>pp_SA</i>
Área (Ha)	21640.1	22007.9	11345.4	12439.1	11328.5	20603.3	4861.5
%	20.8	21.1	10.9	11.9	10.8	19.8	4.6
Pendientes							
Clase	Plano a Ligeramente Plano	Ligeramente Plano a Ligeramente Ondulado	Ligeramente Ondulado a Ondulado	Ondulado a Fuertemente Ondulado	Fuertemente a Fuertemente Quebrado	Ondulado	Escarpado
	0 – 3	3 – 7	7 – 12	12 – 25	25 – 50		> 50
Área (Ha)	50648.3	1537.6	470.2	1725.8	12894.3		36949.7
%	48.6	1.5	0.5	1.7	12.4		35.5
Geomorfología							
Unidad de relieve	Planicie de desborde	Llanura aluvial	Planicie aluvial de Piedemonte	Relleno de valles aluviales	Relieve Montañoso fluvio erosional	Relieve montañoso de formas glaciales heredadas	
	<i>Qde</i>	<i>Qal</i>	<i>Pap</i>	<i>Rva</i>	<i>Mfe</i>	<i>Mg</i>	
Área (Ha)	1045.4	35872.8	9089.4	2554.8	42556.9	13166.2	
%	1	34.4	8.7	2.5	40.8	12.6	
Geología							
Formación Amaime	Stocks cuarzo-dioríticos	C. de Córdoba	Cuerpo intrusivo cubierto	C. Quebrada grande	Anfibolitas del rosario	Esquistos básicos de Bugalagrande	
<i>Jka</i>	<i>Ked</i>	<i>Kdi</i>	<i>Ki-Qca</i>	<i>Kq</i>	<i>Pzr</i>	<i>Pzb</i>	
Metagabroides de Bolo Azul	Complejo Cajamarca	Depósitos aluviales	Depósitos coluviales	Conos antiguos	Derrubios	Depósitos fluvio glaciares	
<i>Pzba</i>	<i>Pzc</i>	<i>Qal</i>	<i>Qc</i>	<i>Qca</i>	<i>Qd</i>	<i>Qg</i>	
Terrazas aluviales		Derrumbes		Formación Vilela			
<i>Qt</i>		<i>Qtd</i>		<i>Tpv</i>			
Unidades Taxonómicas de suelos							
Orden/Unidad	Andisol	Molisol	Misceláneo rocoso		Entisol	Vertisol	Inceptisol
Área (Ha)	28750	25920	18450		9190	8770	6340
%	27.6	24.9	17.7		8.8	8.4	6.1

Fuente: Modificado de UMMA y UNAL (2006).

Correa-Moreno, D. L., 2015

La relación suelo paisaje explica la ocurrencia de los órdenes de suelo dominantes en la zona de estudio. Los andisoles ocupan un (27.6%) se ubican generalmente en las zonas montañosas húmedas y en los páramos, son frecuentes los subgrupos Typic Hapludand y Typic Endoaquand, los molisoles se presentan en el (24.9 %) del área de la cuenca, y se localizan de preferencia en las posiciones planas de las zonas aluviales, son comunes los subgrupos Entic Hapludoll y Entic Haplustoll (Tabla 3-1).

En las formas del terreno aluviales de topografía plana a ligeramente plana también, es posible encontrar suelos vertisoles (Udic Haplustert, Udic Calciustert, Sodic Calciustert), en la confluencia del piedemonte con las posiciones de la planicie aluvial se encuentran suelos entisoles (Typic Ustifluvent), molisoles (Fluvaquentic Haplustoll, Vertic Haplustoll), alfisoles (Inceptic Hapludalf, Aquertic Hapludalf, Ultic Haplustalf, Vertic Haplustalf y Petrocalcic Natrustalf) y algunos inceptisoles (Typic Eutrudept, Vertic Haplustept), entre tanto, las laderas de las montañas albergan suelos de los órdenes Inceptisoles (Typic Dystrudept y Humic Dystrustept) y Entisoles (Lithic Udorthent).

Un alto porcentaje de suelos de las laderas tienen régimen de humedad údico, con algunos enclaves secos que se traducen en regímenes ústicos, condición que se extiende a las áreas planas de la cuenca ocupando la mayor extensión del área de estudio, en menor proporción se encuentran suelos con régimen de humedad acúico (IGAC, 2004).

Dentro de la Cuenca del río Amaime predominan las coberturas y usos del suelo, relacionadas con actividades agropecuarias como cultivos permanentes, en donde se destaca la caña de azúcar como principal cultivo en la zona plana y las pasturas dedicadas a la ganadería en zonas de piedemonte y montaña.

La cuenca del río Amaime está en el área de influencia del parque natural Páramo de las Hermosas, y ha sido calificada como zona estratégica y de interés ambiental debido a su enorme potencial para proporcionar servicios ambientales, biodiversidad y por su fragilidad ecosistémica.

3.2.2 Estimación de la Amenaza a desertificación.

La amenaza a desertificación se estimó mediante la generación de los índices de amenaza natural (*IAN*) y la amenaza antrópica (*IAAn*) como se describe en el capítulo 2. El índice de amenaza natural se obtuvo a partir de la media geométrica de los índices de amenaza climática (*IANcl*) (atributos climáticos) y amenaza geomorfométrica (*IANg*) (atributos topográficos); y la amenaza antrópica a partir de la estimación de atributos de calidad de la vegetación y uso intensivo del suelo (Tabla 2-2, capítulo 2).

Las funciones utilizadas para estimar los índices se expresan matemáticamente, así:

$$IAN_{clima} ij = (I. de aridez * I. Agresividad. de la lluvia * I. concentración de la prec. * I. número meses secos)^{(1/4)}$$

$$IAN_{geom.} ij = (Pendiente * Curvatura * Factor LS * I. topografic o de humedad)^{(1/4)}$$

$$IAAn ij = (Calidad de cobertura vegetal * Uso intensivo del suelo)^{(1/2)}$$

Los datos de indicadores y atributos utilizados para la generación de índices de amenaza se obtuvieron de información básica secundaria y primaria de características climáticas, geomorfométricas y de coberturas vegetales encontradas sobre las regiones de análisis de riesgo a desertificación (RARD), delimitadas para esta investigación.

La clasificación y valoración de los indicadores e índices, se basó en las tablas de atributos 2-4 y 2-5 del capítulo 2, generadas por esta investigación. Los índices obtenidos, fueron procesados y espacializados para elaboración de cartografía descriptiva a escala 1:50.000, mediante aplicación de modelo cartográfico en SIG para análisis espacial que permitió agrupar las RARD que presentaron un nivel de amenaza similar.

▪ **Procesamiento de datos para obtención de índices de amenaza:**

Para aplicar un modelo, es necesario seleccionar la información que satisfaga los requerimientos en términos de tipos de datos, calidad de los datos y escala de aplicación de tal forma que se pueda estimar el nivel de incertidumbre. El procedimiento empleado para el caso del modelo AIRD se describe de manera general, a continuación:

Análisis de series climáticas:

El análisis de series climáticas se enfocó principalmente sobre la variable precipitación, por considerarse factor de amenaza asociado a la disponibilidad hídrica e intensidad de eventos lluviosos que condicionan la degradación y la desertificación, y por la disponibilidad de datos diarios multianuales en las estaciones seleccionadas.

Se analizaron series de datos diarios de precipitación entre los años 1970 y 2010 de veintiocho (28) estaciones ubicadas en la cuenca y en zonas aledañas (Tabla 3-2). Las series de datos se depuraron y clasificaron de acuerdo a niveles de valores de datos faltantes. Series de valores perdidos fueron sometidas a generación de datos faltantes por medio de simulación con la herramienta Sue-Mulador ® (Chica *et al.*, 2014). Aquellas series con datos faltantes por encima de diez años no se consideraron para el análisis.

Con esta información se realizó (a) el análisis de la tendencia mensual y anual de las precipitaciones y distribución del régimen hídrico en la cuenca (estadística descriptiva y análisis de conglomerados), (b) el análisis temporal del déficit de precipitación y análisis del efecto de fuentes de variabilidad climática sobre la sequía y (c) se generaron los índices climáticos para poder estimar la amenaza climática en la cuenca.

El análisis temporal de déficit de precipitación se realizó mediante estimación del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) que describe la gravedad de la sequía, según la metodología de McKee *et al* (1993), cuantificando el déficit en múltiples escalas de tiempo y utilizando la distribución log-normal para transformar los datos de precipitación.

Para evaluar el impacto de El Niño oscilación del sur (ENOS) sobre la sequía, se utilizó una aproximación basada en la regresión lineal, donde la hipótesis nula, es que no hay ninguna relación entre ENOS y las variables de precipitación. Con el fin de caracterizar el estado de ENOS, se utilizó el Índice Oceánico del Niño (ONI) (NOAA, 2014), para puntualizar acontecimientos, El Niño (caliente) y La Niña (fríos), en donde los valores positivos (negativos) del índice están relacionados con el calentamiento (enfriamiento) del Pacífico Tropical, se parte del supuesto, que cuando hay más de cinco meses con valores mayores (menor) de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), se ha configurado un evento El Niño (La Niña).

Tabla 3-2. Estaciones utilizadas para el análisis de amenaza climática en la cuenca del río Amaimé en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).

Estación	Código	Localización	A.s.n.m.	Latitud	Longitud	Precipitación	ETP *	Grupo SPI
						Promedio anual (mm)		
Albania	2612810114	Palmira (IDEAM_CVC)	2050	3.53	76.15	1709.5	1060.3	1
Amberes	2612810107	Palmira (IDEAM_CVC)	2070	3.52	76.13	1752.5	1056.1	1
Auji	2612800104	El Cerrito (IDEAM_CVC)	1550	3.63	76.10	941.3	1171.8	1
Austria	2612810112	Palmira (IDEAM_CVC)	1750	3.60	76.10	2109.5	1125.9	1
Bellavista	2612800103	Palmira (IDEAM_CVC)	2875	3.63	76.00	1477.7	899	1
Caseteja	2612810118	Palmira (IDEAM_CVC)	3520	3.48	76.07	1383.9	790.2	3
El Diamante	2612810202	Palmira (IDEAM_CVC)	2100	3.50	76.15	1745	1049.8	1
La Betulia	2612810111	Palmira (IDEAM_CVC)	2600	3.53	76.12	1743	949.9	1
La Ceja	2612800106	El Cerrito (IDEAM_CVC)	3052	3.72	76.02	1247.3	867.8	1
La Montañita	2612810105	Palmira (IDEAM_CVC)	1750	3.55	76.18	1930.4	1125.9	1
La Selva	2612810116	Palmira (IDEAM_CVC)	3415	3.53	76.08	1567.1	807	2
La Sirena	2612810203	Palmira (IDEAM_CVC)	2605	3.52	76.12	1428.4	948.9	1
Las Mirilas	2612810110	Palmira (IDEAM_CVC)	2375	3.50	76.17	2109	993.6	1
Planta Nima	2612810122	Palmira (IDEAM_CVC)	1170	3.55	76.22	1576.7	1264.3	1
San Emigdio	2612810201	Palmira (IDEAM_CVC)	1272	3.55	76.20	1608.3	1238.8	1
San Nicolas	2612810108	Palmira (IDEAM_CVC)	2100	3.53	76.17	2006.6	1049.8	1
Promedio estaciones zonas Piedemonte y Montaña						1646.0	1024.9	
Aeropuerto	19	Ingenio Manuelita - Hacienda El Porvenir	990	3.51	76.38	869.3	1310.7	2
Amaimé	14	Ingenio Providencia - Hacienda Providencia - Suerte 24-B	1050	3.64	76.26	1014.1	1295	1
Arroyohondo	18	Ingenio Manuelita - Hacienda Arroyohondo - Suerte 37	960	3.53	76.50	756.2	1318.6	2
Candelaria	22	Ingenio Mayaguez - Hacienda Las Margaritas - Suerte 2A	1000	3.44	76.34	1012.2	1308.1	2
Corpoica	5	Palmira (IDEAM_CVC)	1001	3.52	76.32	1051.5	1307.8	1
Ginebra	13	Ingenio Providencia - Hacienda La Argelia - Suerte 363	990	3.69	76.27	923.8	1310.7	2
Guacari	12	Ingenio Pichichi - Hacienda La Armonia - Suerte 011	1020	3.78	76.33	871.4	1302.8	2
La Rita	17	Ingenio Central Tumaco - Hacienda La Rita - Suerte 13	960	3.57	76.28	1009.5	1318.6	2
Pradera	23	Ingenio Central Castilla - Hacienda Manantial - Suerte 030	1020	3.40	76.24	1007.4	1302.8	1
PTAR	21	PTAR Cali	960	3.45	76.50	699.7	1318.6	2
San Jose	20	Ingenio Manuelita - Hacienda San Jose - Suerte 10	1080	3.52	76.26	924.9	1287.3	1
San Marcos	15	Ingenio Manuelita - Hacienda La Argelia - Suerte 5	960	3.61	76.46	852.5	1318.6	2
Promedio estaciones zona Plana						930.6	1307.4	

Se analizaron los coeficientes de determinación (R^2), los intervalos de confianza para la pendiente y los *p-value* para determinar si el ENOS puede cambiar los valores de precipitación y la intensidad de la sequía. El efecto del cambio del clima se evaluó a través del test de Mann-Kendall, considerado una aproximación robusta, para la detección de tendencias en series de tiempo (Hamed, 2008; Peña *et al.*, 2011).

Para la estimación del índice de aridez (IA), el índice de número de meses secos (IMS), índice de agresividad de las lluvias (IFM), el índice de concentración de la precipitación (ICP) se siguió metodología descrita por Dascal (2012) y CAZALAC (2006). Luego se realizó la clasificación de subíndices climáticos y generación de índice de amenaza climática, según modelo metodológico descrito en el capítulo 2 de esta investigación (Tabla 2-4).

Debido a la insuficiente disponibilidad de datos la evapotranspiración de referencia (ET_o) utilizada para estimar los indicadores de déficit hídrico se obtuvo mediante relación con altitud aplicable para las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena (Colombia) y en altitudes entre los 170 y 3.700 m ($R^2 = 0,80$), según expresión (Jaramillo, 2006):

$$ET_o \text{ (mm. día}^{-1}\text{)} = 4,37 \exp^{(-0,0002 * \text{Altitud, metros})}$$

Obtención de atributos geomorfométricos:

Las variables geomorfométricas fueron obtenidas a partir del modelo digital de elevación (MDE) STRM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la cuenca del río Amaime con una resolución espacial de 30 m. A partir de este se calcularon los atributos del terreno: pendiente, curvatura (horizontal y vertical), el índice topográfico de humedad (ITH) y el factor longitud de la pendiente (LS).

El procesamiento de datos se realizó mediante los algoritmos del software SAGA 2.0.8 (*System for Automated Geoscientific Analyses; University of Gottingen, Germany*), para el cálculo de los parámetros geomorfométricos y modelamiento hidrológico. Los resultados

se traducen en capas continuas para determinar la variabilidad espacial de estas en el fenómeno a representar, con su posterior calificación acorde con la Tabla 2-4.

Generación de variables de cobertura vegetal:

La información utilizada para generación del índice antrópico se obtuvo a partir de la interpretación visual de imágenes satelitales RapidEye del año 2010 y Landsat 8 del año 2013, de las cuales se clasificaron y delimitaron las coberturas y los usos del suelo ajustadas a la metodología CORINE LAND COVER modificada por IDEAM (2010).

El mapa de cobertura vegetal y usos del suelo obtenido para la cuenca se reclasificó utilizando los criterios establecidos en función de los atributos calidad de la vegetación, que involucra (a) riesgo a fuego y capacidad de recuperación, (b) protección del suelo a erosión y (c) resistencia a sequía; y del uso intensivo del suelo, los cuales han sido previamente descritos (Tabla 2-5).

3.2.3 Estimación del índice de Vulnerabilidad edáfica a desertificación:

El índice de vulnerabilidad edáfica (*IV*) a desertificación se estimó mediante la generación de los subíndices de exposición (*IEx*), sensibilidad (*IS*) y capacidad de resistencia a degradación (*ICR*) como se describe en el capítulo 2. Estos subíndices se obtuvieron mediante cálculo de la media geométrica de indicadores de calidad del suelo clasificados según modelo metodológico propuesto por esta investigación (Tabla 3-2, capítulo 2).

Los datos alfanuméricos de atributos de calidad del suelo de las RARD equivalentes a las unidades cartográficas de suelos, se extrajeron de la información de las descripciones de sitio y de los horizontes de cincuenta (50) perfiles modales de las consociaciones, asociaciones, complejos y grupos no diferenciados, contenidos en los estudios a escala 1:100.000 y 1:50.000 realizados para la cuenca del río Amaime por (IGAC, 2004) (Tabla 3-3).

Tabla 3-3. Regiones de análisis de riesgo a desertificación (RARD) presentes en la cuenca del río Amaime para evaluación de vulnerabilidad edáfica a desertificación.

Región de análisis de riesgo a desertificación (RARD)									
Escala 1:100000					Escala 1:50000				
Símbolo	Unidad cartográfica	Unidad taxonómica	Perfil Modal	Area (%)	Símbolo	Unidad cartográfica	Unidad taxonómica	Perfil Modal	Area (%)
MGA	Inasociación	Typic Hapludand	C-100	100	(AR-NM)	Complejo	Vertic Haplustalf	VA10	50
MGB	Inasociación	Typic Hapludand	C-100	100	(AR-PR)	Complejo	Entic Haplustoll	V18	50
MLA	Asociación	Typic Hapludand	C-90	45	(AR-PR)	Complejo	Vertic Haplustalf	VA10	50
		Typic Hydrudand	C-87	15			Vertic Haplustept	V17	50
MLB	Asociación	Typic Eutrudept	C-91	30	(CE-NM)	Consociación	Entic Haplustoll	V51	50
		Typic Fulvudand	C-61	55			Entic Haplustoll	V18	50
MLC	Asociación	Humic Eutrudept	C-59	30	(ES-PR)	Complejo	Udic Haplustert	V23	50
		Typic Fulvudand	C-99	60			Vertic Haplustept	V17	50
MLD	Asociación	Typic Udorthent	C-103	40	(FL-GN)	Complejo	Entic Haplustoll	V31	50
		Typic Hapludand	C-105	60			Entic Haplustoll	V89	50
		Andic Dystrudept	C-106	40	(FL-GU)	Complejo	Entic Haplustoll	V31	50
MLE	Consociación	Typic Argiudoll	C-113	70			Fluvaquentic Haplustoll	V85	50
MILF	Asociación	Typic Hapludoll	C-96	50	(GL - PM)	Complejo	Udic Calcustert	V26	50
		Typic Endoaquand	C-95	20	(GL-PS)	Asociación	Vertic Haplustoll	V56	50
MLG	Asociación	Typic Fulvudand	C-111	30			Udic Calcustert	V26	50
		Inceptic Hapludalf	C-104	55			Petrocalcic Natrustalf	V29	50
MQD	Asociación	Entic Hapludoll	C-112	45	(MN - PL)	Complejo	Cumulic Haplustoll	V32	50
		Typic Dystrudept	C-121	60			Pachic Haplustoll	V65	50
MQH	Asociación	Lithic Udorthent	C-98	25	(MN - PM)	Asociación	Cumulic Haplustoll	V32	50
		Typic Eutrudept	C-31	60			Vertic Haplustoll	V56	50
MQI	Complejo	Typic Udifluent	C-115	35	(NM-PR)	Complejo	Entic Haplustoll	V18	50
		Entic Hapludoll	C-116	60			Vertic Haplustept	V17	50
MQJ	Complejo	Typic Udifluent	C-32	35	(PL - GU)	Complejo	Pachic Haplustoll	V65	50
		Aqueptic	PO-26	40			Fluvaquentic Haplustoll	V85	50
		Aeric Endoaqualf	PO-46	30	AM	Consociación	Typic Ustifluent	ES4	80
MRC	Asociación	Aqueptic	PO-34	30	AR	Consociación	Vertic Haplustalf	VA10	80
		Humic Dystrustept	C-28	45	CE	Consociación	Entic Haplustoll	V51	100
		Typic Haplustept	C-29	15	CL	Consociación	Fluvaquentic	V45	100
MVA	Asociación	Typic Dystrudept	D-3	65	CT	Consociación	Udic Haplustert	V62	100
		Typic Udorthent	D-4	30	ES	Consociación	Udic Haplustert	V23	80
PRA	Asociación	Typic Hapludand	C-109	20	FL	Consociación	Entic Haplustoll	V31	100
		Udic Haplustalf	C-108	35	GL	Consociación	Udic Calcustert	V26	85
		Humic Dystrustept	C-107	30	GN	Consociación	Entic Haplustoll	V89	100
					GU	Consociación	Fluvaquentic Haplustoll	V85	90

Correa-Moreno, D. L., 2015. Modificación de IGAC, 2004.

Los índices e indicadores seleccionados son expresados para su estimación así:

$$IE_{ij} = (Material_{ij} * Textura_{ij} * pH_{ij} * CIC_{ij} * Fragmentos_{ij})^{(1/5)}$$

$$IS_{ij} = (Erosión_{ij} * Salinidad_{ij} * PSI_{ij})^{(1/3)}$$

$$ICR_{ij} = (Profundidad_{ij} * Estructura_{ij} * Drenaje_{ij} * Carbono(\%)_{ij})^{(1/4)}$$

Para la clasificación y valoración de los indicadores e índices, se utilizó la tabla de atributos de vulnerabilidad (Tabla 2-6). Con los índices obtenidos, se elaboraron los mapas para incluirlos en el análisis espacial del modelo en las etapas subsiguientes.

3.2.4 Estimación del índice de riesgo a desertificación:

La estimación del riesgo a desertificación, se realizó mediante la determinación de factores que inciden en este fenómeno, generada previamente para los índices de amenaza y la vulnerabilidad. El índice de riesgo se obtiene del producto de capas continuas de amenaza y vulnerabilidad, mediante operaciones de álgebra de mapas, para la posterior reclasificación acorde con rangos y calificación establecidos para valoración del índice de riesgo a desertificación (Figura 1. Anexo A) (Capítulo 2):

Nodo 1: Riesgo bajo (< 1.5), **Nodo 2:** Riesgo moderado (1.501 – 2.5) y **Nodo 3:** Riesgo alto (> 2.5).

El índice de riesgo es expresado para su estimación así:

$$R_{ij} = [(IAN_{ij} * IAA_{ij})] * [(IE_{ij} + IS_{ij}) - (ICR_{ij})]$$

Dónde:

R_{ij}	=	Índice de riesgo a desertificación.
IAN_{ij}	=	Indicadores de Amenaza natural.
IAA_{ij}	=	Indicadores de Amenaza antrópica.
IE_{ij}	=	Indicadores de Exposición.
IS_{ij}	=	Indicadores de Sensibilidad.
ICR_{ij}	=	Indicadores de Capacidad de resistencia a degradación.

3.3 Resultados y discusión.

Teniendo como punto de partida el modelo metodológico basado en el análisis espacial de datos, se logró evaluar el riesgo a desertificación en la cuenca del río Amaime utilizando indicadores de amenaza y vulnerabilidad, que permitieron establecer los factores de presión, estado y respuesta que influyen en la degradación y desertificación en el área de estudio.

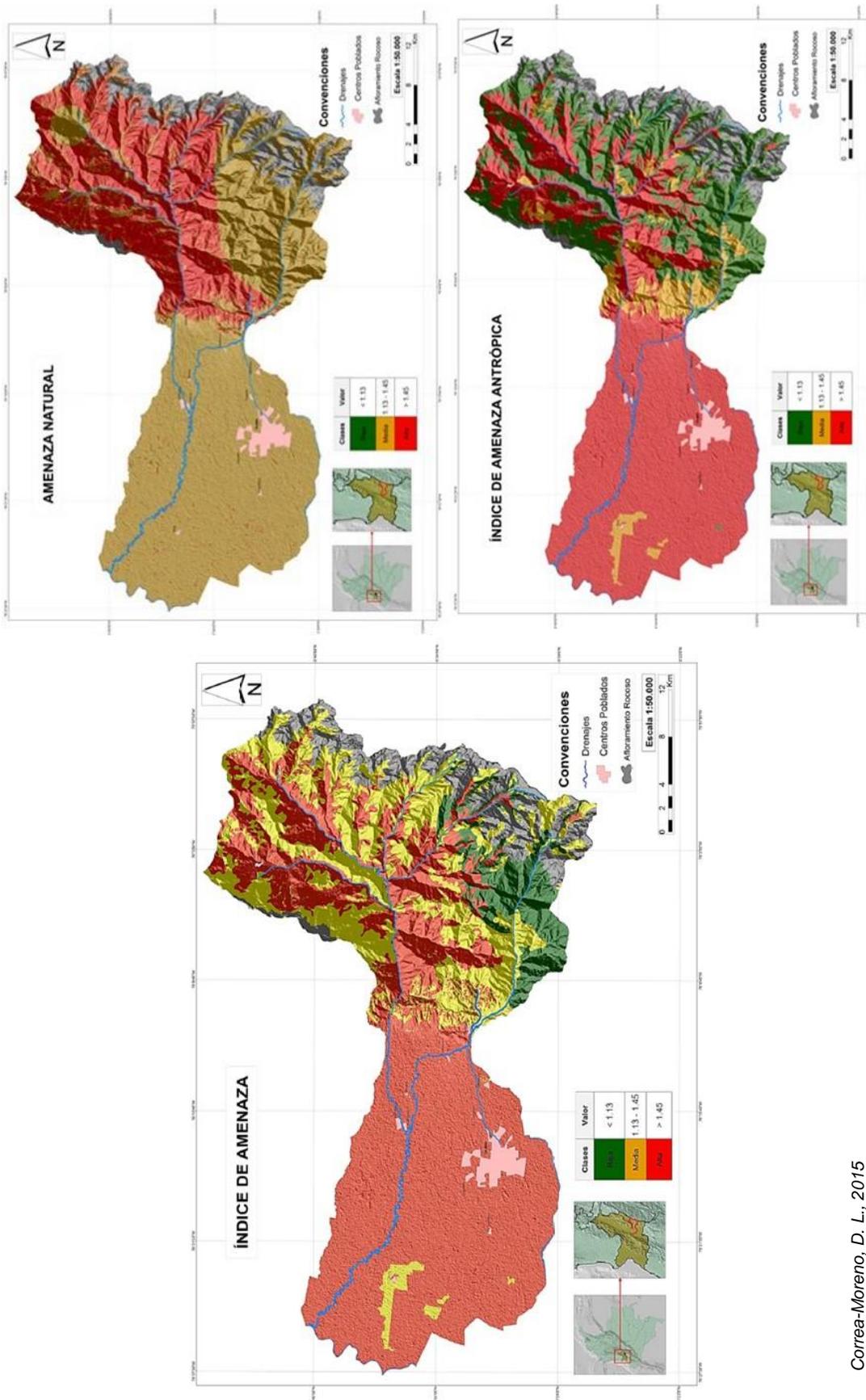
Los resultados y la discusión se exponen de manera sistemática respondiendo al paso a paso metodológico de aplicación del modelo de análisis de riesgo a desertificación (MARD).

3.3.1 Amenaza a desertificación.

Los resultados permitieron catalogar el área de estudio en general con una amenaza alta a desertificación (1.45), dada por la combinación de la amenaza natural y la amenaza antrópica evaluadas en la cuenca. Las zonas que registran la mayor probabilidad de amenaza se ubican en la zona plana y en el sector central de la zona montañosa, alcanzando valores del índice mayores a 1.45 y cubren 63.878 ha (61.2%); mientras que las zonas con amenaza media se distribuyen principalmente en el sector oriental de la cuenca sobre las laderas de montaña y el piedemonte en un área de 29807 ha (28.6%), alcanzando valores promedio del índice entre 1.13 a 1.44. Las áreas con amenaza baja a desertificación (<1.13) cubren 1.923 ha (1.8%), ubicadas sobre la zona con mayor humedad de la cuenca donde se registra principalmente cobertura vegetal de bosques naturales (Figura 3-2).

La estimación del índice de amenaza natural (AN) para la cuenca del río Amaime permitió situar el área en la categoría de zonas con amenaza media, al alcanzar en promedio un valor de 1.40 para el índice estimado; mientras la estimación del índice de amenaza antrópica (AA), cataloga la cuenca con una amenaza alta, alcanzando en promedio un valor de 1.51 (Figura 3-2).

Figura 3-2. Amenaza a desertificación en la cuenca del río Amaine en el departamento de Valle del Cauca (Colombia). Índices de amenaza natural y antrópica a desertificación.



- **Amenaza Natural a Desertificación: Climática y geomorfométrica.**

A partir de los indicadores climáticos y geomorfométricos evaluados en la cuenca, se pudo establecer que el 31.7 % de su territorio presenta zonas con amenaza natural a desertificación alta afectando aproximadamente 33.067 hectáreas, ubicadas principalmente en posiciones de montaña; mientras que el 45.6 % y el 25.6 % del total del área de la cuenca son clasificadas como zonas con amenaza media y baja a desertificación (Figura 3-3).

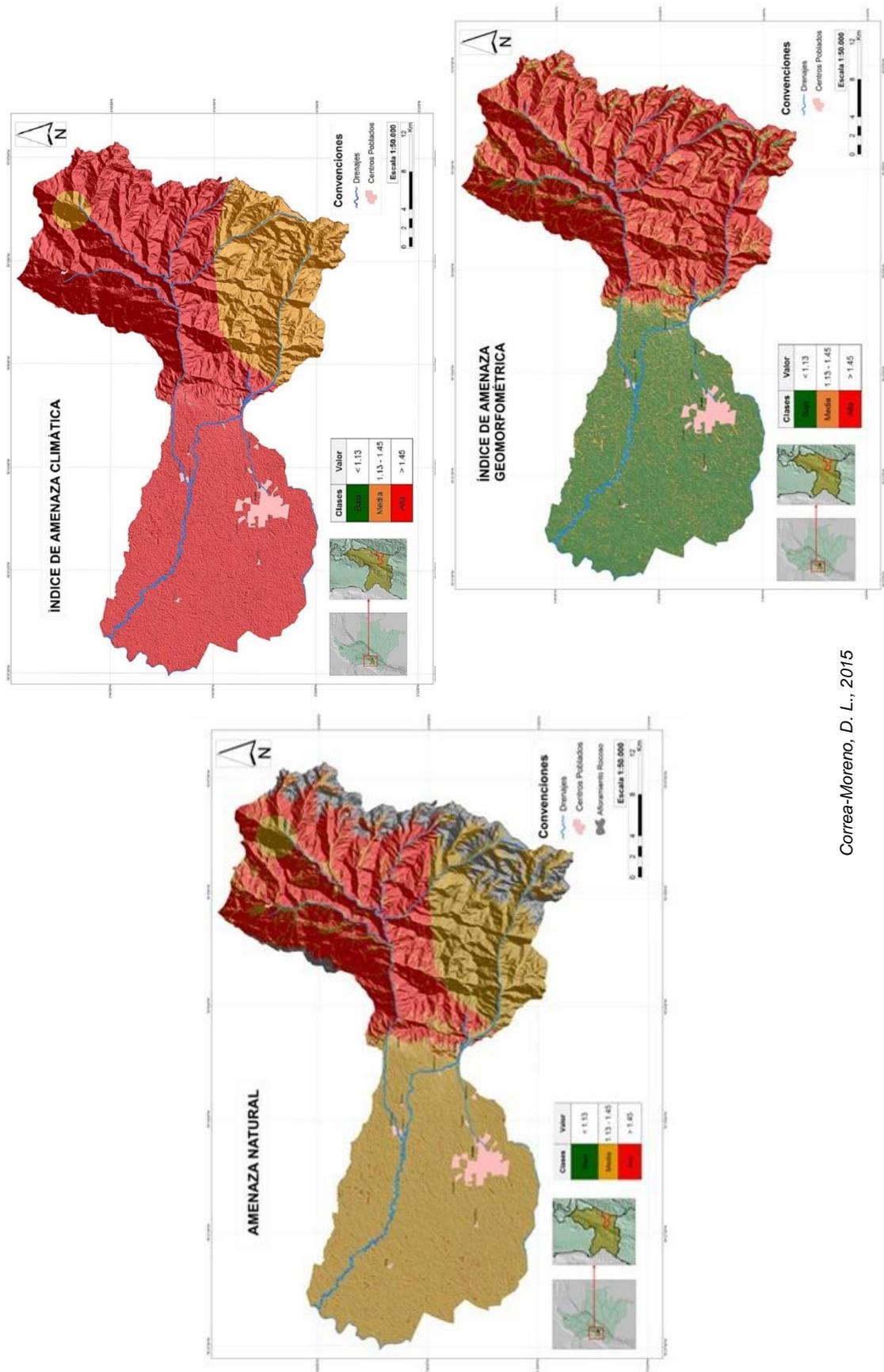
Amenaza natural climática a desertificación (ANcl):

El resultado de la evaluación de la amenaza natural climática ubica el área de estudio en general en la clase media, con un estado de presión que alcanza un valor para el índice de 1.40 (Figura 3-3). El índice permitió delimitar sectores de la cuenca con amenaza media ubicados sobre el suroriente de la cuenca en relieve montañoso y amenaza alta en toda la parte plana de la cuenca y sobre la parte central de la zona montañoso (Tabla 1. Anexo). Respuesta que es posible asociar al papel que desempeña la topografía en la dinámica climática de la región.

De esta forma en la clasificación de zonas con amenaza climática alta y media, se estableció que la cuenca del río Amaime presenta una precipitación anual promedio de 1.288,3 mm y una evapotranspiración de 1.166,1 mm. Comportamiento que varía en función de la precipitación acumulada anual, que condiciona el efecto del clima como amenaza sobre diferentes sectores de la cuenca, y permite diferenciar cinco grupos de estaciones con tendencias específicas de lluvia en cada sector, como se logró a partir del análisis de conglomerados realizados a las series de datos evaluadas (Figura 3-4).

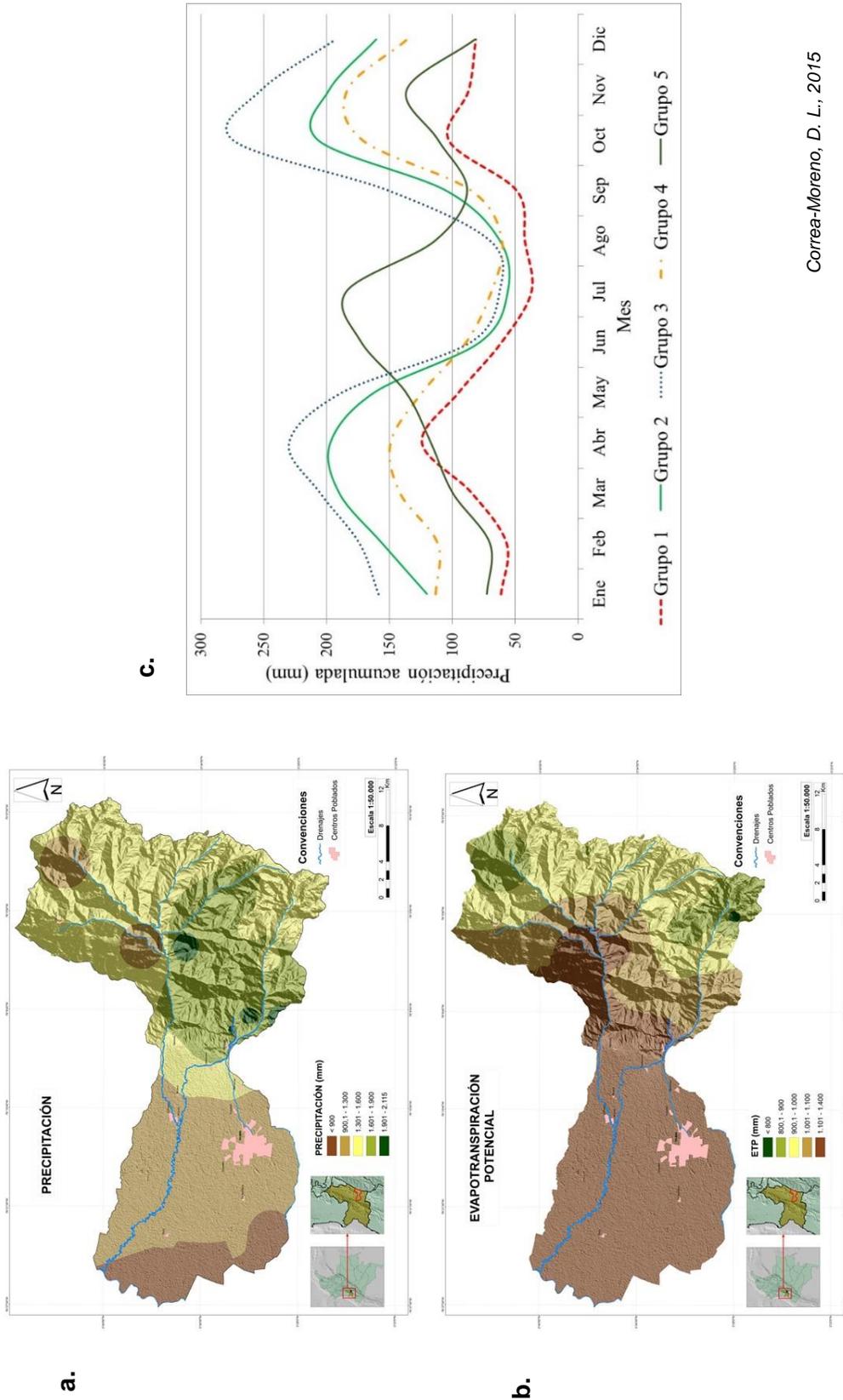
El primer grupo de estaciones se localiza en la zona plana de la cuenca y sobre el enclave subxerofítico en el sector de Aují, y presentan en promedio una precipitación acumulada anual de 918,0 mm y un ETo promedio de 1297,8 mm ; los grupos 2, 3, 4 y 5 se ubican en la zona montañoso y presentan en promedio valores de precipitación acumulada anual entre 1383,9 y 2038,9 mm; y de ETP entre 1103.2 a 790 mm promedio anual, valores extremos que corresponden a los grupos de estaciones 2 y 5 respectivamente (Figura 3-4).

Figura 3-3. Amenaza Natural a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). Tendencia de Indices de amenaza climática y geomorfológica.



Correa-Moreno, D. L., 2015

Figura 3-4. Distribución espacial y temporal de la precipitación y evapotranspiración en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). a. Precipitación promedio anual. b. Evapotranspiración promedio anual. c. Distribución mensual de la precipitación en grupos de estaciones.



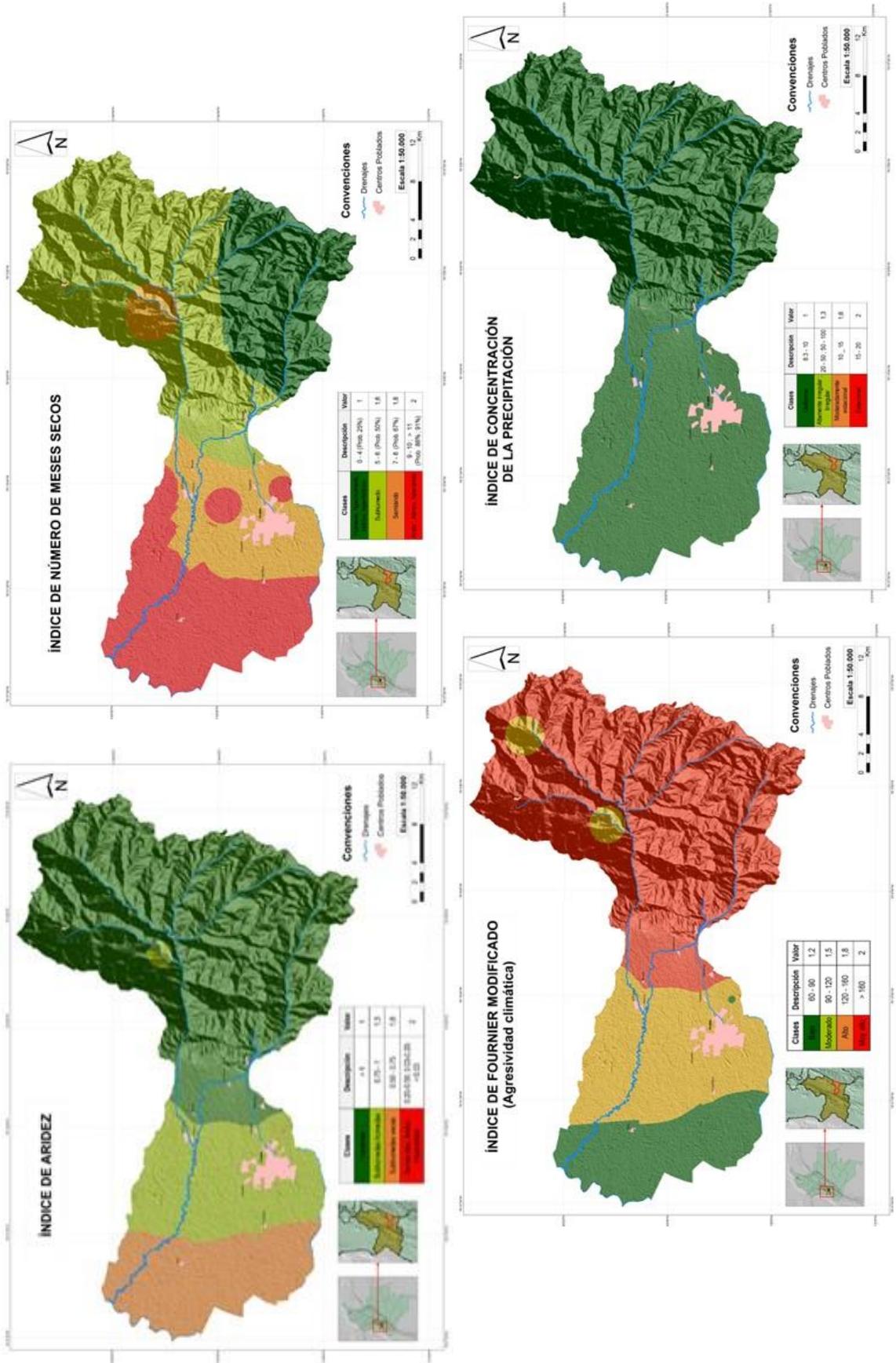
Con el análisis descriptivo de series climáticas de precipitación se corrobora la existencia en toda la cuenca de dos épocas secas en el año, las cuales ocurren entre los meses de enero y febrero y entre junio y septiembre. Estos periodos son influenciados por la dinámica natural de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), sistema de baja presión asociado con el arribo de los vientos alisios, que sucede entre marzo a mayo y octubre a diciembre, generando las temporadas lluviosas que definen el ciclo bimodal climático de esta región (Figura 3-4).

Climatológicamente la aridez en la cuenca del río Amaime, se explica por el Efecto Foehn que afecta el flanco oriental de la cordillera occidental y las tierras bajas de la parte oeste de la cordillera Central (Pabón, 2012). La variabilidad interanual o estacionalidad de la sequía está relacionada con la dinámica de la Zona de Confluencia Inter Tropical (ZCIT), el efecto de El Niño Oscilación del Sur y el cambio climático (Peña *et. al.*, 2001; León *et. al.*, 2000; Cortés y Barrios, 2012; IPCC, 2007).

Teniendo en cuenta el comportamiento de la precipitación y el análisis de los índices climáticos evaluados en la cuenca, se pudo establecer que las zonas con amenaza climática alta alcanzan un valor promedio para el índice de 1.54 y ocupan el 79% del área total, afectándose cerca de 82.502 ha. Estas zonas se localizan en la planicie aluvial y en las laderas del flanco occidental de la cordillera central, sobre las cuales se ubican principalmente las estaciones que pertenecen al grupo uno según promedio acumulado de lluvias (Figura 3-3).

En estas zonas el índice de aridez alcanza valores entre 0.57 a 0.81 y califican el área entre subhúmedas secas (condición dominante) a subhúmedas húmedas (Tabla 1. Anexo B). El índice de número de meses secos define los periodos de déficit hídrico de la zona, los cuales van desde 5 a 6 meses en promedio, con una probabilidad del 25% para condiciones semi húmedas, hasta 7 a 8 meses con probabilidad del 67% para clasificar los sectores semiáridos (Figura 3-5).

Figura 3-5. Tendencia de índices climáticos de desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).



El índice agresividad climática en la zona se clasificó entre bajo a moderado (71 – 104) para estaciones con un volumen anual de precipitación entre 699 y 1.051,5 mm, comportamiento típico de regiones semiáridas a subhúmedas secas. El índice de concentración de la precipitación alcanzó valores entre 9.1 a 9.9, resultados que concuerdan con los encontrados por Echeverry y Obando, (2010) indicando que la lluvia tiene una distribución uniforme durante el año que se puede asociar a la tendencia bimodal originada por el doble paso en el año de la ZCIT, a través de la región andina colombiana (Tabla 1. Anexo B, Figura 3-5).

En este mismo análisis las zonas con un nivel de amenaza climática media registran un índice promedio de 1.25. Alcanzan el 21 % del área (21.838 ha) y se concentran sobre las posiciones fisiográficas de piedemonte y montaña. Conforme al índice de aridez son calificadas como zonas húmedas, con valores que van desde 1.25 a 2.14 (Tabla 1. Anexo B. Figura 3-3).

Según el índice de número de meses secos en estas zonas existen periodos de déficit hídrico entre 0 a 2 meses en promedio. Con una probabilidad de ocurrencia del 25% para diferenciación de sitios con régimen hídrico húmedo a hiperhídrico asociados con una amenaza por acumulación y exceso de humedad como factor para la generación de escorrentía (Tabla 1. Anexo B, Figura 3-5).

Asociado a una mayor probabilidad de eventos de precipitación que favorecen procesos erosivos en posiciones de piedemonte y montaña, el índice de agresividad climática en la zona de estudio alcanzó un nivel alto a muy alto entre 116 y 209 en estaciones con un volumen anual entre 1247 y 2109 mm (Tabla 1. Anexo B, Figura 3-5). Este índice está asociado a la capacidad que tiene la precipitación de provocar erosión hídrica, debido al gran impacto que ejercen las partículas de agua sobre la estructura del suelo (CAZALAC, 2006).

Comportamiento que coincide con lo encontrado por García (2007), quien en análisis de estaciones de todo el país, manifiesta que existe una tendencia del índice entre alta a muy alta agresividad climática, como condición característica de las lluvias en el territorio nacional y principalmente en la zona andina.

Mientras el índice de concentración de la precipitación para la zona con amenaza media alcanzó valores entre 9.2 a 10.1, clasificado también en las categorías uniforme y moderadamente estacional, registrado este último para el caso en la estación San Nicolás al suroriente de la cuenca (Tabla 1. Anexo B, Figura 3-5).

En términos generales se estimó que en la cuenca del río Amaime, la amenaza climática a desertificación está dada principalmente por la disponibilidad, distribución e intensidad de las lluvias en el territorio. Este comportamiento expuesto mediante los diferentes indicadores evaluados, que coinciden con los grupos de estaciones según la precipitación acumulada y el índice estandarizado de precipitación (SPI), revela la existencia de áreas que agrupan tipos de comportamiento intra-anual de la precipitación relacionado con la ZCIT, que se manifiestan en una presión climática en diferentes puntos de la cuenca por déficit hídrico o exceso de lluvias (Figura 2. Anexo B).

En este sentido el índice de aridez (IA) basado en el análisis multianual de la precipitación permite la delimitación de zonas áridas a subhúmedas que tienen la condición de presentar déficit hídrico, pero los índices número de meses secos (IMS) y agresividad climática (IFM), permiten establecer la temporalidad del déficit asociado a la aridez o eventos de sequía, y la tendencia del impacto de las lluvias en zonas donde estas tienen mayor probabilidad de presentarse asociadas a procesos erosivos.

Relacionado a lo anterior el índice de meses secos en estas zonas permitió la reclasificación de estaciones catalogadas por el índice de aridez como subhúmedas secas y subhúmedas húmedas a semiáridas y subhúmedas, basándose en la probabilidad de presentarse periodos secos mayores a cinco meses en el año. Y la reclasificación de estaciones húmedas hasta hiperhúmedas en las cuales se presenta la probabilidad de registrarse pocos meses secos en el año (0 – 3).

Según Gabriels (2012), los límites de las tierras secas no se deben considerar estáticos ni inmodificables, debido a la alta variabilidad interanual del promedio de lluvias y la ocurrencia de sequía, la cual puede durar varios años. Acorde al planteamiento de García (2007) y Verbist *et al.*, (2010), quienes consideran el uso del Régimen de Aridez como criterio más próximo a la realidad para definir zonas áridas a diferencia del Índice de Aridez del PNUD.

El análisis de la información utilizando el SPI corrobora que en zonas con amenaza climática alta, existe una mayor probabilidad de sequía concentrada en dos épocas del año, entre los meses de enero a febrero y entre junio a septiembre, donde se presentan valores del índice negativos, asociados a déficit hídrico en la cuenca al menos en 6 meses del año, según comportamiento de estaciones del grupo 1 y 2 (Tabla 2. Anexo B).

Lo que permite inferir que el comportamiento de las estaciones del primer grupo representa una amenaza climática que contribuye a la desertificación, debido a la concentración y a la intensidad de las lluvias características en este grupo (Figura 2. Anexo B); mientras en las estaciones pertenecientes al grupo dos, cuando se presenta El Niño se tienen épocas secas más acentuadas, dadas por los valores del SPI en los meses secos, que disminuyen aún más asociados con eventos de sequía, condición que no se expresa como un descenso de la precipitación durante las épocas lluviosas, pero tiene la probabilidad de extenderse en un periodo mayor a través del año (Tabla 3, Figura 3. Anexo B).

Amenaza natural Geomorfométrica a desertificación (ANg):

El análisis de los indicadores geomorfométricos permitió establecer que para la cuenca del río Amaime existe una amenaza natural condicionada a la expresión de los atributos topográficos en las diferentes unidades de relieve. El área de estudio en general se ubica en la categoría de amenaza media, con un valor para el índice estimado entre 1.13 – 1.45. En la parte montañosa se registra una amenaza geomorfométrica alta (>1.45) a diferencia de la zona plana donde la amenaza geomorfométrica es baja (< 1.13) (Figura 3-3). Es posible asociar esta respuesta al efecto de formas del relieve con niveles de pendiente contrastantes.

Las zonas con amenaza geomorfométrica alta ocupan el 44.8% del área y afectan cerca de 46.797 ha, que se localizan principalmente en el sector oriental de la cuenca, y comprenden las posiciones de piedemonte y de montaña. Las zonas con un nivel de amenaza geomorfométrica media alcanzan el 18.1% (18.899 ha) y se concentran en las colinas y vallecitos intermedios encontrados entre los sectores de montaña y piedemonte (Figura 3-3).

El 36.8 % de la cuenca (38.457 ha) tiene un nivel de amenaza bajo, y corresponden a sectores situados al occidente en la parte plana y al oriente en menor área entre los vallecitos de la zona quebrada (Figura 3-3).

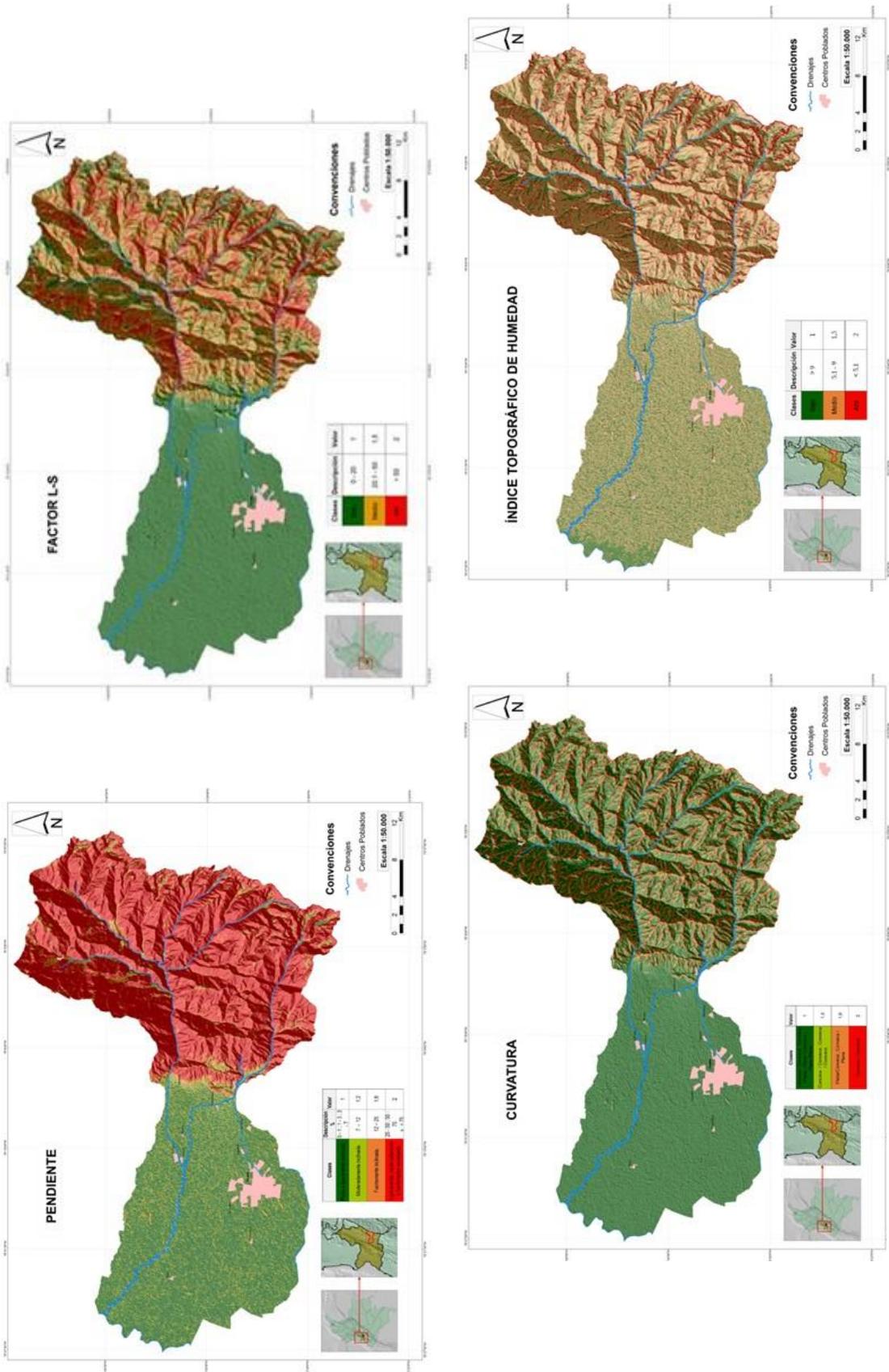
En los sectores con amenaza geomorfométrica alta, predominan pendientes que van desde ligeramente a fuertemente escarpadas (mayores al 25%), y ocupan un área aproximada de 53.303,3 ha (51.1 %). En consecuencia con la pendiente predominante en estos sitios el factor longitud pendiente (LS) se clasifica como medio a alto, condición encontrada principalmente sobre las laderas y cimas de las montañas y colinas, donde la pérdida de materiales y humedad pueden ser de mayor magnitud favoreciendo procesos de degradación (Figura 3-6).

La pendiente influye en el transporte del suelo, especialmente por su ángulo, longitud y curvatura. Aunque los modelos de erosión empíricos solo consideran el ángulo de la pendiente, la erosión se incrementa al aumentar la longitud de la pendiente, dado que se presenta mayor escorrentía y en consecuencia transporte de sedimentos (*Milevski et al., 2007*).

Siguiendo un patrón de flujo y dispersión de materiales sobre el terreno de tipo dendrítico, en zonas con amenaza alta, se manifiestan casi todas las combinaciones de las curvaturas consideradas en el modelo. En las franjas de laderas con mayor longitud, se presentan las composiciones entre las curvaturas cóncava y plana; y en las cimas y aristas de las colinas y montañas, se observan en mayor proporción las combinaciones usuales entre las curvaturas convexa y plana (Figura 3-6).

En consecuencia con las curvaturas presentadas en estas zonas, la curvatura convexa acelera los procesos de erosión, que ocurren en pendientes altas en la cuesta de la colina y la curvatura cóncava desacelera la dirección de flujo llevando a la sedimentación, que se da principalmente en los valles (Jordan, 2008).

Figura 3-6. Tendencia de indicadores geomorfométricos de desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca. (Colombia).



Siguiendo esta misma tendencia el índice topográfico de humedad evaluado en zonas de amenaza alta, exhibe un rango entre medio a alto de forma inversa a la pendiente. Relacionando la categoría media a sectores de laderas y flancos de la montaña, con un grado moderado de acumulación de humedad como condición predominante, seguido de una categoría alta que indica un bajo grado de acumulación asociado a posiciones de cimas, aristas y divisorias de aguas en colinas y montañas (Figura 3-6).

Esta tendencia del índice topográfico de humedad respecto a la pendiente, es reportado también por López (2006) y Buitrago (2010) en trabajos realizados para la clasificación de formas del terreno y modelación de la erosión. Dicha relación permite determinar áreas de saturación de humedad y zonas donde se pueden presentar diferenciales de infiltración, drenaje y escorrentía (Lin *et al.*, 2006; Qiu *et al.*, 2001).

En las zonas con amenaza geomorfométrica media, predominan pendientes fuertemente inclinadas (12 al 25%) y ocupan un área aproximada de 7.335,5 ha (7 %). A diferencia de las zonas con amenaza alta, en estas áreas el factor LS se clasifica como bajo, condición encontrada principalmente en colinas y vallecitos entre las posiciones quebradas y piedemonte, donde la pendiente tiende a ser menor (Figura 3-6). Esta condición de amenaza se caracteriza por exhibir las combinaciones de las curvaturas plana/cóncava en las partes más bajas y plana/convexa en las aristas de pequeños pliegues que se presentan en rellenos y vallecitos aluviales en la zona de montaña.

El índice topográfico de humedad como resultado de las curvaturas para el área de amenaza media, se presenta en un rango medio a bajo (Figura 3-6). Indicando la existencia de pequeños tramos entre la parte montañosa donde es posible la acumulación de agua, muy asociado al modelamiento hidrológico de la cuenca y el drenaje natural.

Por su alta correlación con propiedades del suelo, como profundidad del horizonte A, el contenido de materia orgánica, y contenido de limo y arena, valores bajos del ITH en las zonas altas de la montaña y altiplanicie tienden a generar escorrentía potencial y por lo tanto transporte de sedimentos (Florinsky, 2008; Moore *et al.*, 1991; Wilson y Gallant, 2000).

Ohlmacher (2007), indica que en áreas con curvaturas cóncavas en pendientes altas, existe también una alta probabilidad de deslizamiento, ya que al acumularse el flujo de agua en la depresión se incrementa la humedad, y asociado al tiempo de saturación del suelo se aumenta la pérdida de este por desprendimiento y por reducción de su estabilidad.

En zonas con amenaza geomorfométrica baja se encuentran principalmente pendientes suaves que van desde planas a moderadamente inclinadas (0 - 1; 1 - 3; 3 - 7 y 7 - 12%). El factor LS se clasifica como bajo, principalmente por el efecto menor que ejerce el grado de la pendiente, a diferencia de las zonas de amenaza alta y media (Figura 3-6).

Las combinaciones de las curvaturas que predominan en áreas con amenaza geomorfométrica baja corresponden a plana/cóncava y a cóncava/convexa, observadas en las aristas de pequeños pliegues que se presentan en el relieve plano.

En consecuencia con las curvaturas del área, el índice topográfico de humedad se ubica en un rango medio a bajo, indicando la acumulación de humedad como característica propia de regiones aluviales y basines, que se observa claramente definida en el sector occidental de la cuenca que bordea la margen derecha del río Cauca (Figura 3-6). Comportamiento típico de zonas cóncavas en donde se presenta desaceleración de los flujos y se concentra con mayor intensidad la humedad (Haboudane *et al.*, 2002; Sulebak *et al.*, 2000).

- **Amenaza antrópica a desertificación:**

La estimación de la amenaza antrópica a desertificación en la cuenca del río amaimé, se logró mediante el procesamiento de información espacial de coberturas y usos de la tierra, que permitieron determinar el tipo de coberturas vegetales presentes y evaluar los indicadores calidad de la vegetación y uso intensivo del suelo, propuestos por esta investigación para aplicar en el modelo de análisis del riesgo a desertificación.

Las observaciones permitieron establecer que el 98.2% del área total de la cuenca corresponden a coberturas vegetales, de las cuales 67.744 has (64.9%) constituyen zonas cultivadas y 34.683,2 has (33%) restantes sistemas naturales. Las coberturas vegetales más representativas son: Cultivos permanentes (Caña) (35.4%), Pastos (21.7%), Bosques

(16.9 %), Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva (16.2%) y Áreas agrícolas heterogéneas (7.5 %) (Tabla 4. Anexo B).

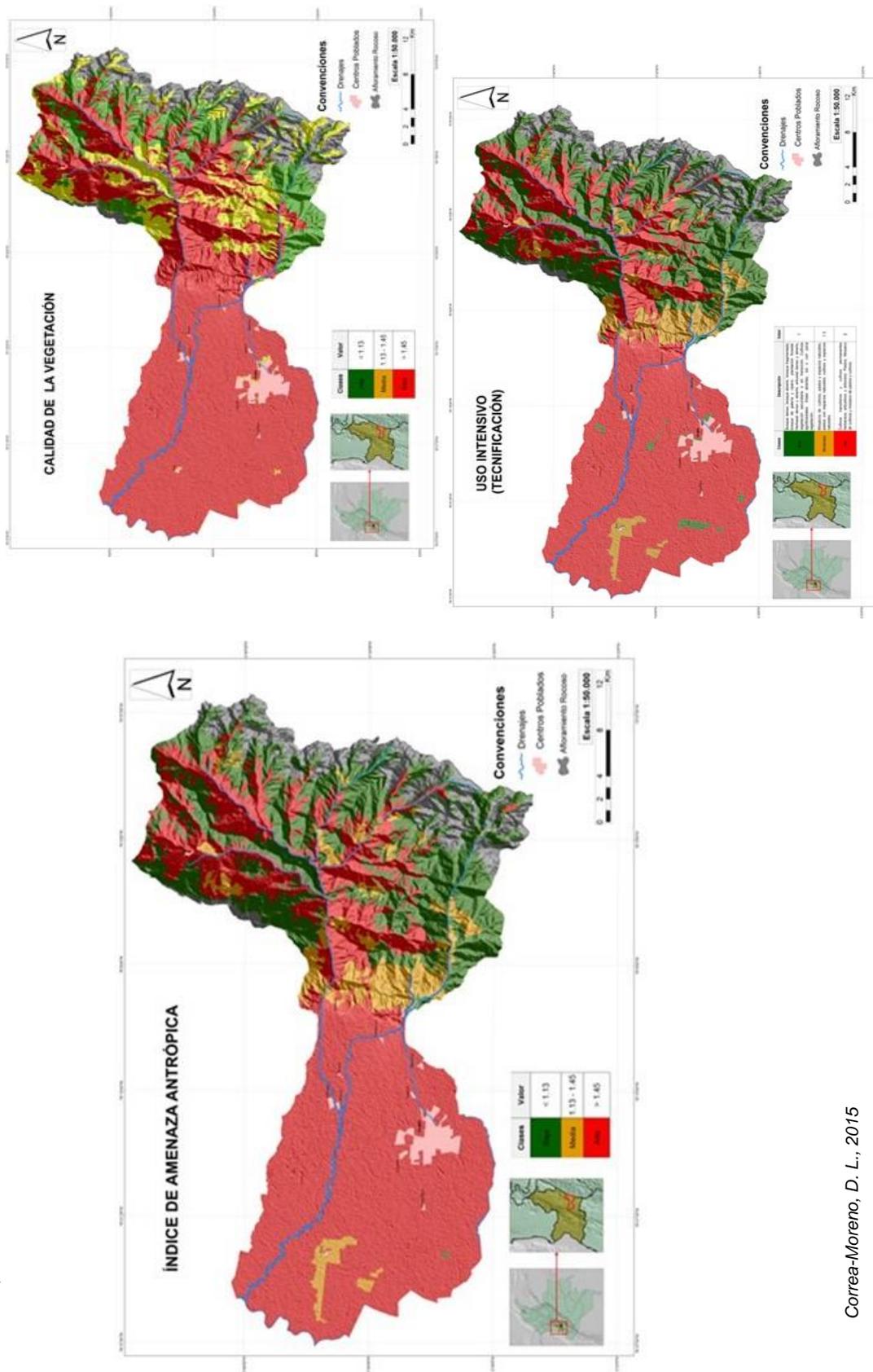
Los resultados de la evaluación de los indicadores calidad de la vegetación y uso intensivo del suelo permitieron catalogar el área de estudio con una amenaza antrópica a desertificación alta, al alcanzar en promedio un valor de 1.51 para el índice estimado (Figura 3-7).

Se pudo establecer que el 57.4% de su territorio presenta amenaza antrópica alta afectando aproximadamente 59.875 hectáreas, conformadas principalmente por las coberturas cultivos transitorios, cultivos permanentes y pastos, que se distribuyen desde el sector occidental hasta el centro oriente de la cuenca. Mientras que el 10.5 % y el 30.3 % del total del área son clasificadas con amenaza media y baja a desertificación, conformadas por las coberturas vegetales: mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, y bosques respectivamente, ubicadas en la parte de piedemonte y al suroriente de la cuenca (Figura 3-7).

Las zonas con amenaza antrópica alta se caracterizan por una calidad de la vegetación catalogada como baja y un uso intensivo del suelo alto (Figura 3-7). Las coberturas vegetales que predominan en estas zonas corresponden a cultivos transitorios y permanentes (principalmente caña de azúcar), pastos y mosaicos de cultivos, los cuales por sus características morfológicas, fisiológicas y sistema de producción, presentan riesgo a fuego entre muy alto a moderado, protección a la erosión muy baja a moderada y resistencia a la sequía baja a moderada, principalmente en monocultivos asociados a agricultura con riego (Tabla 4. Anexo B).

La producción continúa en periodos preestablecidos para estas coberturas, hacen que se califiquen con un uso intensivo del suelo alto, en respuesta a las prácticas de manejo y a la utilización de tecnología de alto impacto como la mecanización y el uso de agroquímicos. De acuerdo con Hoyos (2005), las áreas forestales de arbustos y pasturas con arbustos tienden a minimizar los efectos de la topografía en la erosión, por el contrario las tierras de uso agrícola muestran una interacción dinámica con el terreno propiciando la pérdida de suelo.

Figura 3-7. Tendencia de índices de Amenaza antrópica en la cuenca del río Amaimé en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).



Correa-Moreno, D. L., 2015

En zonas con amenaza antrópica media, la calidad de la vegetación fue calificada entre media a baja y el uso intensivo del suelo moderado a bajo (Figura 3-7). Las coberturas vegetales que predominan en esta categoría corresponden principalmente a pequeños cultivos agrícolas heterogéneos, plantaciones forestales y a sitios con vegetación herbácea y/o arbustiva o con poca vegetación, los cuales se asocian generalmente a sistemas naturales y semicomerciales de baja productividad, que registran riesgo a fuego, protección a la erosión y resistencia a la sequía entre alto a moderado.

El uso intensivo del suelo se consideró moderado a bajo por el efecto de la rotación de cultivos en las áreas agrícolas y por la menor intervención del suelo por mecanización en áreas pequeñas de cultivos y en sectores cubiertos con especies silvestres de porte medio y bajo (Tabla 4. Anexo B).

Las zonas con amenaza antrópica baja se relacionan con una calidad de la vegetación catalogada alta y un uso intensivo del suelo bajo (Figura 3-7). Las coberturas vegetales que predominan corresponden principalmente a bosques y vegetación natural, los cuales por sus características morfológicas y fisiológicas como el porte, dosel, propiedades combustibles y arreglo espacial del sistema, presentan riesgo a fuego y capacidad de recuperación alta, protección a la erosión muy alta y resistencia a la sequía alta (Tabla 4. Anexo B).

En estos ecosistemas el uso intensivo del suelo es bajo, sin embargo al existir la posibilidad del uso extractivo de especies forestales y el avance de la deforestación, se puede generar un impacto alto en el uso del suelo en las zonas ocupadas por estas coberturas.

- **Caracterización de áreas con amenaza de desertificación:**

La evaluación de la amenaza a desertificación en la cuenca del río Amaime, permitió establecer que las zonas que presentan **amenaza alta** se encuentran localizadas en las unidades de paisaje: planicie aluvial y parte central de la zona montañosa.

Estas zonas se caracterizan por: **Nivel de amenaza Natural alta a media** dado por zonas que van de subhúmedas secas (condición dominante) a subhúmedas húmedas, índice de número de meses secos hasta 7 a 8 meses con probabilidad del 67% para clasificar los

sectores semiáridos; Ubicadas en zona plana y sobre pendientes ligeramente a fuertemente escarpadas (mayores al 25%). El índice topográfico de humedad en categoría medio a alta indica moderada a baja acumulación de humedad; **Nivel de amenaza Antrópica alta** dado por una calidad de la vegetación catalogada como baja y un uso intensivo del suelo alto. Las coberturas vegetales predominantes corresponden a cultivos transitorios y permanentes (caña de azúcar), pastos y mosaicos de cultivos, los cuales presentan riesgo a fuego entre muy alto a moderado, protección a la erosión muy baja a moderada y resistencia a la sequía baja a moderada.

Las zonas con **amenaza de desertificación media** se caracterizan por: **Nivel de amenaza Natural alta a media** dado por índice de aridez que alcanza valores mayores a 0.75 y califican el área en subhúmedas húmedas, índice de número de meses secos de 5 a 6 meses con probabilidad del 50%, y por índice agresividad climática muy alto; pendientes fuertemente inclinadas (12 al 25%), el factor LS se clasifica como bajo, las combinaciones de las curvaturas que predominan son plana/cóncava en las partes más bajas y plana/convexa, el índice topográfico de humedad, se presenta en un rango medio a bajo; **Nivel de amenaza Antrópica media** dado por calidad de la vegetación catalogada baja y un uso intensivo del suelo moderado. Las coberturas vegetales que predominan corresponden principalmente a áreas agrícolas heterogéneas y plantaciones forestales.

En cuanto a las zonas con **amenaza de desertificación baja** ubicadas principalmente en la unidad de paisaje montañoso, se caracterizan por: **Nivel de amenaza Natural baja** dado por índice de aridez que alcanza valores mayores a 1 calificando áreas húmedas con índice agresividad climática muy alto; y **Nivel de Amenaza antrópica baja** dado por calidad de la vegetación catalogada moderada y un uso intensivo del suelo bajo. Las coberturas vegetales que predominan corresponden principalmente a bosques y vegetación natural que presentan riesgo a fuego y capacidad de recuperación alta, protección a la erosión muy alta y resistencia a la sequía alta.

3.3.2 Evaluación de la vulnerabilidad edáfica a desertificación

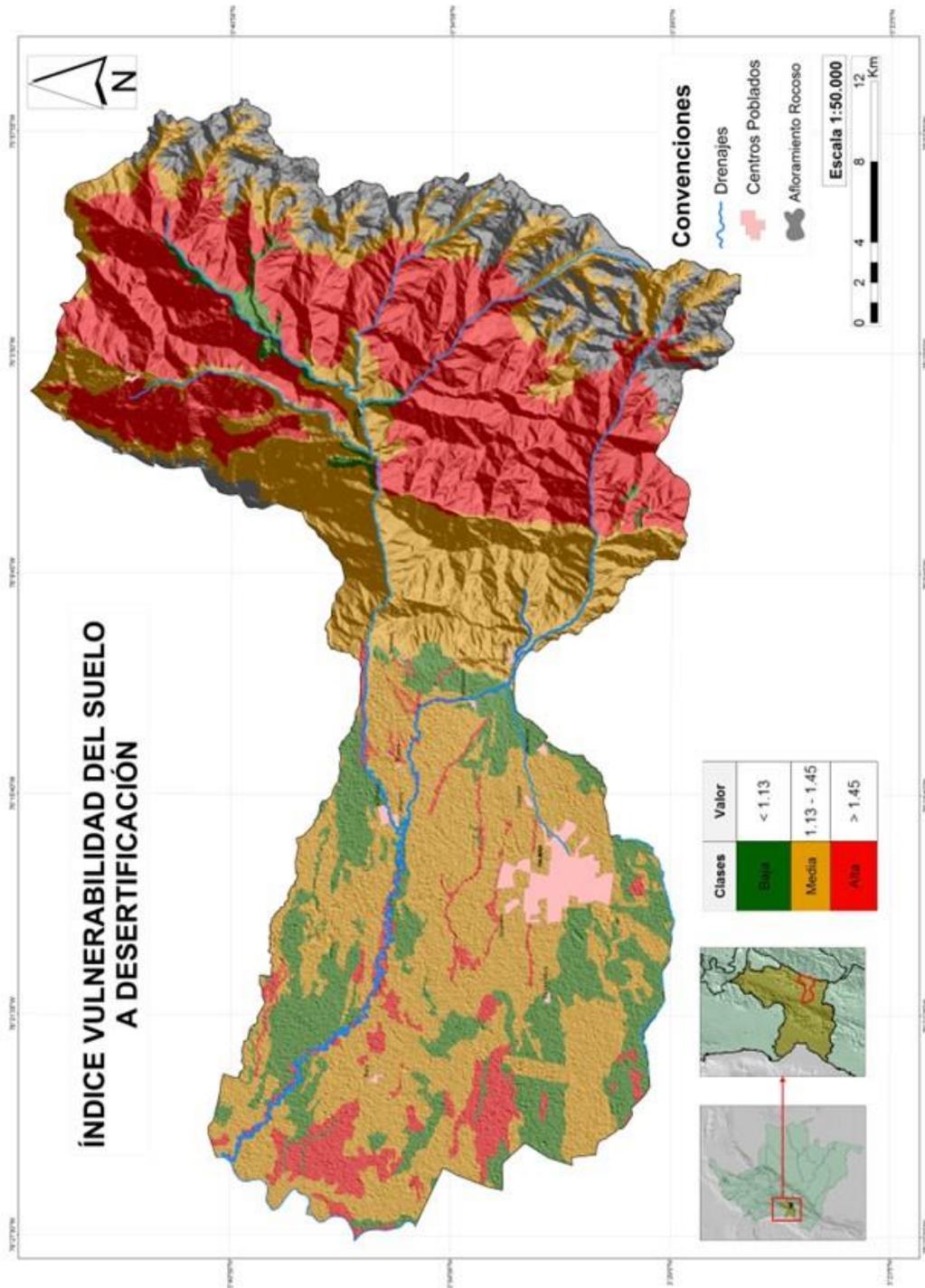
La evaluación de la vulnerabilidad del suelo a desertificación en las RARD encontradas en la Cuenca del río Amaime, permitieron clasificar el área de estudio en la categoría de zonas con vulnerabilidad media, al alcanzar en promedio un valor de 1.27 para el índice estimado (IV) (Figura 3-8). Con el análisis de los indicadores de calidad del suelo de las RARD se pudo establecer que el 28.8 % de su territorio presenta zonas con alta vulnerabilidad a desertificación, afectando aproximadamente 29.683 hectáreas, ubicadas principalmente en zonas de montaña; mientras que el 43.9 % y el 15.7 % del total del área de la cuenca son clasificadas como áreas con vulnerabilidad media y baja a desertificación (Tabla 5. Anexo C).

El alto índice de exposición promedio de la cuenca (1.45) manifiesta la fragilidad biofísica inherente de los suelos a las amenazas en las diferentes posiciones de paisaje (Tabla 5. Anexo C). Dada principalmente por el tipo de material parental conformado por cenizas volcánicas en zonas de montaña y sedimentos en zonas planas; por el pH del suelo catalogado en algunas áreas como fuertemente ácido y alcalino; y por la presencia de fragmentos de roca. En la zona plana se presentó mayor índice de exposición, fundamentalmente por la ausencia en porcentaje de fragmentos de roca, el tipo de material parental y el pH característicos de zonas de acumulación (Figura 3-9).

El material parental se ha considerado como indicador de desertificación potencial, al definir las propiedades físico químicas de los suelos que determinan el crecimiento de las plantas, la erosión del suelo y la resiliencia del ecosistema (Kosmas *et al*, 2000). Por lo cual suelos originarios de roca caliza, areniscas y lava volcánica se caracterizan por ser susceptibles a erosión, tener restricción en profundidad, y en consecuencia no permiten el crecimiento de vegetación, condiciones que a futuro favorecen el proceso de desertificación.

El índice de sensibilidad promedio considerado bajo para la cuenca (1.06), permitió establecer que en general, no existe un impacto biofísico alto manifestado por los procesos de degradación erosión y salinidad evaluadas en las dos posiciones topográficas (Tabla 5 Anexo C).

Figura 3-8. Vulnerabilidad edáfica a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). Índice de vulnerabilidad.



Sin embargo, el tipo de uso del suelo, como agricultura y ganadería intensiva han promovido el aumento de procesos de degradación química y física del suelo en algunos sectores de la cuenca, que presentan una alta sensibilidad a desertificación manifestada principalmente por erosión ligera a moderada en la zona de montaña y por salinización característica de algunas RARD ubicadas en áreas de basin en la zona plana (Figura 3-9).

En este caso es necesario considerar la fragilidad de ecosistemas como las tierras secas, que presentan una mayor susceptibilidad a degradación por factores inherentes de formación, pero acentuada principalmente por prácticas de manejo intensivo de la tierra, sobrepastoreo y quemas frecuentes (Farage *et al.*, 2007).

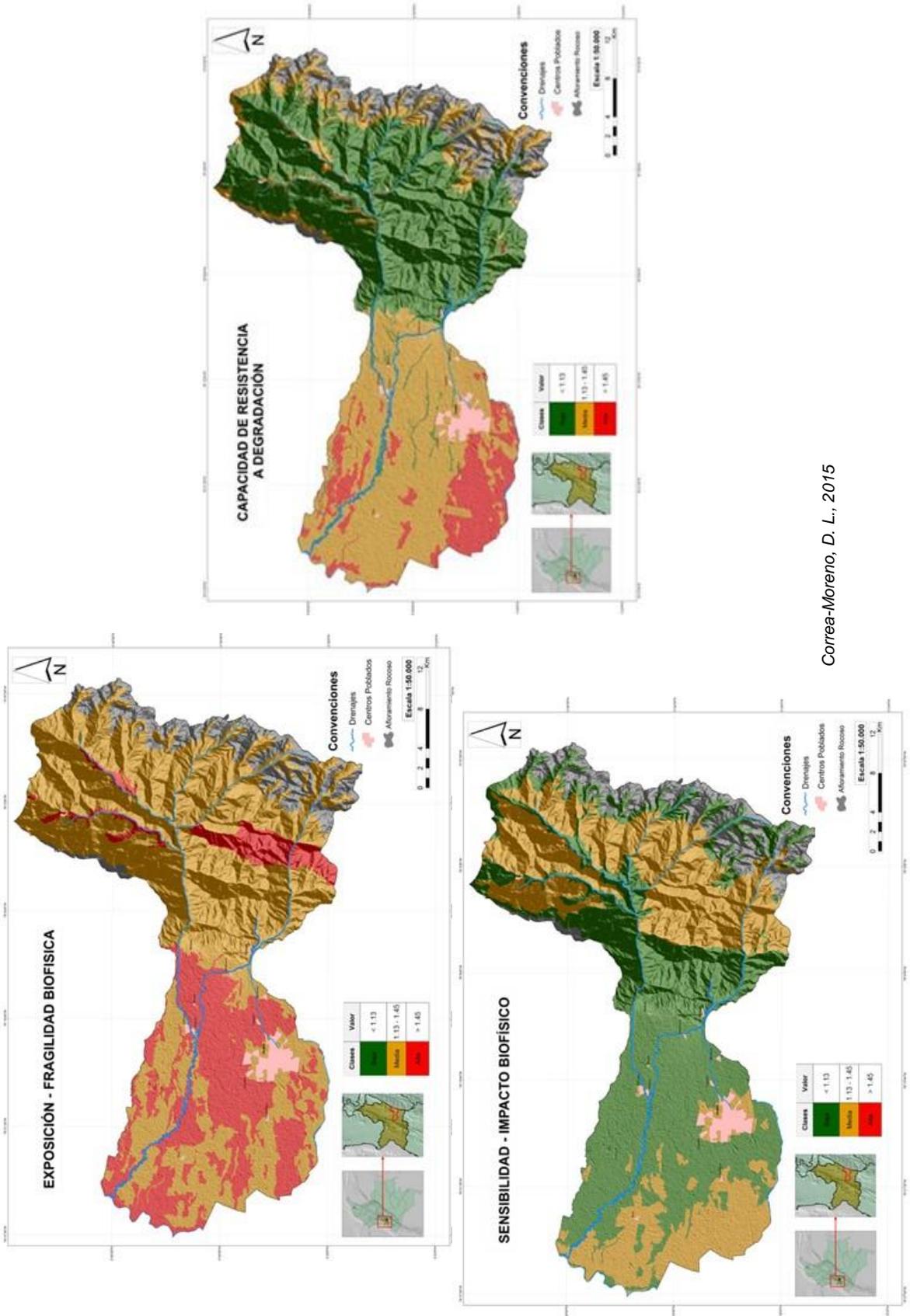
La capacidad de resistencia a degradación de acuerdo al índice promedio se considera media para la cuenca (1.22), influenciado principalmente por el contenido de carbono y profundidad efectiva, que determinan la capacidad de almacenamiento de agua y el desarrollo de cobertura vegetal (Figura 3-9). Estos factores son considerados limitantes bajo condiciones de zonas secas, en donde se presentan bajos contenidos de materia orgánica en el suelo, como consecuencia de la baja disponibilidad de agua para la productividad de las plantas y acumulación de biomasa y carbono (Bakr *et al.*, 2012; Lal, 2002).

Respecto a la posición de paisaje, se pudo establecer que la zona plana presenta una mayor capacidad de resistencia a degradación, en comparación con suelos de la zona de montaña, en donde la profundidad efectiva de tipo superficial y la estructura del suelo resultan limitantes y en consecuencia disminuyen la capacidad de resistencia a degradación en estas áreas (Tabla 5. Anexo C).

- **Caracterización de áreas con vulnerabilidad edáfica a desertificación:**

La evaluación de la vulnerabilidad edáfica a desertificación en la cuenca del río Amaime, permitió establecer que las zonas que presentan **vulnerabilidad a desertificación alta** se encuentran conformadas por las RARD que corresponden a las unidades MLB, MLC, MLD, AM y RC.

Figura 3-9. Vulnerabilidad edáfica a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia). Índices de exposición, sensibilidad y capacidad de resistencia a degradación.



Correa-Moreno, D. L., 2015

Estas zonas se caracterizan por: Nivel **de exposición alto** dado por suelos de baja fertilidad originarios de cenizas volcánicas y aluviones asociados al grupo de rocas intermedias (Sílice 52 - 60%), en algunos sectores suelos con pH ácido o alcalino, sin presencia de fragmentos rocosos; **Nivel de sensibilidad medio** presentándose erosión ligera a moderada en zonas de montaña y salinidad y/o sodicidad en suelos de zonas planas; y **Nivel de capacidad de resistencia a degradación Medio** dado por suelos profundos, altos contenidos de Carbono, con estructura en bloques y bien drenados.

Las zonas que presentan **vulnerabilidad a desertificación media** se destacan por su cobertura sobre las RARD que corresponden a las unidades MGA, MLA, MRC, MN y PL. Estas zonas se caracterizan por: **Nivel de exposición medio** dado por suelos de alta fertilidad originarios de aluviones, diabasas y esquistos asociados al grupo de rocas intermedias (Sílice 52 - 60%), en algunos sectores suelos con pH ligeramente ácido o neutro, CIC alta a muy alta, sin presencia de fragmentos rocosos; **Nivel de sensibilidad bajo** presentándose erosión ligera a moderada en zonas de montaña y ausencia de salinidad y/o sodicidad en zonas planas; y **Nivel de capacidad de resistencia a degradación medio** por encontrarse suelos profundos con altos contenidos de carbono, estructura en bloques y bien drenados.

En las zonas con **vulnerabilidad a desertificación baja**, se destacan las RARD que corresponden a las unidades GL y GU. Se caracterizan por: **Nivel de exposición medio** dado por suelos de alta fertilidad originarios de aluviones, diabasas, filitas y esquistos asociados al grupo de rocas intermedias (Sílice 52 - 60%), en algunos sectores suelos con pH moderadamente ácido o neutro, CIC alta a muy alta, con presencia de fragmentos rocosos y texturas F y FAr; **Nivel de sensibilidad bajo** sin rastros de erosión y salinidad y/o sodicidad; y **Nivel de capacidad de resistencia a degradación medio** por encontrarse suelos profundos, con contenidos de carbono alto a muy alto, estructura en bloques y bien drenados.

3.3.1 Análisis del riesgo a desertificación:

El análisis del riesgo a desertificación evaluado mediante aplicación de modelo propuesto en la cuenca del río Amaime, se logró mediante el procesamiento de datos espaciales de amenaza y vulnerabilidad obtenida en fases anteriores. Con esta información se identificaron nodos con grado diferencial de riesgo a desertificación clasificados en alto, medio y bajo, que agrupan las combinaciones posibles que se dan entre las clasificaciones de amenaza y vulnerabilidad.

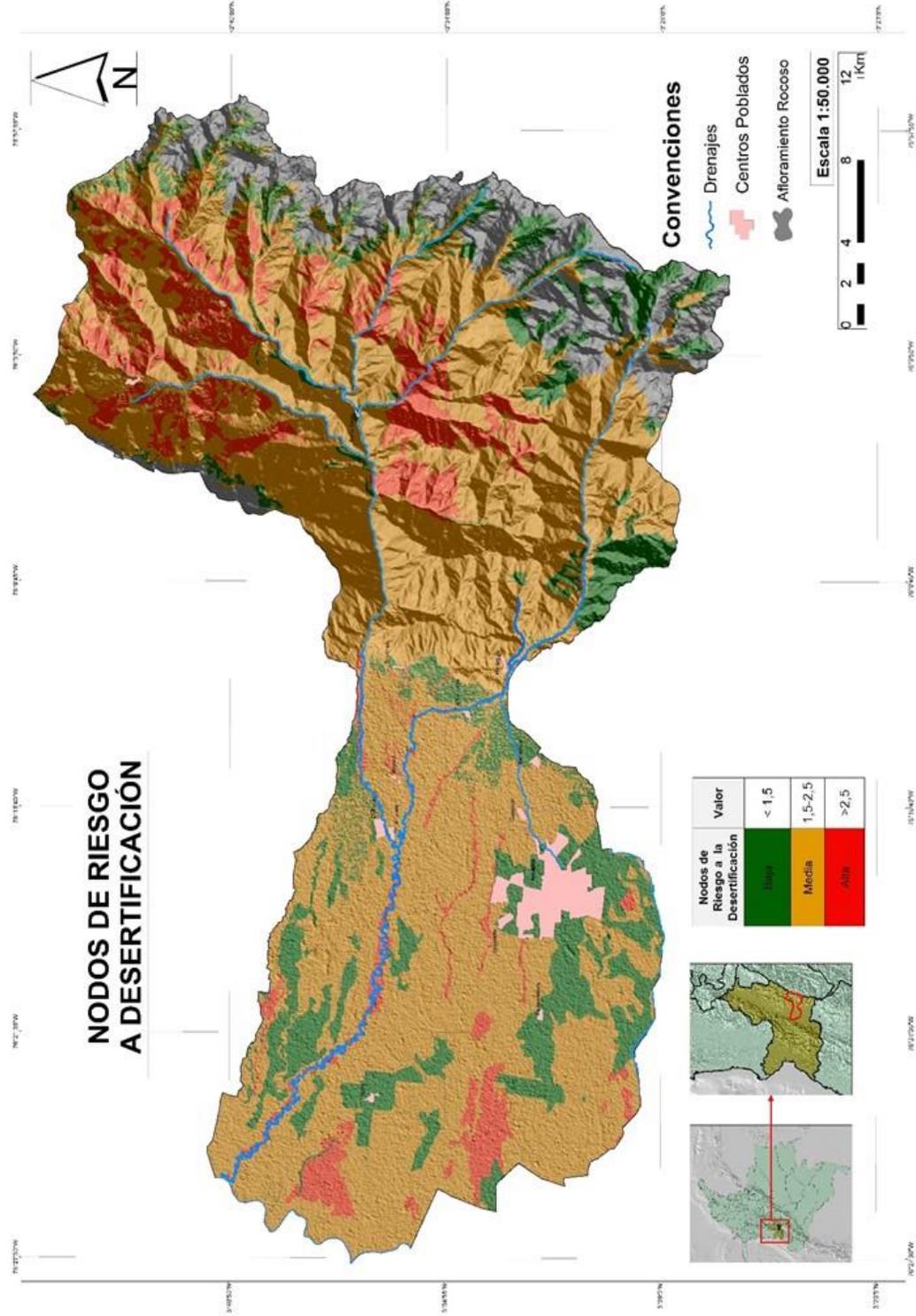
Las salidas cartográficas del modelo permitieron establecer que el 98.2% del área total de la cuenca presentan algún grado de riesgo a desertificación, de los cuales 67.744 has (64.9%) se ubican en la planicie aluvial, 34.683,2 has (33%) en la posición de montaña y 34.683,2 has (33%) en piedemonte (Tabla 3-5). Los resultados de la evaluación de los índices de amenaza y vulnerabilidad permitieron catalogar el área de estudio con un riesgo a desertificación medio, al alcanzar valores ente 1.5 a 2.5 para el índice estimado en las diferentes unidades de análisis (Figura 3-10).

Se pudo identificar que el nodo de riesgo medio es la condición dominante en la cuenca del río Amaime, el cual se manifiesta en una amenaza alta a media dada por condiciones de áreas con déficit hídrico en la parte plana de la cuenca y por relieve con pendientes mayores a 25% conformadas principalmente por las coberturas cultivos transitorios, cultivos permanentes y pastos con un uso intensivo del suelos alto, que se distribuyen desde el sector occidental hasta el nororiente de la cuenca.

La vulnerabilidad de la cuenca clasificada entre media a alta es determinada por el material parental, la fertilidad de sus suelos y por la baja capacidad de resistencia a degradación por limitantes como el bajo contenido de materia orgánica en zona plana y por la profundidad efectiva característica de relieve montañoso (Figura 3-10).

El nodo de riesgo alto a desertificación abarca áreas del territorio con vulnerabilidad alta en zonas donde se manifiestan procesos de erosión y salinidad, y con amenaza alta representada principalmente por pendientes escarpadas en zona de montaña sobre las cuales se han establecido pasturas que se encuentran en expansión y por el déficit hídrico determinado por el clima en zona plana (Figura 3-10).

Figura 3-10. Riesgo a desertificación en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).



Correa-Moreno, D. L., 2015

El nodo de riesgo bajo se presenta en áreas menores de la cuenca que responden a una vulnerabilidad baja encontrada en las RARD con suelos profundos y con contenidos altos de arcillas en zona plana y en áreas con amenaza baja por encontrarse en zonas húmedas del sector suroriental de la cuenca, en donde se ubican coberturas de bosques con bajo uso intensivo del suelo.

4. Conclusiones

El modelo metodológico para el análisis integral del riesgo a desertificación (MARD) generado por esta investigación, se basa en la combinación de indicadores biofísicos que describen la amenaza y vulnerabilidad edáfica a desertificación, apoyándose en el procesamiento espacial de datos, en etapas que permiten la obtención de productos intermedios y finales de interés para procesos de modelación y diagnóstico a escala regional, que facilitan la planificación del uso de la tierra y las políticas tendientes a enfrentar los riesgos que la desertificación y las variaciones climáticas generaran en el territorio colombiano.

Resultados obtenidos en la aplicación y calibración del modelo a la cuenca del río Amaime (Colombia), permiten afirmar que a través de esta aproximación metodológica es posible diferenciar áreas con mayor o menor riesgo a la desertificación, partiendo del análisis de indicadores climáticos, geomorfométricos, de coberturas y usos de la tierra, y de calidad del suelo, mediante el modelamiento espacial de superficies de datos disponibles, que ponderan la influencia de factores biofísicos en los procesos de desertificación y degradación de tierras con mayor precisión y resolución.

La amenaza a desertificación en la cuenca del río Amaime está determinada principalmente por los indicadores climáticos: número de meses secos y agresividad climática; indicadores geomorfométricos: pendiente e índice topográfico de humedad; y por los indicadores de amenaza antrópica: calidad de la vegetación y usos intensivo del suelo. Los cuales expresan presión constante en diferentes sitios de la cuenca dado por el déficit hídrico en gran parte del año, con una alta probabilidad de sequías y mayor intensidad de las lluvias, que generan procesos de escorrentía, erosión y sedimentación de manera natural y que son exacerbados por el uso intensivo del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en expansión en la cuenca.

Los indicadores edáficos que condicionan la vulnerabilidad a la desertificación en la cuenca del río Amalme son: material parental, pH, CIC, fragmentos rocosos, erosión, salinidad, contenido de materia orgánica y profundidad efectiva. Factores que pueden limitar la utilización de los suelos en zonas secas y subhúmedas, y afectan la resiliencia de este tipo de ecosistemas influyendo en la disponibilidad de agua, en la cobertura vegetal y en el almacenamiento de carbono en el suelo.

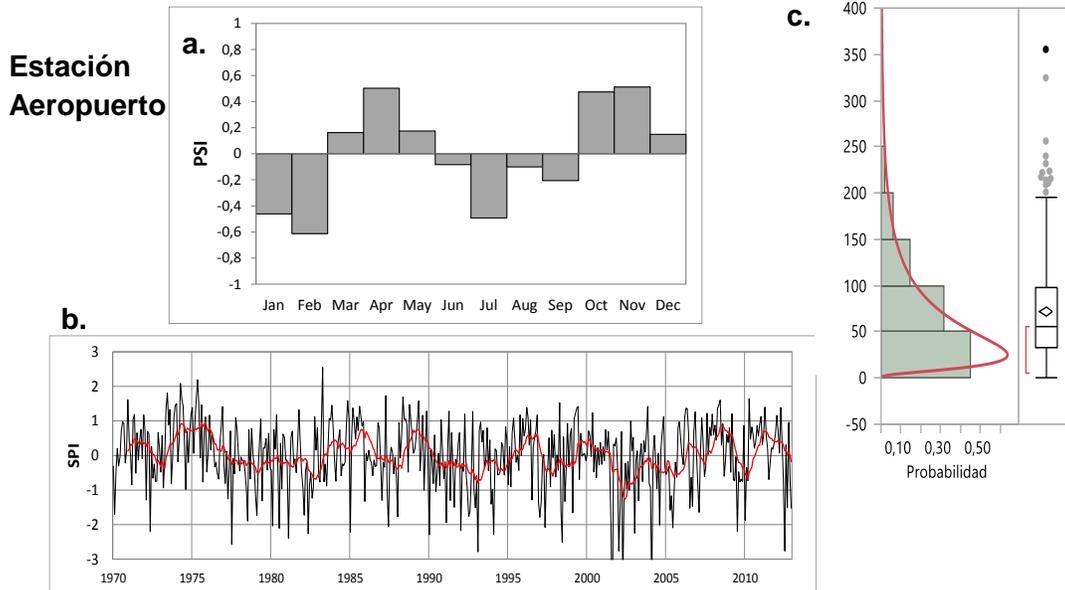
**A. Anexo A: Modelo Cartográfico
para el análisis del riesgo de
desertificación (MARD)**

**B. Anexo B: Amenaza desertificación
en la cuenca del río Amaime (Valle del
Cauca-Colombia)**

Tabla 1. Índices climáticos para valoración de amenaza climática en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca. (Colombia).

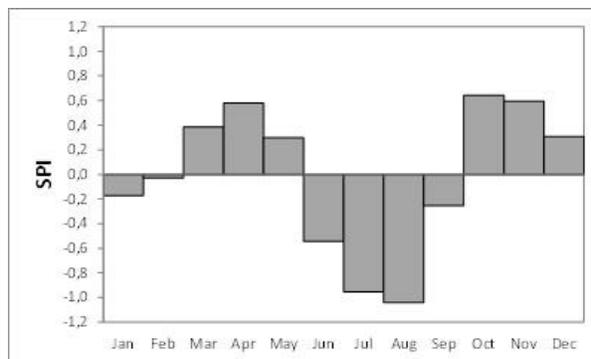
Estación	Grupo Precip. anual	Índices climáticos				Clasificación Índices climáticos						Índice Amenaza Climática			
		IA	IMS	ICP	IFM	IA	IMS	ICP	IFM	IA	IMS	ICP	IFM	Valor	Clase
Albania	2	1.62	2	9.6	163.8	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	2	Muy alto	1.26	Media
Anberes	2	1.67	2	9.7	170.2	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	2	Muy alto	1.26	Media
Auji	1	0.81	6	9.9	93.2	1.3	Z. Subhúmedas húmedas	1.6	Subhúmedo	1	Uniforme	1.5	Moderado	1.47	Alta
Austria	3	1.88	2	9.9	209.1	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	2	Muy alto	1.26	Media
Bellavista	4	1.64	3	9.6	140.6	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	1.8	Alto	1.22	Media
Caseteja	5	1.75	0	9.2	126.2	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	1.8	Alto	1.22	Media
El Diamante	2	1.65	2	9.6	166.7	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	2	Muy alto	1.26	Media
La Betulia	2	1.94	1	9.2	160.3	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	2	Muy alto	1.26	Media
La Ceja	4	1.44	2	9.4	116.8	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	1.5	Moderado	1.15	Media
La Montañita	3	1.72	2	9.7	187.1	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	2	Muy alto	1.26	Media
La Selva	4	2	0	8.8	137.6	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	1.8	Alto	1.22	Media
La Sirena	4	1.59	2	9.6	137	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	1.8	Alto	1.22	Media
Las Miras	3	2.15	1	9.2	195.5	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	2	Muy alto	1.26	Media
Planta Nima	2	1.25	3	9.9	154.8	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	1.8	Alto	1.22	Media
San Emigdio	2	1.3	2	9.8	157.5	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	1.8	Alto	1.22	Media
San Nicolas	3	1.9	2	10.1	201.4	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1.6	Uniforme	2	Muy alto	1.26	Media
Promedio estaciones zonas Piedemonte y Montaña		1.6	2.0	9.6	157.4	1	Z. Húmedas	1	Húmedo, hiperhúmedo, hídrico, hiperhídrico.	1	Uniforme	1.8	Alto	1.25	Media
Aeropuerto	1	0.66	8	9.1	78.7	1.8	Z. Subhúmedas secas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.2	Bajo	1.58	Alta
Amaime	1	0.79	7	9.5	97.4	1.3	Z. Subhúmedas húmedas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.5	Moderado	1.52	Alta
Arroyohondo	1	0.60	8	9.7	76.2	1.8	Z. Subhúmedas secas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.2	Bajo	1.58	Alta
Candelaria	1	0.77	6	9.6	96.4	1.3	Z. Subhúmedas húmedas	1.6	Subhúmedo	1	Uniforme	1.5	Moderado	1.47	Alta
Corpoica	1	0.8	5	9.6	100.6	1.3	Z. Subhúmedas húmedas	1.6	Subhúmedo	1	Uniforme	1.5	Moderado	1.47	Alta
Ginebra	1	0.72	7	9.5	89.8	1.8	Z. Subhúmedas secas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.2	Bajo	1.58	Alta
Guacari	1	0.67	7	9.6	83.1	1.8	Z. Subhúmedas secas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.2	Bajo	1.58	Alta
La Rita	1	0.77	7	9.4	95	1.3	Z. Subhúmedas húmedas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.5	Moderado	1.52	Alta
Pradera	1	0.81	6	9.9	104.1	1.3	Z. Subhúmedas húmedas	1.6	Subhúmedo	1	Uniforme	1.5	Moderado	1.47	Alta
PTAR	1	0.57	8	9.7	71.4	1.8	Z. Subhúmedas secas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.2	Bajo	1.58	Alta
San Jose	1	0.74	7	9.3	88.9	1.8	Z. Subhúmedas secas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.2	Bajo	1.58	Alta
San Marcos	1	0.65	8	9.3	78.6	1.8	Z. Subhúmedas secas	1.8	Semiárido	1	Uniforme	1.2	Bajo	1.58	Alta
Promedio estaciones zona Plana		0.72	7	9.5	89.5	1.8	Z. Subhúmedas secas	1.8	Semiárido	1.0	Uniforme	1.2	Bajo	1.54	Alta

Figura 2. Grupos de estaciones climáticas diferenciados por comportamiento intra-anual del Índice estandarizado de precipitación (SPI) relacionados con la ZCIT en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).

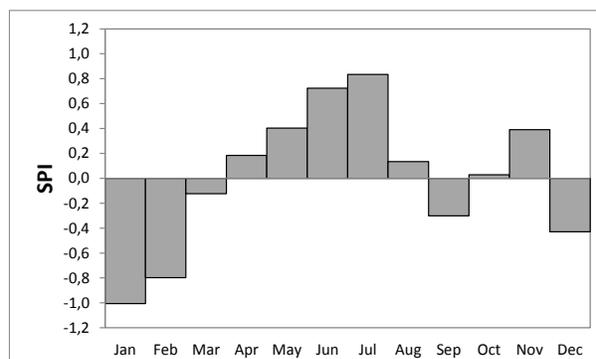


Grupo 2: Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Rita, La Selva, PTAR, San Marcos, Aeropuerto, Arroyohondo.

a. Índice estandarizado promedio mensual. **b.** Series de tiempo mensuales del índice estandarizado de precipitación. **c.** Histograma precipitación mensual y distribución log-normal.



Grupo 1: Albania, Amaime, Amberes, Aují, Austria Bellavista, Corpoica, El Diamante, La Betulia, La Ceja, La Montañita, La Sirena, Las Mirlas, Planta Nima, Pradera, San Emidio, San José, San



Grupo 3: Caseteja.

Tabla 2. Pendiente (m) en la recta de regresión que relaciona ONI e índice estandarizado de precipitación en estaciones de la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Bellavista	-0,01	-0,15	0,41	0,52	0,24	-0,63	-0,69	-1,14	-0,53	0,70	0,73	0,30
Candelaria	-0,26	-0,35	0,04	0,82	0,64	0,04	-1,08	-0,72	-0,33	0,28	0,40	0,53
Caseteja	-1,01	-0,80	-0,12	0,18	0,40	0,72	0,83	0,13	-0,30	0,03	0,39	-0,43
Corpoica	-0,41	-0,12	0,42	0,74	0,42	-0,32	-1,01	-0,93	-0,08	0,58	0,52	0,10
El Diamante	-0,07	0,14	0,70	0,62	0,38	-0,70	-1,24	-0,99	-0,41	0,68	0,54	0,34
Ginebra	-0,21	-0,59	0,16	0,99	0,12	-0,32	-0,37	-0,50	-0,40	0,63	0,37	0,08
Guacari	-0,56	-0,46	0,46	0,74	0,46	-0,02	-0,60	-0,62	-0,47	0,94	0,34	-0,20
La Betulia	-0,35	0,07	0,30	0,32	0,34	-0,25	-0,86	-1,05	-0,37	0,57	0,66	0,47
La Ceja	-0,47	-0,08	0,43	0,50	0,16	-0,65	-0,64	-0,84	-0,39	0,66	0,82	0,25
La Montanita	-0,17	-0,26	0,48	0,66	0,42	-0,58	-0,79	-1,03	0,14	0,52	0,42	0,08
La Rita	-0,01	-0,24	0,25	0,91	0,39	-0,09	-0,90	-0,68	-0,58	0,43	0,05	0,48
La Selva	-0,38	-0,36	0,11	0,48	0,30	0,28	-0,59	-0,65	0,07	0,32	0,37	0,08
La Sirena	0,09	-0,13	0,20	0,33	0,12	-0,38	-0,61	-1,33	-0,66	0,86	0,91	0,58
Las Mirlas	-0,22	-0,27	0,18	0,54	0,43	-0,30	-0,84	-0,91	0,17	0,42	0,49	0,35
Planta Nima	-0,45	-0,10	0,38	0,73	0,32	-0,53	-1,20	-1,14	-0,06	0,77	0,65	0,08
Pradera	0,08	-0,10	0,14	0,83	0,23	-0,39	-0,98	-0,76	-0,48	0,73	0,46	0,17
PTAR	-0,41	-0,66	0,18	0,86	0,46	-0,37	-0,46	-0,58	-0,17	0,32	0,39	0,47
San Emigdio	-0,36	0,09	0,42	0,70	0,25	-0,59	-1,31	-1,09	-0,09	0,80	0,65	0,29
San José	-0,06	0,26	0,52	0,41	0,38	-0,36	-0,59	-0,95	-0,55	0,20	0,17	0,45
San Marcos	-0,68	-0,37	0,24	0,88	0,35	0,07	-0,62	-0,56	-0,19	0,63	0,17	0,09
Aeropuerto	-0,46	-0,61	0,16	0,50	0,18	-0,08	-0,49	-0,10	-0,21	0,47	0,51	0,15
San Nicolas	0,03	0,07	0,29	0,47	0,21	-0,90	-1,14	-1,14	-0,24	0,79	0,79	0,41
Albania	-0,14	0,11	0,57	0,51	0,30	-0,81	-1,07	-0,80	-0,29	0,58	0,64	0,38
Amaime	0,06	-0,05	0,32	0,83	0,28	-0,20	-0,93	-1,02	-0,34	0,66	0,23	0,13
Amberes	-0,36	0,03	0,53	0,56	0,42	-0,80	-0,99	-1,09	-0,13	0,57	0,55	0,52
Arroyohondo	-0,31	-0,62	0,48	0,74	0,62	0,31	-0,95	-0,60	-0,79	0,45	0,31	0,33
Aují	-0,23	0,08	0,28	0,58	0,20	-0,63	-0,98	-1,16	-0,23	0,63	0,70	0,28
Austria	-0,03	-0,07	0,36	0,60	0,25	-0,80	-1,31	-1,38	-0,06	0,83	0,75	0,35

Tabla 3. Tendencias Valor Z del Índice estandarizado de la precipitación (SPI) en estaciones de la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).

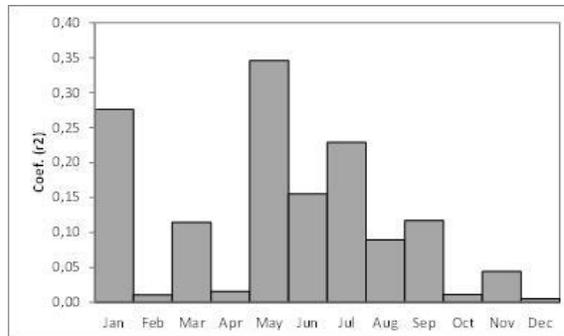
Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Aeropuerto	1.15	0.29	0.71	0.59	-0.52	-0.45	-2.04	-0.69	-0.63	0.23	-0.81	-1.16
Albania	1.01	0.80	1.47	-0.23	1.60	1.88 *	0.10	-0.10	0.22	-0.92	-0.88	0.61
Amaime	-0.94	0.80	-0.31	0.59	-0.58	-1.54	-0.61	-0.42	-1.31	-0.01	-0.90	-0.84
Amberes	0.94	0.74	0.98	0.23	0.00	0.65	-0.17	0.63	0.25	-0.59	-0.60	-0.33
Arroyohondo	-1.10	-0.22	0.08	1.96 *	-0.58	0.04	0.28	-1.28	0.49	-0.58	-0.63	0.38
Auji	-0.19	-0.79	-1.00	0.09	-1.00	-0.36	0.29	-2.43 ***	-1.49	1.62	1.81 *	0.65
Austria	-0.40	-1.05	-1.41	-1.94 *	-2.83 ***	0.00	-0.51	-2.28 ***	-1.99 **	-1.73 *	-0.12	0.55
Bellavista	-0.77	-1.11	-1.70 *	-1.47	-2.64 ***	-0.57	-0.73	-2.47 ***	-1.65 *	-0.54	-1.05	0.60
Candelaria	-0.38	-0.06	1.43	-0.30	-0.36	-1.49	0.84	-0.60	-1.45	0.61	0.19	-0.74
Caseteja	0.70	0.01	0.01	-1.45	-0.87	1.37	-0.65	-0.52	-0.98	-1.25	1.19	-0.15
Corpoica	0.37	0.48	0.51	0.88	-1.42	0.36	0.84	-1.31	-1.26	-1.21	0.85	2.28 **
El Diamante	0.02	0.65	0.71	1.32	2.53 **	1.14	0.77	0.17	0.36	-1.11	-1.55	1.76 *
Ginebra	-0.27	0.53	-0.70	-0.75	0.10	0.13	-0.44	0.67	-1.03	0.85	1.39	0.38
Guacarí	-1.04	0.06	-0.05	0.09	-0.65	-0.81	0.10	-0.23	-0.81	-0.67	0.15	0.65
La Betulia	-0.36	1.34	-0.43	0.48	0.65	1.05	-0.14	0.18	1.11	-0.13	0.09	0.85
La Ceja	0.21	0.41	-0.11	0.36	1.50	0.00	1.32	-1.28	-1.15	0.45	0.97	0.01
La Montanita	1.06	0.96	0.74	-0.48	-0.19	1.32	0.25	0.21	0.02	0.10	-0.28	-0.46
La Rita	-1.85 *	-0.24	0.36	-0.21	-1.65 *	-0.63	-0.72	-1.74 *	-0.31	-0.01	0.00	-0.16
La Selva	0.80	0.78	-1.71 *	-0.71	-0.30	2.18 **	-1.71 *	0.57	-0.31	-0.84	-0.50	1.44
La Sirena	-0.73	-1.12	0.08	0.32	-0.96	-0.61	-1.32	-0.74	-0.79	0.02	0.45	-0.86
Las Mirilas	1.59	-0.07	0.37	-0.54	-0.37	-0.83	0.00	-0.59	0.23	-1.30	-0.38	0.00
Planta Nima	-0.67	0.70	0.00	-0.55	-3.17 ***	-0.72	-0.23	-0.84	-1.66 *	-1.89 *	-0.73	-0.91
Pradera	-0.42	-0.26	0.46	-0.14	-0.72	-0.12	0.52	-1.44	-0.39	-0.46	-0.26	0.18
PTAR	-0.74	-0.33	-0.04	0.31	-1.33	-0.85	-1.56	-1.38	0.63	0.39	-0.16	0.41
S Emigdio	0.06	-0.08	-0.12	-0.94	-2.65 ***	-0.13	-0.02	-1.37	-0.80	-0.26	0.83	-0.27
San José	-0.60	0.01	-0.08	-0.10	-1.19	-0.67	-2.01 **	0.49	0.21	0.07	-1.05	-1.81 *
San Marcos	-0.74	0.00	-0.36	1.20	-0.40	-0.18	-0.36	-1.98 **	-0.92	0.22	1.00	0.25
San Nicolas	-0.55	0.70	-0.17	0.43	0.16	0.83	2.34 **	0.03	-1.16	1.36	0.97	0.91

El signo determina tendencias positivas o negativas. *** Nivel de significancia 99%. ** Nivel de significancia 95%. * Nivel de significancia 90%.

Figura 3. Grupos de estaciones climáticas diferenciados por coeficientes de correlación (R^2) según análisis del efecto de ENOS sobre el índice estandarizado.

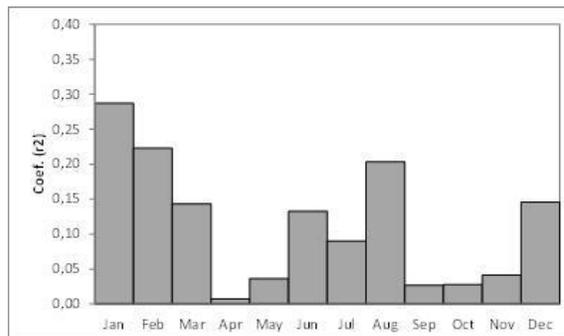
Grupo 1: Estaciones

Aeropuerto
Ginebra
PTAR
San Marcos



Grupo 2: Estaciones

Albania
Auji
Austria
Bellavista
Caseteja
Corpoica
El Diamante
La Ceja
La Sirena
Las Mirlas
Planta Nima
Pradera
San Emigdio
San Nicolás



Grupo 3: Estaciones

Amberes
La Betulia
La Montañita
La Selva
Amaime
Arroyohondo
Candelaria
Guacarí
La Rita
San José

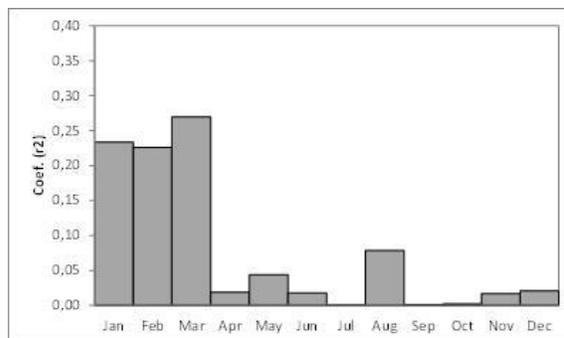


Tabla 4. Coberturas vegetales y usos de la tierra para valoración de indicadores de amenaza antrópica en la cuenca del río Amaime en el departamento del Valle del Cauca. (Colombia).

Unidad de cobertura de la tierra *	Extensión Area (Ha) (%)	Indicadores Calidad Vegetación						Indice Calidad Vegetación		Uso intensivo del suelo		Indice Amenaza Antrópica (AA)		
		Riesgo a fuego	Protección a la erosión	Resistencia a la sequía	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase
2.1. Cultivos transitorios. 2.1 Cereales, Oleaginosas y leguminosas, Hortalizas, Tubérculos, Otros cultivos transitorios.	342.9	0.33	2	Muy Alto	1.8	Baja	2	Baja	1.9	Baja	2	Alto	1.97	Alta
	36933.7	35.41	2	Muy Alto	1.8	Baja	2	Baja	1.9	Baja	2	Alto	1.97	Alta
2.2 Cultivos permanentes. 2.2.1 Cultivos permanentes herbáceos: Caña, Plátano y banano, Tabaco, Papaya, Otros cultivos permanentes herbáceos.	16196.4	15.53	2	Muy Alto	2	Muy baja	2	Baja	2	Baja	2	Alto	2.00	Alta
	25.8	0.02	2	Muy Alto	2	Muy baja	2	Baja	2	Baja	2	Alto	2.00	Alta
	3628.9	3.48	2	Muy Alto	2	Muy baja	2	Baja	2	Baja	2	Alto	2.00	Alta
2.3. Pastos. 2.3.1. Pastos limpios. 2.3.2. Pastos arbolados. 2.3.3. Pastos enmalezados.	133.6	0.13	1.3	Moderado	1.6	Moderada	1.6	Moderada	1.5	Baja	2	Alto	1.73	Alta
	2613.7	2.51	1.3	Moderado	1.6	Moderada	1.6	Moderada	1.5	Baja	2	Alto	1.73	Alta
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas. 2.4.1. Mosaico de cultivos. 2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos 2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales. 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales.	5049.1	4.84	1.3	Moderado	1.6	Moderada	1.6	Moderada	1.5	Baja	1.3	Moderado	1.39	Media
	2819.9	2.7	1.6	Alto	1.6	Moderada	1.6	Moderada	1.6	Baja	1.3	Moderado	1.44	Media
3.1. Bosques. 3.1.1. Bosque denso: alto de tierra firme, alto inundable, bajo de tierra firme, bajo inundable. 3.1.3. Bosque fragmentado. 3.1.5. Plantación forestal	13174.4	12.63	1.6	Alto	1	Muy alta	1	Alta	1.2	Media	1	Bajo	1.08	Baja
	1585.8	1.52	1.6	Alto	1	Muy alta	1	Alta	1.2	Media	1	Bajo	1.08	Baja
	2864.5	2.75	1.6	Alto	1.6	Moderada	1.6	Alta	1.6	Baja	1.3	Moderado	1.44	Media
3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva. 3.2.1.1. Herbazal denso: de tierra firme no arbolado, arbolado, con arbustos; no arbolado, inundable, inundable arbolado, Arracachal, Helechal. 3.2.2.1. Arbustal denso. 3.2.2.2. Arbustal abierto. 3.2.3. Vegetación secundaria o en transición.	10616.6	10.18	1.6	Alto	1	Muy alta	1	Alta	1.2	Media	1	Bajo	1.08	Baja
	2338.9	2.24	1.6	Alto	1	Muy alta	1	Alta	1.2	Media	1	Bajo	1.08	Baja
	1195.5	1.15	1.6	Alto	1.3	Alta	1	Alta	1.3	Media	1	Bajo	1.13	Baja
3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación. 3.3.1. Tierras desnudas y degradadas 3.3.3. Vegetación secundaria o en transición.	2710.8	2.6	1.6	Alto	1.3	Alta	1	Alta	1.3	Media	1	Bajo	1.13	Baja
	196.7	0.19	1	Bajo	2	Muy baja	2	Baja	1.6	Baja	1	Bajo	1.26	Media

* IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000.

C. Anexo C: Vulnerabilidad edáfica a desertificación en la Cuenca del río Amaime (Valle del Cauca – Colombia).

Tabla 5. Vulnerabilidad edáfica a desertificación partir de indicadores de calidad de suelos en regiones de análisis de riesgo a desertificación (RARD) presentes en la cuenca del río Amaimé.

Región de análisis de riesgo a desertificación (RARD)		Índices de Vulnerabilidad Estimados						Región de análisis de riesgo a desertificación (RARD)		Índices de Vulnerabilidad Estimados													
Símbolo	Unidad cartográfica	Exposición	Capacidad de resistencia a degradación			Vulnerabilidad del suelo a desertificación	Área (%)	Símbolo	Unidad cartográfica	Exposición	Capacidad de resistencia a degradación			Vulnerabilidad del suelo a desertificación	Área (%)								
			Valor	Clase	Valor						Clase	Valor	Clase			Valor	Clase						
MLB	Asociación	1.41	Media	0.95	Baja	0.89	Alta	1.48	Alta	1.48	Alta	0.2	MLE	Consociación	1.56	Alta	1.00	Baja	1.44	Media	1.12	Baja	0.5
MLC	Asociación	1.39	Media	1.17	Media	1.07	Alta	1.50	Alta	1.50	Alta	23.1	MQH	Asociación	1.24	Media	1.01	Baja	1.18	Media	1.06	Baja	0.1
MILD	Asociación	1.55	Alta	1.17	Media	0.83	Alta	1.89	Alta	1.89	Alta	3.5	MQI	Complejo	1.36	Media	1.00	Baja	1.44	Media	0.91	Baja	0.5
AM	Consociación	1.60	Alta	1.00	Baja	1.00	Alta	1.60	Alta	1.60	Alta	1.6	MQJ	Complejo	1.44	Media	1.09	Baja	1.55	Baja	0.98	Baja	0.0
RC	Consociación	1.56	Alta	1.31	Media	1.36	Media	1.50	Alta	1.50	Alta	0.4	CE	Consociación	1.21	Media	1.00	Baja	1.24	Media	0.96	Baja	0.1
Promedio Clase Alta	Alta	1.50	Alta	1.12	Baja	1.03	Alta	1.59	Alta	1.59	Alta	28.8	ES	Consociación	1.32	Media	1.00	Baja	1.44	Media	0.88	Baja	0.1
MGA	Inasociación	1.44	Media	1.09	Baja	1.34	Media	1.19	Media	1.19	Media	4.8	SO	Consociación	1.31	Media	1.00	Baja	1.33	Media	0.98	Baja	0.1
MGB	Inasociación	1.44	Media	1.09	Baja	1.34	Media	1.19	Media	1.19	Media	2.3	(CE-NM)	Consociación	1.31	Media	1.00	Baja	1.36	Media	0.94	Baja	0.1
MILA	Asociación	1.26	Media	1.02	Baja	0.94	Alta	1.33	Media	1.33	Media	4.3	(AR-PR)	Complejo	1.21	Media	1.00	Baja	1.27	Media	0.94	Baja	0.0
MLF	Asociación	1.47	Alta	1.00	Baja	1.08	Alta	1.39	Media	1.39	Media	0.4	(ES-PR)	Complejo	1.32	Media	1.00	Baja	1.44	Media	0.88	Baja	0.1
MILG	Asociación	1.46	Alta	1.00	Baja	1.29	Media	1.17	Media	1.17	Media	0.6	(NM-PR)	Complejo	1.21	Media	1.00	Baja	1.27	Media	0.94	Baja	0.2
MQD	Asociación	1.22	Media	0.98	Baja	0.93	Alta	1.27	Media	1.27	Media	2.6	GN	Consociación	1.25	Media	1.00	Baja	1.62	Baja	0.63	Baja	0.2
MRC	Asociación	1.23	Media	1.09	Baja	1.08	Alta	1.24	Media	1.24	Media	5.8	(FL-GN)	Complejo	1.25	Media	1.00	Baja	1.62	Baja	0.63	Baja	0.1
MVA	Asociación	1.48	Alta	1.04	Baja	1.25	Media	1.27	Media	1.27	Media	0.02	GL	Consociación	1.21	Media	1.31	Baja	1.55	Baja	0.97	Baja	5.2
PRA	Asociación	1.33	Media	0.90	Baja	0.98	Alta	1.24	Media	1.24	Media	1.0	PR	Consociación	2.21	Media	2.00	Baja	1.27	Baja	0.94	Baja	0.4
(AR-NM)	Complejo	1.52	Alta	1.00	Baja	1.21	Media	1.31	Media	1.31	Media	0.1	(GL-PS)	Asociación	1.40	Media	1.00	Baja	1.55	Baja	0.85	Baja	0.9
AR	Consociación	1.52	Alta	1.00	Baja	1.21	Media	1.31	Media	1.31	Media	1.1	GU	Consociación	1.44	Media	1.00	Baja	1.33	Media	1.11	Baja	4.1
CT	Consociación	1.58	Alta	1.31	Media	1.44	Media	1.45	Media	1.45	Media	0.03	(GL - PM)	Complejo	1.21	Media	1.00	Baja	1.55	Baja	0.66	Baja	0.7
LF	Consociación	1.59	Alta	1.26	Media	1.66	Baja	1.19	Media	1.19	Media	0.5	(PL - GU)	Complejo	1.44	Media	1.00	Baja	1.33	Media	1.11	Baja	0.2
FL	Consociación	1.56	Alta	1.00	Baja	1.24	Media	1.31	Media	1.31	Media	1.7	JN	Consociación	1.81	Alta	1.00	Baja	1.71	Baja	1.10	Baja	0.1
RL	Consociación	1.62	Alta	1.00	Baja	1.19	Media	1.43	Media	1.43	Media	0.9	NM	Consociación	1.30	Media	1.00	Baja	1.36	Media	0.94	Baja	1.7
JR	Consociación	1.50	Alta	1.00	Baja	1.27	Media	1.23	Media	1.23	Media	0.1	Promedio Clase baja	Alta	1.37	Media	1.06	Baja	1.41	Media	0.93	Baja	15.7
MIN	Consociación	1.56	Alta	1.00	Baja	1.21	Media	1.35	Media	1.35	Media	6.0	Promedio de la Cuenca	Alta	1.45	Alta	1.06	Baja	1.27	Media	1.22	Media	
PL	Consociación	1.56	Alta	1.00	Baja	1.21	Media	1.35	Media	1.35	Media	6.8	Promedio zona montañosa	1.39	Media	1.04	Baja	1.16	Media	1.26	Media	49.5	
PM	Consociación	1.44	Media	1.00	Baja	1.16	Media	1.28	Media	1.28	Media	1.8	Promedio zona Plana	1.50	Alta	1.05	Baja	1.38	Media	1.18	Media	39.4	
(MN - PL)	Complejo	1.56	Alta	1.00	Baja	1.21	Media	1.35	Media	1.35	Media	1.1	Promedio	Alta	1.48	Alta	1.07	Baja	1.26	Media	1.30	Media	43.9
SC	Consociación	1.62	Alta	1.14	Media	1.36	Media	1.40	Media	1.40	Media	0.1											
CL	Consociación	1.65	Alta	1.26	Media	1.76	Baja	1.15	Media	1.15	Media	0.3											
PS	Consociación	1.56	Alta	1.26	Baja	1.51	Baja	1.31	Media	1.31	Media	1.4											
(FL-GU)	Complejo	1.44	Media	1.31	Media	1.33	Media	1.42	Media	1.42	Media	0.5											

Bibliografía

ABRAHAM E. Y SALOMÓN, M. 2006. Indicadores y puntos de referencia de la desertificación utilizados en Argentina por diversos usuarios. En: ABRAHAM E. y BEEKMAN G. Indicadores de la desertificación para América del sur. (IICA-BID ATN JF 7905 - RG). Mendoza – Argentina. 347 p.

ADAMO S., y CREWS-MEYER K. 2006. Aridity and desertification: Exploring environmental hazards in Jáchal, Argentina. *Applied Geography* 26: 61–85.

ADGER, N. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change* 16: 268–281.

ALFARO C., W. 2005. Conceptos básicos para el análisis social, económico, ambiental e institucional de la desertificación. En: MORALES, C. Y PARADA S. Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. CEPAL. Santiago de Chile. Pág. 59 – 88.

ALKHARABSHEH M., ALEXANDRIDIS T., BILAS G., MISOPOLINOS N., SILLEOS N. 2013. Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS. *Procedia Environmental Sciences* 19: 912 – 921.

ALLINGTON G., y VALONE T. 2010. Reversal of desertification: The role of physical and chemical soil properties. *Journal of Arid Environments* 74: 973–977.

AMEZKETA E. 2006. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. *Journal of Arid Environments*. 67: 594–606

ANDREWS S., KARLEN, y CAMBARDELLA, C. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1945–62.

ANCONA V., BRUNO D., LOPEZ N., PAPPAGALLO G., URICCHIO V. 2010. A Modified Soil Quality Index to Assess the Influence of Soil Degradation Processes on Desertification Risk: The Apulia Case. *Ital. J. Agron. / Riv. Agron.*, 3 Suppl.:45-55.

ANTWI-AGYEI P., FRASER E., DOUGILL A., STRINGER L., SIMELTON E. 2011. Mapping the vulnerability of crop production to drought in Ghana using rainfall, yield and socioeconomic data. *Applied Geography* 32: 324-334.

ASEFA, T., CLAYTON, J., ADAMS, A., ANDERSON, D., 2013. Performance Evaluation of a Water Resources System under Varying Climatic Conditions: Reliability, Resilience, Vulnerability and Beyond. *Journal of Hydrology*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.043>.

BAKR, N., WEINDORF D., BAHNASSY M., EL-BADAWI, M. 2012. Multi-temporal assessment of land sensitivity to desertification in a fragile agro-ecosystem: Environmental indicators. *Ecological Indicators* 15 : 271–280.

BANCO MUNDIAL (World Bank Organization - WBO). 2008. Manejo sostenible de la tierra: desafíos, posibilidades y costos de oportunidad. Primera ed. en español. Mayol Ediciones S.A. Bogotá. Colombia. 130p.

BARBERO-SIERRA, C., MARQUES M., RUÍZ-PÉREZ, M. 2013. The case of urban sprawl in Spain as an active and irreversible driving force for desertification. *Journal of Arid Environments* 90: 95 – 102.

BARROW, C. 1994. Land Degradation: development and breakdown of terrestrial environments. Cambridge University Press. Great Britain. 295p.

BASSO, F., BOVE, E., DUMONTET, S., FERRARA, A., PISANTE, M., QUARANTA, G. y 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). *Catena* 40: 19–35.

- BOUMA, N., e IMESON A. (2000). Investigation of relationships between measured field indicators and erosion processes on badland surfaces at Petrer, Spain. *Catena*, 40: 147-171.
- BOY-ROURA M., NOLAN B., MENCIO A., MAS-PLA J. 2013. Regression model for aquifer vulnerability assessment of nitrate pollution in the Osona region (NE Spain). *Journal of Hydrology* 505: 150–162.
- BRANDT, J., GEESON, N. e IMESON, A. 2003. A desertification indicator system for Mediterranean Europe. DESERTLINKS Project. King's College London. UK. 79p.
- BUITRAGO ESCOBAR, J. 2011. Desarrollo de un modelo de visualización de erosión hídrica en el municipio de Samacá (Boyacá). Estudio de caso. Tesis M. Sc. en Geomática. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. 120 p.
- CARDONA A., O. 2003. La manera de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Ponencia International work conference on vulnerability in disaster theory and practice. Wageningen, Holanda.
- CARDONA A., O. 2001. Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Universidad politécnica de Cataluña. Tesis Ph. D.
- CÉCILLON, L., CASSAGNE, N., CZARNES, S., GROS, R., VENNETIER, M., BRUN, J., 2009. Predicting soil quality indices with near infrared analysis in a wildfire chronosequence. *Science Of The Total Environment* 407: 1200 – 1205
- COLLADO, A., CHUVIECO, E. y CAMARASA, A. 2002. Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop–rangeland boundary of Argentina. *Journal of Arid Environments* 52: 121–133.
- CONTADOR, J., SCHNABEL, S., GUTIÉRREZ, A., FERNÁNDEZ, M., 2009. Mapping sensitivity to land degradation in Extremadura, SW Spain. *Land Degrad. Dev.* 20: 129–144.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC. 2007. Balance Oferta – Demanda de agua superficial Cuenca del Río Amaime. Memoria Técnica. Dirección técnica ambiental grupo de recursos hídricos. Cali, Colombia. <http://www.cvc.gov.coportalimagesCVCRecurso>.
- _____CVC. 1999. Sistema de información geográfica de la unidad de manejo de cuenca Amaime – Nima – Cerrito “Memoria Técnica”. Cali, Colombia. 170 p.
- CORTES, A., y MALAGON, C. 1984. Los levantamientos agrologicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 360 p.
- CORTEZ, A., RODRIGUEZ M., REY, J., LOBO, D., PARRA, R., OVALLES, F., GABRIELS, D. 2011. Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. II Región noroccidental. *Bioagro* 23 (1): 13-18.
- 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. 102 p.
- DAWELBAIT, M. y MORARI, F. 2012. Monitoring desertification in a Savannah region in Sudan using Landsat images and spectral mixture analysis. *Journal of Arid Environments* 80: 45-55.
- del BARRIO G., PUIGDEFABREGAS, J., SANJUAN, M., STELLMES M., RUIZ A. 2010. Assessment and monitoring of land condition in the Iberian Peninsula, 1989–2000. *Remote Sensing of Environment* 114: 1817–1832.
- DE LANGE H., SALA S., VIGHI M., FABER J. 2010. Ecological vulnerability in risk assessment — A review and perspectives. *Science of the Total Environment* 408: 3871–3879.
- de PAUL OBADE V., y LAL R. 2013. Assessing land cover and soil quality by remote sensing and geographical information systems (GIS). *Catena* 104 (2013) 77–92.
- D'ODORICO P., BHATTACHAN A., DAVIS K., RAVI S, RUNYAN C. 2013. Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources* 51: 326–344.
- DREGNE, H. 2002. Land degradation in the drylands. *Arid Land Research and Management* 16: 99–132.
- DRYLAND SCIENCE FOR DEVELOPMENT CONSORTIUM (DSD). 2009. Integrated Methods for Monitoring and Assessing Desertification/Land Degradation Processes and Drivers (Land Quality). DRAFT White Paper of DSD Working Group 1. Version 2. 173 p. <http://www.drylandscience.org>.
- DORAN, J. y PARKIN, T. 1994. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. and COLEMAN. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA spec Publ 35. SSSA and ASA. Madison. WI. USA. pp 3-21.

- DUNJÓ, G. (2004). Developing a desertification indicator system for a small Mediterranean catchment: A case study from the Serra de Rodes, Alt Empordà, Catalunya, NE Spain. Tesis Doctoral. Universitat de Girona, 406 pp.
- ECHEVERRI L., y OBANDO F. 2010. Erosividad de las lluvias en la región centro-sur del departamento de Caldas, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, Vol. 63, núm. 1.
- EVANS, J., y GEERKEN, R., 2004. Discriminating between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments* 57: 535–554.
- EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMA DEL MILENIO (MEA). 2005. Ecosistemas y bienestar humano: Síntesis sobre Desertificación. World Resources Institute, Washington, DC. 36 p.
- FARAGE, P., ARDÖ, J., OLSSON, L., RIENZI, E., BALL, A., PRETTY, J. 2007. The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modelling approach. *Soil & Tillage Research* 94: 457–472.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). 2011. Land Degradation Assessment in Drylands: Manual for Local Level Assessment of Land Degradation and Sustainable Land Management. Part 1: Planning and Methodological Approach, Analysis and Reporting. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO. 2003. Data sets, indicators and methods to assess land degradation in drylands. *World soil resources reports No 100*. 106 p.
- FERRARA A., SALVATI L, SATERIANO A., NOLÈA A. 2012. Performance evaluation and cost assessment of a key indicator system to monitor desertification vulnerability. *Ecological Indicators* 23: 123–129.
- FLORINSKY, I. 2008. Applications of Terrain Analysis. *Global Lineaments: Application of Digital Terrain Modelling*. En: *Advances in Digital Terrain Analysis*. Qiming Zhou · Brian Lees · Guo-an Tang (Eds.) Springer- Verlag Berlin Heidelberg.
- GABRIELS, D. y LOBO, D. 2012. Desertificación y sequía. *Memorias Escuela latinoamericana de física de suelos*. julio de 2012. Medellín – Colombia.
- GABRIELS, D., VERMEULEN, A., VERBIST, K., VAN MEIRVENNE, M., 2003. Assessment of rain erosivity and precipitation concentration in Europe. In: Gabriels D., Cornelis W. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium, 25 Years of Assessment of Erosion, 22–26 September, Ghent, Belgium*, pp. 87–92.
- GARCÍA GONZÁLEZ, M. 2007. Régimen e índice de aridez de Colombia. Participación de Colombia en el Proyecto Regional del Mapa de Zonas Áridas. Tesis M. Sc. en Ingeniería. Universidad del Valle. 101 p.
- GEIST, H. y LAMBIN, F. 2004. Dynamic Causal Patterns of Desertification. *BioScience*. Vol. 54 . No. 9. 817- 829.
- GLENN, E., STAFFORD SMITH, M., SQUIRES, V. 1998. On our failure to control desertification: implications for global change issues, and a research agenda for the future. *Environmental Science and Policy* 1: 71 – 78.
- HABOUDANE, D., BONN F., ROYER A. 2002. Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally based information and digital geomorphometric attributes. *International Journal of Remote Sensing*. 23 (18): 3795–3820.
- HAMED, K. 2008. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *J. Hydr.* 349: 350-363.
- HELLDEN, U., y TOTTRUP, C. 2008. Regional desertification: A global synthesis. *Global and Planetary Change* 64: 169–176.
- HOYOS, N. 2005. Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Catena*. 63, 85–108.
- HUANG, D., WANG, K., WU, W.L. 2007. Dynamics of soil physical and chemical properties and vegetation succession characteristics during grassland desertification under sheep grazing in an agro-pastoral transition zone in Northern China. *Journal of Arid Environments* 70: 120–136.
- IBÁÑEZ J., MARTÍNEZ VALDERRAMA J., PUIGDEFÁBREGAS J. 2008. Assessing desertification risk using system stability condition analysis. *ecological modelling* 213 : 180–190.
- IMESON, A. 2012. *Desertification, Land Degradation and Sustainability*. John Wiley & Sons, Inc. UK. 331 p.
- INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI (IGAC). 2003. Mapa de zonas agroecológicas, vocación de la tierra, uso actual y conflictos de uso. Estudio escala 1: 500.000. Bogotá.
- (IGAC). 1995. *Suelos de Colombia, Origen, Evolución, Clasificación, Distribución y Uso*. Subdirección de Agrología. Santafé de Bogotá, Colombia. 632 p.

----- (IGAC) y CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA (CVC). 2004. Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca. Santafé de Bogotá, Colombia. 775p.

----- (IGAC), INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA 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. 152 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). 2010. Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100,000. Bogotá, D. C., 72p.

----- (IDEAM) y MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - MAVDT. 2003. Elementos de diagnóstico y recomendaciones de acción para ser incluidos en el PAN de Colombia. Fase I. Bogotá D.C., Colombia.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: a Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. University Press, Cambridge.

----- (IPCC). 2007. Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge. University Press, Cambridge, UK.

----- (IPCC). 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

JARAMILLO R., A. 2006. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. *Cenicafé* 57(4):288-298.

JORDAN, G. 2008. Digital Terrain Analysis in a GIS Environment: Concepts and Development. pp 1-43 En: Peckham, R.J.; Jordan, G. 2008. Digital Terrain Modelling: Development and Applications in a Policy Support Environment. Springer. pp 313.

KASSAS M. 1995. Desertification: a general review. *Journal of Arid Environments* 30: 115-128.

KIRKBY, M. AND C. KOSMAS (1999). Introduction. In: KOSMAS, C.; KIRKBY, M.; GEESON, N. (eds.), The Medalus project: Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. Project report. European Commission.

KOSMAS, C., KIRKBY, M. y GEESON, N. 1999. The Medalus project – Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities – V, 87p.

KOSMAS C., GERONTIDIS S., MARATHIANOU, M. 2000. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesvos (Greece). *Catena* 40: 51–68.

LAND DEGRADATION ASSESSMENT OF DRYLANDS (LADA). 2003. Stocktaking of Dryland Biodiversity Issues in the Context of the Land Degradation Assessment of Drylands (LADA): Selection and Use of Indicators and Methods for Assessing Biodiversity and Land Condition. Draft 28 July. 84p.

LAL, R., 2002. Soil carbon dynamics in crop land and rangeland. *Environ. Poll.* 116: 353–362.

----- 1998. Soil quality and agricultural sustainability. En: LAL, R. Soil quality and agricultural sustainability. P 3. Chelsea, Michigan. Ann Arbor Press.

-----1994. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. USDA. SMSS. Monografía técnica No 21. Departamento de Agronomía. Ohio State University. Columbus, Ohio. Trad. 96p.

LE HOUÉROU, H. 1996. Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments* 34: 133–185.

LEIVA GUTIÉRREZ, N. 2012. 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. Tesis M. Sc. en Geomática. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. 124 p.

LEÓN, G., ZEA J. y ESLAVA J. 2000. Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorología Colombiana* 1:31-38.

LIN, H., KOGELMANN W., WALKER C., BRUNS M. 2006. Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydrogeological perspective. *Geoderma*.131, 345–368.

LOBO. D. 2004. Guía Metodológica para la Delimitación del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas Secas de América Latina y el Caribe. Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe – CAZALAC – UNESCO PHI – Gobierno de Flandes. 54p.

LÓPEZ, D. 2006. Desarrollo e Implementación de un Modelo para la Clasificación Automática de Unidades de Relieve a partir de Modelos Digitales de Elevación. Tesis de Maestría en Geomática. Centro de Investigación en Geografía y Geomática —Ing. Jorge L. Tamayo — A.C. CentroGeo Mexico, D. F.

MARTÍNEZ-SÁNCHEZ M., PÉREZ-SIRVENT C., MOLINA-RUIZ J., TUDELA M., GARCÍA-LORENZO M. 2011. Monitoring salinization processes in soils by using a chemical degradation indicator. *Journal of Geochemical Exploration* 109: 1–7.

MARCIAL, R. 2001. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en los servicios ambientales hidrológicos de la comunidad de Capulalpam de Méndez.

MATALLO H. 2005. Algunas cuestiones relativas a la economía de la desertificación. En: MORALES, C. Y PARADA S. Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. CEPAL. Santiago de Chile. Pág. 113-138.

McCARTHY, J., CANZIANI, O., LEARY, N., DOKKEN, D. Y WHITE, K. 2001. *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.

McKEE, T., DOESKEN, N., KLESIT, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales: Proceedings Eighth Conference on Applied Climatology (p. 6), 17–22 January, Anaheim, CA.

METZGER, M. y SCHROTER, D., 2006. Towards a spatially explicit and quantitative vulnerability assessment of environmental change in Europe. *Regional Environmental Change* 6: 201–216.

MILEVSKI, I., DRAGICEVIC, S., KOSTADINOV, S. 2007. Digital elevation model and satellite images an assessment of soil erosion potential in the Pucinja catchment. *Bulletin of the Serbian geographical society*. tome lxxxvii – No. 2 11-20.

MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - MAVDT. 2005. Plan de Acción Nacional. Lucha contra la desertificación y la sequía en Colombia. Bogotá. Colombia. UNCCD - PNUD. 137p.

MORALES, C. y PARADA S. 2005. Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. CEPAL. Santiago de Chile. 273p.

MOORE, I., GRAYSON R., LADSON A. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological: Geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*. 5, 3-30.

MUNAR, O. J. 2010. Determinación del potencial de los modelos digitales de elevación como fuente de datos para la evaluación de la aptitud de las tierras. Caso del cultivo de mango. Tesis de Maestría en Geomática. Facultad de Agronomía. Universidad nacional de Colombia sede Bogotá. Colombia.

MUNICIPIO DEL PALMIRA y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2006. Diagnóstico integral del uso del suelo y el agua y sus repercusiones en la degradación de las cuencas hidrográficas de los ríos Nima, Amaime y Agua clara, municipio de Palmira, departamento del Valle del Cauca. Planeación Municipal, Unidad Medio Ambiental Municipio de Palmira (UMMA) y Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 102 p.

NACHTERGAELE, F. y LICONA, C., 2009. The Land Degradation Assessment in Drylands (LADA) Project: Reflections on Indicators for Land Degradation assessment. In: *The Future of Drylands*, C. Lee & T. Schaaf (Eds.), Springer Netherlands: 27-348. <http://www.springerlink.com/content/h66615wwlp57371>.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). 2014. Drought – Public Fact Sheet. National Weather Service – USA. <http://www.nws.noaa.gov/om/brochures/climate/DroughtPublic2.pdf>.

NEWTON, A. y WEICHSELGARTNER, J. 2013. Hotspots of coastal vulnerability: A DPSIR analysis to find societal pathways and responses, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.10.010>.

OBA, G., WELADJI, R., MSANGAMENO, D., KAITIRA, L., STAVE, J. 2008. Scaling effects of proximate desertification drivers on soil nutrients in northeastern Tanzania. *Journal of Arid Environments* 72 1820– 1829.

OHLMACHER, G. 2007. Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Engineering Geology*. 91: 117–134.

OLAYA, V. 2009. Basic Land-Surface Parameters. Pp: 141-169 In: HENGL, T., REUTER H., 2009. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science. Volume 33 Elsevier. Pp 756.

- PARADA, S. 2005. El sistema de indicadores socioeconómicos de la desertificación. En: MORALES, C. Y PARADA S. Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. CEPAL. Santiago de Chile. Pág. 139 – 149.
- PEÑA A., ARCE B., BOSHELL F., PATERNINA M., AYARZA M., y ROJAS E. 2011. Trend analysis to determine hazards related to climate change in the Andean agricultural areas of Cundinamarca and Boyacá. *Agronomía Colombiana* 29(2), 275-285.
- PEÑA, A., E. CORTÉS Y F. MONTEALEGRE. 2001. Incidencia de los fenómenos “El Niño” y “La Niña” sobre las condiciones climáticas en el valle del río Cauca. Parte I: Análisis climatológico. *Meteorología Colombiana* 3:103-118.
- PERINI, L., CECCARELLI, T., ZITTI M., SALVATI L. 2009. Insight desertification process: bio-physical and socio-economic drivers in Italy. *Italian Journal of Agrometeorology* (3): 45-55
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA). 2002. *Perspectivas del medio ambiente mundial*. GEO- 3. Trad. Grupo Mundi-Prensa Libros. Madrid. 446 p.
- (PNUMA). 1997. *Atlas Mundial de la Desertificación*. Nick Middleton y David Thomas (eds.). Oxford. Oxford University Press.
- PUIGDEFÁBREGAS J. Y MENDIZABAL T. 1998. Perspectives on desertification: western Mediterranean. *Journal of Arid Environments* 39: 209–224.
- QIU, Y., FU B., WANG J., CHEN L. 2001. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*. 240: 243–263.
- RANDRIAMIARINA, D. 2009. Synthetic report regional consultations on methodologies related to the minimum set of impact indicators to measure progress in the implementation of strategic objectives 1, 2 and 3 of the UNCCD 10-year strategic plan. Consultancy report. UNCCD. Bonn. 24 p.
- RASMY M., GAD A., ABDELSALAM H., SIWAILAM. 2010. A dynamic simulation model of desertification in Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 13: 101–111
- REYNOLDS, J., STAFFORD, SMITH, D., LAMBIN, E., TURNER, B., MORTIMORE, M., BATTERBURY, S., DOWNING, T., DOWLATABADI, H., FERNANDEZ, R., HERRICK, E., HUBER-SANNVALD, E., LEEMANS, R., LYNAM, T., MAESTRE, F., AYARZA, M., WALKER, B., 2007. Global desertification: building a science for dryland development. *Science* 316: 847–851.
- REED M., PODESTA G., FAZEY I., GEESON N., HESSEL R., HUBACEK K., LETSON D., NAINGGOLAN D., PRELL C., RICKENBACH M., RITSEMA C., SCHWILCH G., STRINGER L., THOMAS A. 2013. Combining analytical frameworks to assess livelihood vulnerability to climate change and analyse adaptation options. *Ecological Economics* 94 : 66–77
- RUBIANO SANABRIA, Y. 2005. GEOSOIL. Sistema georeferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo a la planificación, uso y manejo del suelo. Tesis Ph. D. Ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. 220 p.
- SALVATI L. y BAJOCCO S. 2011. Land sensitivity to desertification across Italy: Past, present, and future. *Applied Geography* 31: 223 – 231.
- SALVATI L., BAJOCCO S., CECCARELLI, T., ZITTI M., PERINI, L. 2011. Towards a process-based evaluation of land vulnerability to soil degradation in Italy. *Ecological Indicators* 11: 1216–1227.
- SALVATI, L., ZITTI, M., 2009. Assessing the impact of ecological and economic factors on land degradation vulnerability through multiway analysis. *Ecological Indicators* 9: 357–363.
- SANTINI M., CACCAMO G., LAURENTI A., NOCE S., VALENTINI R. 2010. A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index. *Applied Geography* 30: 394–415.
- SCHRÖTER, D., CRAMER, W., LEEMANS, R., PRENTICE, I., ARAUJO, M., ARNELL, N., BONDEAU, A., BUGMANN, H., CARTER, T., GRACIA, C., DE LA VEGALEINERT, A., ERHARD, M., EWERT, F., GLENDINING, M., HOUSE, J., KANKAANPAA, S., KLEIN, R., LAVOREL, S., LINDNER, M., METZGER, M., MEYER, J., MITCHELL, T., REGINSTER, I., ROUNSEVELL, M., SABATE, S., SITCH, S., SMITH, B., SMITH, J., SMITH, P., SYKES, M., THONICKE, K., THUILLER, W., TUCK, G., ZAEHLE, S., ZIERL, B. 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310, 1333–1337.
- SIVAKUMAR, MANNAVA V. Y NDEGWA N. 2007. *Climate and Land Degradation*. Environmental Science and Engineering Series XXVI, Ed. Springer-Verlag, Berlín-Heidelberg.
- SULEBAK, J., TALLAKSEN L., ERICHSEN B. 2000. Estimation of areal soil moisture by use of terrain data. *Geography Annales*. 82 (1): 89-105

- TUCK, G., ZAEHLE, S., ZIERL, B., 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310, 1333–1337.
- TURNER B., KASPERSON R, MATSON P., MCCARTHY J., CORELL R., CHRISTENSEN L., ECKLEYG, N., KASPERSONB J., LUERSE A., MARTELLOG M., POLSKYA C., PULSIPHERA A., y SCHILLERBET A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc. Natl. Acad. Sci.*: 100:8074–9.
- UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION (UNCCD). Secretariat. 2013. A Stronger UNCCD for a Land-Degradation Neutral World, Issue Brief, Bonn, Germany. 20 p.
- UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION (UNCCD). 1994. United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. United Nations Environment Programme (UNEP). Geneva.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). 1997. World Atlas of Desertification. 2a. edition. Middleton N. and Thomas D. (Eds.). 182 p.
- UNIVERSIDAD DEL VALLE (UNIVALLE). 2006. Caracterización de Ríos Tributarios del Río Cauca. Capítulo 3. Características generales de los rios tributarios. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Cali – Colombia. 28 p.
- VERBIST, K., SANTIBAÑEZ, F., GABRIELS, D. y SOTO, G. 2010. Atlas de Zonas Áridas de América Latina y El Caribe. Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe (CAZALAC). Documentos Técnicos del PHI-LAC. 54 p.
- VERÓN S., PARUELO J., OESTERHELD M. 2006. Assessing desertification. *Journal of Arid Environments* 66: 751–763.
- WASWA B., VLEK P., TAMENE L., OKOTH P., MBACKAYA D., ZINGORE S. 2013. Evaluating indicators of land degradation in smallholder farming systems of western Kenya. *Geoderma* 195–196: 192–200.
- WESSELS, K., PRINCE, S., MALHERBE, J., SMALL, J., FROST, P., VANZYL, D. 2007. Can human induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments* 68: 271–297.
- WILSON, J.; GALLANT, J. 2000. *Terrain Analysis: Principles and Application*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- World Meteorological Organization (WMO). 2005. Climate and land degradation. WMO No-989, Geneva, 32 p.
- XU, D., KANG, X., ZHUANG, D., PAN, J. 2010. Multi-scale quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification – A case study of the Ordos Plateau, China. *Journal of Arid Environments* 74: 498–507.
- YANG, X., DING, Z., FAN, X., ZHOU, Z., MA, N., 2007. Processes and mechanism of desertification in northern China during the last 30 years, with a special reference to the Hunshadake Sandy Land, eastern Inner Mongolia. *Catena* 71, 2–12.
- YIRAN G., KUSIMI J., KUFOGBE S. 2012. A synthesis of remote sensing and local knowledge approaches in land degradation assessment in the Bawku East District, Ghana. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14: 204–213.
- ZHAO, H., HUI, Y., LIAN, R., ZHONG, Y., QIANG, Y., DRAKE, S. 2009. Effects of desertification on soil organic C and N content in sandy farmland and grassland of Inner Mongolia. *Catena* 77: 187–191
- ZIKA M., y ERB K. 2009. The global loss of net primary production resulting from human-induced soil degradation in drylands. *Ecological Economics* 69: 310–318.
- ZORNOZA, R., MATAIX-SOLERA, J., GUERRERO, C., ARCENEGUI, V., MAYORAL, A., MORALES, J., MATAIX-BENEYTO, J. 2007. Soil properties under natural forest in the Alicante Province of Spain. *Geoderma* 142: 334–341.
- ZUCCA C., DELLA PERUTA R., SALVIA, R., SOMMER S., CHERLET M. 2012. Towards a World Desertification Atlas. Relating and selecting indicators and data sets to represent complex issues. *Ecological Indicators* 15: 157–170.
- ZUCCA C., BIANCALANI, R., HAMROUNI, H., ATTIA, R., BUNNING, S. 2009. Guidelines for the identification, selection and description of nationally based indicators of land degradation and improvement. *Land Degradation Assessment in Drylands. LADA Project*. 57p.