

Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica

Water erosion, fundamentals, evaluation and cartographic representation: a review with an emphasis on the use of remote sensing and Geographic Information Systems

Cristopher Camargo^{1, 4}, Carlos Pacheco², Roberto López³

RESUMEN

Este documento presenta una perspectiva general del estado actual del conocimiento de la degradación del suelo por la erosión hídrica, con énfasis en su evaluación y representación cartográfica. Se incluyen fundamentos y aspectos históricos de mayor relevancia y se explican las diversas categorías metodológicas empleadas en su estudio y evaluación, con algunas experiencias de aplicación. Se destaca la importancia del uso de los sensores remotos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Sobre los primeros se discute el uso de las imágenes satelitales, de importante apoyo cualitativo y cuantitativo para investigaciones y evaluaciones de los procesos de erosión, modalidades que permiten visualizar y hacer un seguimiento de dichos procesos en tiempo y espacio. Respecto a los SIG, se evidencian sus limitaciones y potencialidades dada su gran capacidad de representación cartográfica, análisis y ahorro de tiempo. Los SIG han permitido facilitar procesos laboriosos vinculados a la representación cartográfica producto de los estudios comúnmente relacionados al tipo, condición, riesgos actuales y potenciales de la erosión hídrica, mapeados a diferentes escalas.

PALABRAS CLAVE: erosión del suelo; evaluación; vulnerabilidad; imágenes satelitales; SIG; mapeo.

ABSTRACT

This document presents an overview of the current state of knowledge about soil degradation by water erosion, with an emphasis in its assessment and mapping. The fundamentals and historical aspects of water erosion are outlined. Several methodological categories used in the study and evaluation of soil degradation and some implementation experiences are presented. The employment of remote sensors and Geographic Information Systems (GIS) is highlighted. With regard to the remote sensors, the review approaches the role of satellite images as quantitative and qualitative support for the research and assessment of erosion, because these modalities allow to display and track that process in space and time. On the other hand, the limitations and potentialities of the GIS are discussed, the latter related to the possibilities they offer in terms of capacity for cartographic representation, analysis and time-saving. For this reason, the GIS have facilitated laborious processes linked to the cartographic outputs derived from studies commonly related to type, condition, current and potential risks of water erosion, mapped at different scales.

KEYWORDS: soil erosion; evaluation; vulnerability; satellite images; GIS; mapping.

1 Departamento Ordenación de Cuencas, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Venezuela. ORCID Camargo, C.: 0000-0003-1867-4591

2 Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. ORCID Pacheco, C.: 0000-0001-8724-9287

3 Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), Vicerectorado Académico, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. ORCID López, R.: 0000-0001-9666-0377

4 Autor de correspondencia: ccamargo@unet.edu.ve

Recepción: 5 de mayo de 2017. Aceptación: 01 de diciembre de 2017

Introducción

Es común encontrar evidencias de la acción de los procesos de erosión del suelo en las áreas naturales e intervenidas, los cuales están en parte influenciados por el grado de fragilidad que posean los suelos en los espacios geográficos (Wang y Sassa, 2003; Crosta y Frattini, 2008). En esencia, esos procesos están determinados por múltiples factores físico-naturales y antropogénicos. Aunado a ello, debe existir algún detonante como sismos, tormentas o crecidas torrenciales (entre otros) que los activan o desencadenan; así lo confirma una serie de estudios desarrollados en cuencas hidrográficas (Ayala 2006; Delgado et al., 2009; Montiel et al., 2009).

El equilibrio natural entre el suelo, clima y vegetación que reduce la actividad de los procesos de erosión y favorece la formación de nuevos suelos (períodos de biostasia) fue alterado desde que el hombre empezó a cultivar la tierra para procurarse alimentos, pues al eliminar la vegetación nativa y roturar su superficie con implementos rudimentarios aceleró las tasas de pérdida de suelo (SCS-USDA, 1988; Sanders, 2004). Así lo indican evidencias arqueológicas de antiguas civilizaciones (FitzPatrick, 2011) a través de 7000 años de historia, cuyo conocimiento se ha desarrollado muy lentamente (Hudson, 1981).

A nivel mundial han sido aplicadas muchas medidas para contrarrestar la degradación del suelo y, en especial, de la erosión. La red WOCAT (*World Overview of Conservation Approaches and*

Technologies), creada en 1992, ha tenido el objetivo de documentar las medidas de conservación y difundir los nuevos sistemas de manejo orientados a la producción sostenible que se desarrollan en el mundo. Dicha red posee un inventario de 450 estudios de casos de tecnologías y más de 350 de enfoques en alrededor de 50 países, la mayoría de ellos desarrollados en África (60%) y Asia (30%), con pocos estudios en América Latina (FAO, 2014).

En este sentido, es un hecho reconocido que la conservación de los suelos es una necesidad apremiante e impostergable. Una pérdida media de 0,3% del rendimiento anual de los cultivos está ocurriendo debido a la erosión, que de continuar sin cambios positivos podría fomentar una reducción del rendimiento anual para el año 2050 en un 10%. Esto supondría la pérdida de 4,5 millones de hectáreas por año⁻¹ de suelo, siendo Asia, Latinoamérica y el Caribe, el Cercano Oriente y Norte de África las regiones que tienen la mayor tendencia a dicho deterioro (FAO y GTIS, 2015).

La conservación de suelos es necesaria no solo por razones vinculadas al sostenimiento de la productividad agrícola, sino también por la protección integral de las cuencas hidrográficas (Suárez, 2001; Delgado, 2009) que a menudo experimentan estos procesos. Tal es el caso de las cuencas tropicales, donde la degradación de los suelos bajo usos agrícolas y las altas tasas de producción de sedimentos asociados a éstos como resultado de la erosión



Figura 1. Erosión en la sección alta (izquierda) y media (derecha) de la cuenca del río Chama (Estado Mérida, Venezuela) asociada a sobreexplotación por prácticas agrícolas inadecuadas. Fuente: fotografías propias

constituye uno de los principales problemas ambientales (Valero et al., 2010).

En este contexto se hace necesario realizar estudios de la erosión que permitan determinar las tierras afectadas en diferentes grados de daño, los riesgos potenciales asociados a sus diferentes usos y las situaciones de conflicto, para tomar medidas de prevención, mantenimiento, defensa y/o recuperación. En este sentido, el empleo de sensores remotos resulta de gran ayuda para la evaluación de riesgo y dinámica (Wang et al., 2013), identificación y estimación de cambios de forma del relieve en el tiempo (Wiegand et al., 2013; Camargo et al., 2014) o su identificación temprana (Lanfredi et al., 2015), a fin de conocer las áreas inestables y aquellas que podrían ser vulnerables a estos procesos de degradación. Esto permitiría desarrollar diversas zonificaciones y subsecuentemente, tomar decisiones en materia de planificación del uso de las áreas urbanas (Ferrer, 1988; Delgadillo et al., 2009), reorganización de las áreas agrícolas (Ramírez et al., 2008), manejo de la superficie forestal (Rosot, 2008), preservación de las bellezas escénicas (Aldana y Bosque, 2008) y determinación de áreas susceptibles a amenazas naturales, especialmente las concernientes a procesos de degradación en laderas e inundaciones, entre otros (Montiel et al., 2009).

Principios fundamentales

La erosión, en principio, es un fenómeno natural que implica el desprendimiento de suelo y/o fragmentos de roca, y como tal es un fenómeno inevitable (Jorge y Guerra, 2014) que en su tasa de progresión natural es responsable de un proceso constructivo al contribuir con la formación de suelo, pero con una tasa acelerada por acción antropogénica se constituye en un proceso de degradación que resulta destructivo al fomentar su pérdida (Lal y Stewart, 1990).

Los procesos de erosión natural ocurren progresiva o violentamente, afectando volúmenes importantes de material geológico o por medio de un proceso de desgaste lento y casi imperceptible de los suelos, contribuyendo así a la conformación del relieve y a la evolución de los suelos. Sin embargo, su aceleración

y la gran mayoría de los efectos nocivos son inducidos por acción antrópica por usos inadecuados de la tierra y sobreexplotación de los suelos debido a prácticas de manejo incompatibles con las condiciones edafoclimáticas imperantes (López-Falcón, 2002; López-Falcón y Delgado-Espinosa, 2015).

El suelo es un recurso natural renovable en la escala de evolución del planeta tierra; sin embargo, es considerado “no renovable” en la escala de tiempo del hombre, que solo va de décadas a centurias. Ello dada la constante y dinámica evolución del suelo y su propensión a ser degradado con facilidad ante un uso inadecuado de la tierra. Por desconocimiento de su naturaleza, capacidad y aptitudes de uso, importantes superficies de tierra han sido y continúan siendo degradadas.

El suelo es muy difícil de reemplazar una vez se ha perdido, pues su proceso de formación sobrepasa el tiempo que define una generación humana y su edad está limitada al tiempo durante el cual actúan los procesos pedogenéticos (Jaramillo, 2014). La duración de la formación puede ser muy variable y depende tanto de los factores como de los procesos pedogenéticos que actúan en consecuencia, dando lugar a una amplia variedad de suelos en la superficie de la tierra (FitzPatrick, 2011). Un ejemplo son aquellos suelos formados sobre material geológico granítico, que en condiciones relativamente húmedas forman de entre 400 a 800 kg⁻¹ha⁻¹año⁻¹ de suelo, equivalente a menos de 1 milímetro anual en profundidad, por lo cual un suelo de profundidad de enraizamiento medianamente adecuado (50 centímetros) para el desarrollo de las plantas necesitaría hasta más de 5.000 años para formarse (Stocking y Murnaghan, 2003); que sea más o menos tiempo depende de los diferentes factores actuantes en la pedogénesis.

Dado que la generación y la regeneración del suelo son procesos lentos (Alfisoles ≈ 38 años por cm) o extremadamente lentos (Oxisoles ≈ 750 años por cm) tal como señalan Boul et al. (2011), es común considerar al suelo como un recurso natural no renovable y finito en escala de tiempo humana (FAO, 2017; Vanwallegghem et al., 2017). Se destaca entonces la importancia de la conservación, ya que más del 99,7% de los alimentos que el hombre consume proceden de la tierra (Pimentel y Burgess, 2013).

Los problemas de degradación de los suelos y de la tierra en general se agravan con la tendencia al aumento de la producción de cultivos en cuencas de pendientes pronunciadas en las regiones tropicales (Guevara, 2000).

Los principales factores que controlan la erosión hídrica son la precipitación, la cobertura vegetal, la topografía y las propiedades del suelo. Los efectos interactivos de estos factores determinan la magnitud y la tasa de erosión del suelo. Así, mientras más larga e inclinada es la pendiente, el suelo será más afectado por la erosión y, por otra parte, cuanto mayor sea la capacidad de transporte del escurrimiento bajo una intensa lluvia, ello resultará en una mayor tasa de pérdida de suelo por la erosión. El papel de la vegetación en la prevención de la erosión del suelo es ampliamente reconocido: la cobertura vegetal mejora su resistencia al aumentar su contenido de materia orgánica, estabilizar su estructura y promover la actividad de macro y microorganismos. La efectividad de la cobertura vegetal depende de las especies de plantas, su densidad, edad, patrones de follaje y de raíces (Blanco y Lal, 2008).

En cuanto a términos específicos, “erosividad de la lluvia” se refiere a la capacidad intrínseca de la lluvia para erosionar el suelo. Las propiedades de la precipitación que afectan la erosividad total son: cantidad, intensidad y distribución de la lluvia, velocidad terminal y tamaño de la gota; pero los datos correspondientes para su estimación precisa no siempre están disponibles en todas las regiones. La “erosionabilidad¹ del suelo” es la susceptibilidad a la erosión y un atributo dinámico que cambia en tiempo y espacio con las propiedades del suelo. Su estimación (a partir de estudios de campo y laboratorio) se hace mediante índices, incluyendo propiedades del suelo

1 Erosionabilidad es un término derivado del verbo “erosionar”, de acuerdo con el Diccionario de la Real Academia Española (RAE). En la literatura inglesa se usa el término *erodibility*, reconocido por H. Bennett desde 1926 y señalado por primera vez en la literatura especializada por Cook (1937). *Erodibility* se deriva del verbo *to erode*, el cual dio lugar al término “erodabilidad”, que constituye un anglicismo. Este término, aún utilizado en muchas publicaciones en español, deriva del verbo “erodar”, otro anglicismo innecesario en la lengua castellana, pues el verbo correspondiente es erosionar y de él deben derivarse todos los vocablos relacionados. Por ejemplo: suelos erosionados y no suelos erodados; erosionante y no erodante; erosionabilidad y no erodabilidad.

como textura, características estructurales, contenido de materia orgánica, propiedades hidráulicas y humectabilidad, que son algunos de los factores que afectan la erosionabilidad (Blanco y Lal, 2008).

Antecedentes históricos

Desentrañar cómo era el estado y la evolución de los procesos de erosión en la antigüedad resulta difícil; sin embargo, el análisis de evolución geomorfológica y la reconstrucción paleoambiental han permitido tener algún conocimiento de éstos en el pasado. Los casos más antiguos conocidos son los acaecidos entre el año 10.000 y 1.000 a.C. en la sucesión Sumeria - Babilónica, donde la devastación forestal para construir ciudades y alimentar el ganado dieron lugar a una fuerte erosión del suelo (De la Rosa, 2008); así lo evidencian los canales rellenos por erosión con espesor de cuatro metros en la planicie arqueológica de Erbil, en Irak (Ur et al., 2013). También existen los estudios de evolución geomórfica y reconstrucción paleogeográfica apoyados en datos geoarqueológicos en la isla de Eubea en Grecia (Peña-Monne et al., 1995), en la isla y el tómbolo de Tiro en el Líbano, el delta del río Guadalquivir, el yacimiento del cerro del Villar en la cuenca mediterránea andaluza, la bahía de Lixus y el estuario del Oued Loukkos, en Marruecos (Carmona, 2003).

Otros ejemplos que ilustran lo sucedido en la antigüedad a partir de evidencias arqueológicas e históricas son la erosión en la región del Sinaí y montañas de Judea, la sedimentación del puerto marítimo de Ezion Gerber en el Golfo de Aqaba, las ruinas de Petra (Jordania), la elevada sedimentación del río Jordán, los testimonios de abandono de pueblos situados en Wade Musrara (Palestina) durante los pasados 1.500 años o de disminución de poblados como Jerash (Jordania) y los descubrimientos de las antiguas ciudades romanas Djamilia y Timgad sepultadas en Argelia (Stallings, 1981).

En el mismo orden de ideas, en algunas de las regiones de mayor densidad de población, la erosión constituyó un grave problema local antes de los tiempos de Jesucristo, como sucedió en Palestina (Bennett, 1955) o en Grecia, que aun poseyendo conocimientos de conservación de suelos presentaba colinas denudadas para el año 590 a.C. en los

alrededores de Atenas (Montgomery, 2012). Casos similares se presentaron en Italia, Siria, Norte de África y Persia, siendo posible incluso que caídas de imperios, como el romano, fueran influenciadas por una exhaustiva actividad agrícola responsable del arrastre y pérdida de los suelos superficiales fértiles (Troeh et al., 2003; Sanders, 2004) o que el abandono masivo de islas como Malta hacia el 3.000 a.C. fuera desencadenada por la gran erosión que se evidenció a partir de análisis polínicos 2.000 años después (Vidal, 2003).

Resulta claro que en el espacio comprendido por toda la cuenca Mediterránea, el Cercano Oriente y el norte de Europa, las prácticas agrícolas y la deforestación produjeron erosión acelerada (Needham y Mcklin, 1992). De modo más concreto, el territorio del piso bioclimático termomediterráneo, con características de ser litoral y cálido, experimentó procesos de erosión de considerable alteración por la influencia de una prolongada ocupación humana desde milenios (Peña-Monne et al., 1995; Vidal, 2003; Giménez, 2009; Alcaráz, 2013) sobre los suelos de las zonas mediterránea (Xérico), áridas (Arido) o semiáridas. Este tipo de suelos normalmente presentan carencia de agua, abundancia de sales, escasez de materia orgánica y presencia de arcillas y calizas, factores que han hecho que se desequilibren y erosionen con más facilidad en contraste con los de zonas de clima húmedo (Údico) (González de Molina, 2001).

De igual forma, la zona del mediterráneo se puede asociar a los suelos muy antiguos denominados *terra rossa* (también presentes en Estados Unidos), los cuales representan la etapa final de la formación de suelos a partir de rocas calizas. Estos suelos generalmente han sido utilizados para cultivar vid, lo que los ubica entre los más erosionados del mundo, un hecho que ya había sido observado en su momento por Platón (FitzPatrick, 2011).

Se puede afirmar que, a lo largo de la historia antigua, el desarrollo de procesos de erosión ha sido recurrente y generalizado; sin embargo, se pueden destacar algunas salvedades, como ciertas medidas de conservación observadas en el valle del Indo de la civilización egipcia (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 1975) y algunos aterrazamientos de terreno para reducir la erosión en Grecia, medida

aplicada de igual manera por los fenicios hace 4.500 años en Siria (Montgomery, 2012). Del mismo modo, en los alrededores de la ciudad de Cartago (actual Túnez), los cartaginenses fueron excelentes agricultores con avanzados sistemas de laboreo y riego; no obstante, la erosión hídrica y eólica en aquel tiempo parece haber sido la causa de la escasa calidad que actualmente presentan esos suelos (De la Rosa, 2008).

Respecto a la morfología de los litorales mundiales, éstos han cambiado de forma espectacular durante los últimos milenios y siglos, siendo las características hidrológicas y geomorfológicas relacionadas con la acción antrópica en las cuencas fluviales (como la minería, la tala de bosques, las prácticas agrícolas y sus efectos desencadenantes de erosión) las que han mostrado las claves en su evolución histórica (Carmona, 2003). Tal como aseguran Blum y Thörnqvist (2000), las actividades humanas tienen la capacidad de alterar las condiciones ambientales a escalas de tiempo muy cortas, al punto incluso de ser capaces de modificar sustancialmente el sistema hidrológico.

Un factor que hay que tomar en cuenta en la capacidad del hombre de realizar modificaciones al espacio fue el paso de la humanidad a la Edad del Hierro (siglo XII a.C.) y con ella, sus evidentes cambios en el instrumental agrario, con los cuales pudo colonizar tierras que eran difíciles de labrar con los arados de madera, como las tierras de elevada pendiente, las poco profundas o las que presentaban pedregosidad (Iborra et al., 2003).

La cuenca de la Rambla de Artana (España) puede ejemplificar de mejor modo la evolución de los procesos de erosión, contextualizado como un problema mediterráneo en general. En este caso, desde las poblaciones del Eneolítico, de la Edad del Bronce o los íberos, pasando por romanos y musulmanes, hasta la colonización cristiana de los siglos XIII y XIV, el estudio de los suelos de laderas y sedimentos aluviales ha demostrado una sucesión de etapas erosivas, pero también de otros momentos de recuperación y menor presión humana sobre la tierra o aplicación de criterios eficaces de sustentabilidad (Giménez, 2009).

Ahora bien, cuando el hombre caucásico comenzó a instalarse en el hemisferio occidental, tanto

Norteamérica como Suramérica eran consideradas desde el punto de vista de la agricultura vastas áreas de suelos prácticamente vírgenes. La erosión, fuera de la originada por las causas de orden geológico, era poca y no repercutía perjudicialmente en el bienestar del hombre (Bennett, 1955). Sin embargo, la decadencia de civilizaciones como la Maya en Centroamérica puede probablemente ser atribuida a la progresividad de los procesos de erosión (FitzPatrick, 2011). Vale agregar que los primeros pobladores (aztecas, mayas, chibchas, entre otros) poseían una larguísima tradición del cultivo del maíz que cedieron a sus descendientes luego del proceso de conquista y colonización europea, y que explica en muchos casos la grave erosión hoy existente en México, Honduras, Nicaragua y Colombia (Suárez de Castro, 1956).

Aunque se reconoce la debacle de muchas civilizaciones americanas por la erosión provocada debido a sus propias malas prácticas a través del tiempo, se deben reconocer también algunas estrategias de conservación como las desarrolladas por los aztecas en México o los tayronas en Colombia en el manejo racional del suelo (Cenicafé, 1975) y las prácticas de siembra en terrazas, cultivos intercalados y rotaciones de cultivos que incluían leguminosas, barbechos y el uso de estiércol y ceniza por los Incas en Perú (Montgomery, 2012).

Hoy en día los mayores niveles de erosión se están observando en las tierras reforestadas y agrícolas por un mal manejo del suelo (Imeson y Curfs, 2008). En este contexto y para el análisis temporal y espacial de la erosión resulta necesario tomar en cuenta la relación entre el cambio climático y la degradación de suelos por cambios de uso de la tierra, pues se ha observado en los últimos decenios un vínculo estrecho entre estos dos fenómenos (Li y Fang, 2016). Al respecto, Zare et al. (2017) han señalado que, aunque es un hecho que el cambio climático es un proceso natural e inevitable y que no está bajo control humano, si se pudiera manejar de una mejor forma el uso de la tierra, la pérdida de suelo podría ser controlada e incluso disminuida en gran medida, aún bajo la influencia de los futuros cambios climáticos.

Dotterwich (2013), basándose en McNeill y Winwarter (2004), resume que la erosión de los suelos

agrícolas en el mundo se ha presentado en tres oleadas o etapas. La primera inició alrededor del segundo milenio a.C. y durante los siguientes 3.000 años las tasas de erosión incrementaron debido a que los agricultores de Eurasia, África y las Américas gradualmente convirtieron una proporción moderada de los bosques a tierras de cultivo o pastos. La segunda comprende el período entre los siglos XVII y XIX y se caracteriza por la introducción de arados más fuertes y afilados que ayudaron a romper el suelo de las pampas suramericanas, la estepa euroasiática y las praderas norteamericanas. Finalmente, la tercera empieza con el rápido crecimiento de la población después de la segunda mitad del siglo XX, cuando los grupos humanos comenzaron a deforestar las selvas tropicales y las áreas empinadas para expandir las tierras agrícolas y para explotar madera con el fin de usarla para construcciones o como combustible.

La revisión histórica conduce a reforzar la importancia de conservar el suelo, lo que implica aspectos tan fundamentales como la seguridad alimentaria, la resiliencia al cambio climático y la estabilidad geosocial (Marzen et al., 2017). Ahora bien, la larga historia de uso de la tierra en muchas áreas alrededor del mundo y que ha conducido a procesos de erosión ha permitido prever que muchas regiones tengan actualmente una capacidad significativamente menor del recurso suelo respecto al primer uso de la tierra desarrollado, situación que aumenta la vulnerabilidad de estas regiones al cambio climático (Vanwalleghem et al., 2017). También esto ha permitido reconocer que en la mayoría de los países se experimenta una fase de degradación significativa de la tierra cuando los sistemas agrícolas son establecidos por primera vez; hecho particularmente cierto en paisajes antiguos que, típicamente, tiene suelos altamente meteorizados e infértiles que los hacen más vulnerables a las perturbaciones (FAO y GTIS, 2015).

Li y Fang (2016) destacan que la erosión de los suelos será influenciada por el cambio climático, principalmente por los cambios de temperatura y patrones de precipitación que impactarán la producción de la biomasa vegetal, las tasas de infiltración, la humedad del suelo, los cambios de uso y el manejo de los cultivos, por consiguiente, afectando la escorrentía y la erosión de los suelos.

La cuantificación de los efectos del cambio climático y de la variabilidad de los sistemas paisajísticos perturbados y los naturales es extremadamente importante. Las tierras intervenidas, desprovistas de cobertura vegetal, se hacen más vulnerables a la degradación (Hancock et al., 2017).

La erosión del suelo se está reconociendo ahora como una amenaza grave para la seguridad y la estabilidad socioeconómica, por ello, proporcionar información a los políticos en funciones y a los responsables del manejo del suelo acerca de los procesos de erosión y sus consecuencias con base en una evaluación fiable de vulnerabilidad y niveles de riesgo, es un paso necesario para su prevención y control (Marzen et al., 2017). Para lograrlo, la FAO y GTIS (2015) han sugerido siete políticas de acción como punto de partida, que comprenden el desarrollo de planes de educación y sensibilización, la creación de sistemas de monitoreo y pronóstico, la generación de informes a mercados inmobiliarios tradicionales hasta mercados formales de reserva de carbono y de aseguradoras de cosechas, la instauración de incentivos y regulaciones apropiadas, el aseguramiento de la equidad intergeneracional, el apoyo a la seguridad local, regional e internacional, y la comprensión de las interconexiones y las consecuencias de la gestión de los suelos.

Metodologías de trabajo para el estudio y evaluación de la erosión hídrica y experiencias de aplicación.

Existe una amplia gama de métodos que permiten la evaluación cualitativa o cuantitativa de los procesos de degradación del suelo, y particularmente, de la erosión hídrica. De acuerdo con la metodología de FAO et al. (1979), publicada en español (FAO et al., 1980), los métodos para la evaluación de la degradación de suelos pueden ser agrupados en varias categorías generales: observaciones y mediciones directas, técnicas de teledetección, métodos paramétricos y modelos matemáticos. La mayoría de las evaluaciones a diferentes escalas se basan en ecuaciones y modelos predictivos que relacionan las tasas de degradación con variables climáticas, topográficas, del suelo y del uso y manejo de la tierra. Los modelos matemáticos, representaciones

matemáticas de fenómenos físicos, químicos, biológicos, sociales, económicos y/o procesos relacionados, han sido usados extensivamente desde finales de los años sesenta. Dentro de la gama de métodos para la evaluación de la degradación del suelo, los modelos pueden ser divididos en dos clases: empíricos y causales (DeCoursey, 1985).

En los modelos empíricos, una expresión matemática transforma un grupo de variables de 'entrada' en una 'salida' de resultados sin tratar de describir el proceso bajo estudio. Estos modelos son generalmente más sencillos, requieren menos datos que los causales y resultan por lo tanto menos costosos, pero tienen como desventajas la dificultad para ser mejorados y la imposibilidad de extenderlos más allá del rango de datos usados en su desarrollo. Algunos ejemplos son la ampliamente utilizada Ecuación Universal de Pérdida de Suelo o USLE (Wischmeier y Smith, 1978) y todas las modificaciones y revisiones que se le han hecho a este modelo, como la MUSLE (Williams, 1975; Williams y Berndt, 1977), la DUSLE (Flacke et al., 1990) y la RUSLE (Renard et al., 1993).

De otra parte, los modelos causales tienen el propósito de describir procesos físicos, químicos y biológicos al mayor detalle posible; pueden ser usados para predecir respuestas que no son necesariamente observadas, evaluar el efecto de cambio ambiental, coordinar y estructurar investigación e incluso desarrollar y mejorar modelos empíricos. Sus principales desventajas son el requerir mayores volúmenes de datos y una extensiva investigación para su evaluación. Los modelos causales o físicos han registrado un fuerte impulso a partir de los años ochenta, considerando los grandes programas que se han venido desarrollando en Estados Unidos con el *Water Erosion Prediction Project* o WEPP (Laflen et al., 1991) y en Europa con el *European Soil Erosion Model* o EUROSEM (Morgan et al., 1998; Quinton y Morgan, 1996).

Los procesos de erosión en laderas han representado un excelente campo para la investigación particularmente en los últimos años; sin embargo, de acuerdo con Martínez-Casasnovas et al. (2004), son pocos los estudios que han arrojado algún aporte en cuanto a la contribución de sedimentos y su

ubicación. Existe una gran cantidad de enfoques cuyo objetivo es la cuantificación e inclusive la simulación, especialmente sobre la dinámica, forma, volumen de material removido en tiempo y espacio, origen, entre otros. Dichos enfoques podrían clasificarse en cuatro grandes categorías.

La primera categoría utiliza la teledetección y se enfoca en realizar estudios de observación sobre las propias áreas donde ocurre la erosión, como por ejemplo el levantamiento topográfico de cárcavas y canales con LIDAR en Carolina del Sur (Estados Unidos) por James et al. (2007); la clasificación de tipos y grados desarrollados por Alvarado et al. (2007) en el estado de Tlaxcala (México) con imágenes Landsat 5 TM y fotografías aéreas; la observación de procesos en la sierra madrileña (España) con imágenes Spot 5 por Pérez y García (2013); y la determinación de grados y formas de erosión en imágenes Spot 5 para México por Bolaños et al. (2016).

La segunda categoría simula lo que ocurre cuando se estudian los procesos de erosión mediante el uso de parcelas en campo que evalúan los parámetros de pendiente, tipo de suelo, cobertura y pluviosidad. Este enfoque fue empleado por primera vez por Wollny en Alemania entre 1877 y 1895 para medir los efectos de la vegetación y otras coberturas como el *mulch* en la intercepción de la lluvia, la estructura del suelo y los efectos del tipo de suelo y pendiente con escorrentía y erosión, siendo éstas las primeras investigaciones sobre erosión desarrolladas en el mundo (Sanders, 2004; Dotterweich, 2013). Ejemplos de implementación reciente de este método son las desarrolladas en el Municipio Uberlândia, (Brasil) con diferentes tipos de vegetación (Júnior et al., 2009), en la cuenca Wangjiagou (China) con diferentes ángulos de pendientes, cultivos y medidas de conservación (Zhu y Zhu, 2014), y en la cuenca de Khamsan (Irán) sobre pastizales existentes en zonas de pendiente (Mohamadi y Kavian, 2015).

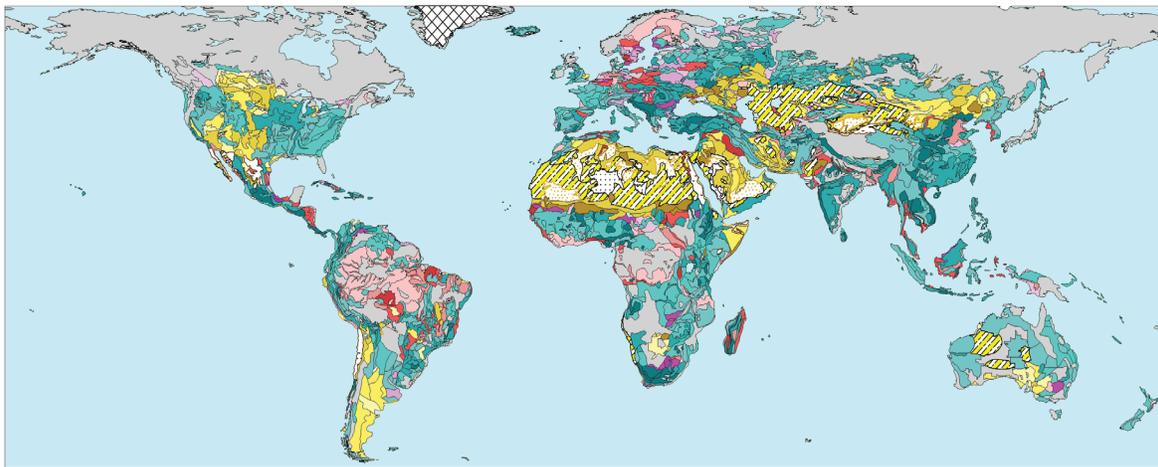
La tercera categoría representa los métodos de cuantificación directa, como los basados en estacas y/o levantamientos de perfiles altamente detallados de la topografía (Martínez-Casasnovas et al., 2001), las mediciones de secciones rectangulares y

trapezoidales en surcos con cinta métrica (Luna-Ramos y Solé-Benet, 2015) o la estimación de sedimentos generados a partir de un simulador portátil de lluvia y viento (Marzen et al., 2017).

La cuarta categoría corresponde con los enfoques que se basan en programas de computación que recogen y traducen los datos bajo las teorías y criterios científicos comprobados por los círculos de expertos en la materia, la teledetección y los SIG. Algunos ejemplos son: la cartografía de los procesos de erosión por barrancos en Cataluña, España (Antón y Martínez-Casasnovas et al., 2001), la estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales en la cuenca del río Mocotíes, estado de Mérida-Venezuela (Roa, 2007), el monitoreo de pérdida de suelo en algunas áreas de Nigeria (Ehiorobo y Izinyon, 2013), la detección de cárcavas con datos LIDAR en el Cerro Llamoca Turberas (Perú) basado en SIG (Höfle et al., 2013), o la aplicación y comparación en la meseta de Loess (China) de modelos de erosión de suelos como RUSLE, MUSLE, ZHENG'S, WEPP, SWAT, entre otros (Li et al., 2017).

La primera evaluación verdaderamente global del estado de la tierra con relación a la degradación del suelo fue la *Global Assessment of Human induced Soil Degradation* (GLASOD) para el período 1987-1990 desarrollada por Oldeman et al. (1991). A través de ella se encontró que 1.964 M ha (15% de la superficie terrestre) estaban siendo afectadas por alguna forma de degradación del suelo (Caspari et al., 2014). De éstas, la erosión hídrica aparece como el tipo más importante, dada la afectación de aproximadamente 1.093,7 millones de hectáreas y representando el 55,6% de la degradación del suelo a nivel mundial (Figura 2), de acuerdo con la FAO (2014).

Más recientemente, Li y Fang (2016), basándose en datos recabados por García-Ruiz et al. (2015), elaboraron un mapa que refleja de manera aproximada la severidad total y la distribución de la erosión de los suelos alrededor del mundo. Concluyen que algunas partes de Estados Unidos, China, Australia, India, partes de Europa, África y Suramérica presentan grados de erosión muy severa (Figura 3).



Leyenda

Grado de deterioro químico		Grado de deterioro físico		Otros	
 bajo	 bajo	 Desiertos			
 medio	 medio	 Dunas activas			
 alto	 alto	 Capa de hielo			
 muy alto	 muy alto	 regiones montañosas aridas			
Grado de erosión eólica		Grado de erosión hídrica		 Afloamientos rocosos	
 bajo	 bajo	 Terreno estable			
 medio	 medio	 Salinas			
 alto	 alto	 Agua			
 muy alto	 muy alto				

Figura 2. Evaluación mundial de la degradación de los suelos donde se evidencian las áreas con procesos de erosión hídrica (tonalidades azules) y eólica (tonalidades amarillas), entre otras degradaciones y coberturas.
Fuente: elaboración propia con base en los archivos vectoriales suministrado por ISRIC (2017)

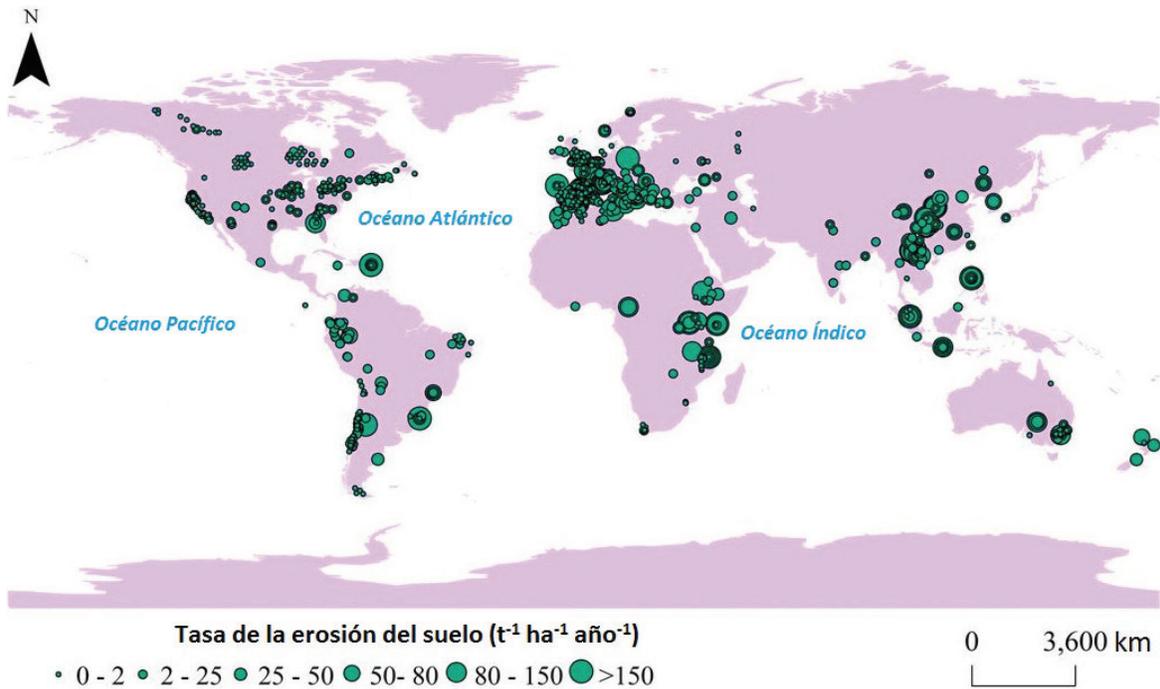


Figura 3. Tasas de erosión global. Fuente: Li y Fang (2016) basados en la base de datos recabada por García-Ruiz et al. (2015)

Uso de los sensores remotos y de los Sistemas de Información Geográfica en el estudio de la erosión hídrica

Los estudios para la evaluación de los procesos de erosión hídrica, al igual que diversos campos dentro de las áreas del saber geográfico y ambiental, han progresado al ritmo de los avances tecnológicos. Así pues, el quehacer científico ha pasado de procedimientos manuales, laboriosos, de orden analógico y sobre papel, a procesamientos rápidos y digitales, gracias a los ordenadores modernos (Camargo et al., 2014).

Productos de sensores remotos como las fotografías aéreas permiten alcanzar una escala mayor de detalle porque generalmente tienen una mejor resolución espacial (Loureiro y Ferreiras, 2014). El empleo de esas fotografías de forma individual o con visión estereoscópica en una fecha o rango de tiempo particular ha permitido realizar cartografía de áreas afectadas por erosión (Martínez-Casasnovas y Ramos, 2009), mediciones planimétricas de tipos, grados y estado de erosión (Camargo *et al.*, 2014) y caracterizaciones morfométricas de erosión glacial (Hall-Riaza et al., 2016). Este tipo de recurso ha sido también utilizado para el cálculo de tasas de erosión (Ojeda et al. 2015; Notti et al., 2015).

Durante los últimos treinta años, muchos estudios basados en la interpretación de imágenes satelitales para evaluar la erosión de los suelos han sido publicados y clasificados en tres categorías: detección de erosión, evaluación de factores que controlan la erosión y creación de mapas de erosión integrando datos (Vrieling, 2006). Hoy en día la tendencia ha continuado y el uso de las imágenes satelitales es vigente.

El formato digital en el que se presentan las imágenes permite el empleo del formalismo del álgebra matricial para manipularlas, analizarlas y transformarlas (Riaño, 2010). Las imágenes de satélite facilitan la obtención de variables primarias (relacionadas directamente con los datos obtenidos por el sensor) y secundarias (derivadas de las primeras) para su posterior interpretación y uso en la generación de cartografía temática, la representación espacial de las mismas variables, la determinación de cambios (seguimiento de fenómenos dinámicos) y la representación de mosaicos espaciales de los territorios que sirven para medir relaciones geográficas

entre las manchas que los forman (Chuvieco, 2010). Ejemplo de ello son las imágenes Landsat, que por más de 40 años han proveído el más largo registro temporal de observaciones de la superficie y su modificación a lo largo del tiempo (Roy et al., 2014).

De modo más específico, en lo que atañe a la erosión del suelo, las imágenes Landsat han posibilitado el desarrollo de estudios de tipo cualitativo, cuantitativo, simuladores de riesgo de erosión y caracterizadores de la ocupación del suelo, como insumo a los modelos USLE o RUSLE (Buendía-Rodríguez et al., 2008; Drzewiecki et al., 2014; Bernabe et al., 2015; Oliveira et al., 2015; Zare et al., 2017). Otros productos de sensores remotos, como las imágenes SPOT, han sido también utilizadas para estudios de la erosión; un ejemplo es la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos desarrollado por Pineda et al. (2016).

En esencia, los productos de la tecnologías geo-espacial y de teledetección, como las imágenes satelitales, ofrecen información sobre el estado y distribución de las cubiertas del suelo a una resolución temporal, espectral y espacial satisfactoria para muchos estudios multitemporales a diferentes escalas, lo cual ha permitido cartografiar eficazmente zonas afectadas (Castañeda del Álamo et al., 2015; Latham et al., 2015); objetivos que, para ser alcanzados, requieren del trato informático de sus respectivos datos.

En cuanto al uso de las imágenes de radar, solo cinco sensores han sido aplicados: ERS-1 y 2, JERS-1, RADARSAT-1 y ENVISAT. Además, un número de vuelos de trasbordadores espaciales de corta duración han usado instrumentos para estudios de erosión (Vrieling, 2006): MOMS-2 (*Modular Optoelectronic Multispectral Scanner*) y SIR-C/X-SAR (ShuttleImaging Radar-C/X-SAR). Recientemente, la interferometría radar satelital (InSAR) tomada por el satélite ENVISAT, ha sido empleada para la caracterización de movimientos de ladera en áreas urbanizadas integrando información geológica (Notti et al., 2015).

Por otro lado se tienen los SIG que emplean los insumos de los sensores remotos. Los productos finales de los SIG posibilitan análisis más precisos de la superficie terrestre, lo que permite la identificación e interpretación de los principales agentes

envueltos en la alteración del paisaje, reduciendo así la cantidad de datos inciertos que impiden una gestión ambiental eficiente (Loureiro y Ferreiras, 2014).

Dada la gran capacidad de representación cartográfica, análisis y ahorro de tiempo en análisis, los SIG han permitido que procesos laboriosos como la preparación de datos de entrada para la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, por ejemplo, realizados de modo analógico anteriormente, hayan mejorado significativamente en la actualidad en cuanto al empleo del tiempo (Camargo et al., 2014).

El uso más común de los SIG en el estudio de los procesos de erosión ha versado principalmente sobre su capacidad para elaborar Modelos Digitales de Terreno (MDT) definidos como conjuntos ordenados de puntos de datos muestreados que representan la distribución espacial de varios tipos de información sobre el terreno (Li et al., 2005). Ello ha sido muy útil para calcular la pendiente del área que contribuye a la erosión y a su activación, obtener los umbrales de barrancos para la iniciación y depósito de sedimentos, localizar cárcavas incipientes en el paisaje, tomar en cuenta el retroceso de las cabezas o coronas de los barrancos y cárcavas atendiendo a la morfología, y estudiar la contribución de los sedimentos, la producción de tasas de expansión volumétrica y otros procesos relacionados con erosión activa (Martínez-Casasnovas et al., 2004). Los SIG también han sido empleados para evaluar por medio de métodos de evaluación multicriterio la erosión hídrica de tipo difusa y por surcos, la tendencia a su riesgo y la distribución espacial de su estado e intensidad. Este tipo de métodos pueden proveer importantes bases para la evaluación, control y predicción de la erosión de los suelos (Wang et al., 2013).

Aun cuando las propiedades individuales del suelo proveen una información valiosa, pueden no ser suficientes para explicar diferencias en la degradación de los suelos. Por ello, las evaluaciones con SIG a menudo involucran la integración de datos de diferentes tipos y fuentes. Esta aproximación consiste en la superposición de mapas para derivar clasificaciones de la degradación potencial de los suelos. Por ejemplo, una capa digital interpretativa que muestra la distribución de las clases de riesgo de degradación del suelo puede ser creada combinando

propiedades del suelo (textura, estructura, contenido de carbono orgánico, etc.), vegetación (cobertura/ uso de la tierra) y pendiente (Petersen et al., 1998). La integración de SIG a modelos de erosión/calidad del agua se ha vuelto muy popular desde comienzo de los años noventa. El éxito de la integración depende tanto del SIG como del tipo de modelo. Así, la parametrización de los modelos empíricos para su integración al SIG se facilita ya que los coeficientes y exponentes pueden ser fácilmente aplicados a cualquier capa del SIG; sin embargo, los modelos de basamento físico necesitan capas de datos detallados, lo cual dificulta el enlace.

En conclusión, los productos de los sensores remotos, en especial de las imágenes satelitales, han permitido revolucionar la cartografía de suelos gracias a la utilización de los SIG, herramienta que ha concedido la posibilidad de combinar y superponer capas temáticas que facilitan la identificación de los suelos presentes en un área determinada (IGAC, 2010) o de fenómenos que los afectan (como los procesos de erosión) y cuyos resultados además facilitan la vigilancia ambiental y la gestión de los recursos naturales, mejorando también la capacidad de respuesta ante los desastres naturales o antropogénicos (Becerra, 2013). Para lograrlo, es preciso tener la cautela de no utilizar indiscriminadamente las geotecnologías, pues ello repercute negativamente en la calidad de los resultados de la investigación y, por lo tanto, en la planeación ambiental (Loureiro y Ferreiras, 2014).

Agradecimientos. Al Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP) de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes (Mérida - Venezuela) y a su Programa de Doctorado en Ciencias Forestales y Ambientales, al cual se vincula este documento. A las bibliotecas de la Universidad de Panamá (sede Chiriquí y Ciudad de Panamá), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Fundación Universitaria de Colombia (UNIAGRARIA) y Biblioteca Pública Julio Mario Santo Domingo (Bogotá), Universidad Central de Venezuela (Caracas), Universidad de Los Andes y Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial - CIDIAT-ULA (Mérida), a través de las cuales se pudo obtener información y colaboración de su personal a cargo. Finalmente, nuestro agradecimiento a los Árbitros y al Comité Editorial de la revista Gestión y Ambiente por sus aportes y observaciones.

Conflicto de intereses. El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados aquí presentados.

Bibliografía

- Antón, C., Martínez-Casasnovas, J., 2001. Cartografía de la erosión por barrancos mediante restitución fotogramétrica y modelos digitales de elevación en el Penedès (Cataluña). En: Rosell U., J., Martínez-Casasnovas, J. (Coord.), Teledetección, medio ambiente y cambio global. Universitat de Lleida; Editorial Milenio, Llérida, España. pp. 229-232.
- Alcaráz A., F., 2013. Pisos bioclimáticos y pisos de vegetación. Universidad de Murcia, España. Disponible en: <http://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema03.pdf>; consultado: mayo de 2016.
- Aldana, A., Bosque, J., 2008. Evaluación de la zonificación de uso del Parque Nacional Sierra de La Culata, Mérida-Venezuela. *Rev. Forest. Latinoam.* 23, 9-34.
- Alvarado C., M., Colmenero R., J., Valderrábano, M., 2007. La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *Cienc. Ergo Sum* 14, 317-326.
- Ayala, R., 2006. Abanico El Palón: evidencia cosísmica del alto grado de vulnerabilidad de la cuenca del río Chama, estado Mérida-Venezuela. *Rev. Geogr. Venez.* 47, 85-102.
- Becerra, R., 2013. Ciencia y tecnología especial para el desarrollo integral de Venezuela. Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE); Instituto Municipal de Publicaciones Alcaldía de Caracas, Caracas.
- Bennett, H., 1955. *Elements of soil conservation*. 2a ed. McGraw-Hill, New York, NY.
- Bernabe, V., García, J., Gardezi, A., Martínez, M., Márquez-Berber, S., 2015. Análisis de suelos erosivos y cárcavas utilizando imágenes Landsat en el tramo medio del río Jarama España. En: *Memorias, 1er Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología*. Querétaro, Querétaro, México. pp. 21-24. DOI: 10.13140/RG.2.1.2282.1606
- Blanco, H., Lal, R., 2008. *Principles of soil conservation and management*. Springer, Heidelberg, Alemania.
- Blum, M., Thörnqvist, T., 2000. Fluvial response to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology* 47 (1), 2-48. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.00008.x
- Bolaños G., M., Paz P., F., Cruz G., C., Argumedo E., J., Romero B., V. De-la-Cruz C., J., 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoam.* 34, 271-288.
- Buendía-Rodríguez, E., Islas-Gutiérrez, F., Guerra-De-la-Cruz, V., 2008. Identificación de áreas erosionadas por medio de imágenes Landsat ETM+, en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala, México. *Terra Latinoam.* 26, 1-9.
- Buol, S., Southard, R., Graham, R., McDaniel, P., 2011. *Soil genesis and classification*. 6th ed. John Wiley & Sons, Ames, IW. DOI: 10.1002/9780470960622
- Camargo, C., Vidal, R., Andrades, J., 2014. Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante el uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca torrencial "La Machiri", estado Táchira-Venezuela. *Rev. Geogr. Venez.* 55(1), 85-99.
- Carmona G., P., 2003. El tómbolo del Tiro, el delta del Guadalhorce y la bahía de Lixus. Geomorfología y geoarqueología de litorales fenicios. En: Gómez B., C. (Ed.), *Ecohistoria del paisaje agrario: la agricultura fenicio-púnica en el Mediterráneo*. Colecciones Oberta 95. Universitat de València, Valencia, España. pp. 11-32.
- Cook, H., 1937. The nature and controlling variables of the water erosion process. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1 (C), 487-494.
- Caspari, T., Alexander, A., Ten Brink, B., Laestadius, L., 2014. Report: review of global assessments of land and ecosystem degradation and their relevance in achieving the land-based aichi biodiversity targets. En: 29, Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity, Pyeongchang, Korea del Sur.
- Castañeda del Álamo, C., Jiménez C., A., Latorre G., B., Luna J., E., 2015. Tratamiento automático de imágenes Landsat en entorno SIG para gestión de espacios protegidos: Laguna de Gallocanta, España. En: *Memorias del XVI Congreso de la Asociación Española Teledetección: "Humedales y espacios protegidos"*. Sevilla, España. pp. 36-39.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), 1975. *Manual de conservación de suelos de ladera*. Chinchiná, Colombia.
- Chuvieco, E., 2010. *Teledetección ambiental. La observación de La Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel Ciencias, Barcelona, España.
- Crosta, G., Frattini, P., 2008. Rainfall-induced landslides and debris flows. *Hydrol. Process.* 22(Número Especial), 473-477. DOI: 10.1002/hyp.6885
- De la Rosa, D., 2008. *Evaluación agro-ecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- DeCoursey, D., 1985. Mathematical models for non-point water pollution control. *J. Soil Water Conserv.* 40, 408-413.
- Delgado, A., Ferrer, C., Dugarte, M., 2009. Aspectos hidrogeomorfológicos de un sector de Los Andes meridionales (Venezuela): un intento de zonificación por crecidas y flujos de detritos. *Rev. Geogr. Venez.* 50, 59-85.

- Delgado, F., 2009. Introducción a la conservación del suelo en tierras altas en Venezuela. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Dotterweich, M., 2013. The history of human-induced soil erosion: geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation—a global synopsis. *Geomorphology* 201, 1-34. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.07.021
- Drzewiecki, W., Wężyk, P., Pierzchalski, M., Szafrńska, B., 2014. Quantitative and qualitative assessment of soil erosion risk in Małopolska (poland), supported by an object-based analysis of high-resolution satellite images. *Pure Appl. Geophys.* 171, 867-895. DOI: 10.1007/s00024-013-0669-7
- Ehiorobo, J., Izinyon, O., 2013. Monitoring of soil loss from erosion using geoinformatics and geotechnical engineering methods. *J. Civil Eng. Archit.* 7, 78-84.
- FAO, PNUMA, UNESCO, 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma.
- FAO, UNEP, UNESCO, 1979. A provisional methodology for soil degradation assessment. Roma.
- FAO, 2014. Sistematización de prácticas de conservación de suelos y aguas para la adaptación al cambio climático. Metodología basada en WOCAT para América Latina y el Caribe. Santiago.
- FAO, GTIS, 2015. Estado mundial del recurso suelo (EMRS). Resumen técnico. Roma.
- FAO, 2017. Conservación de suelos y aguas en América Latina y el Caribe. Disponible en: <http://www.fao.org/americas/prioridades/suelo-agua/es/>; consultado: septiembre de 2017.
- Ferrer, C., 1988. Conurbación Valera-Trujillo: una metodología para la evaluación geomorfológica de la estabilidad relativa de sus terrenos. *Rev. Geogr. Venez.* 29, 5-64.
- FitzPatrick, E., 2011. Introducción a la ciencia del suelo. Editorial Trillas, México D.F.
- Flacke, W., Auerswald, K., Neufang, L., 1990. Combining a modified universal soil loss equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena* 17, 383-397. DOI: 10.1016/0341-8162(90)90040-K
- García-Ruiz, J., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J., Lana-Renault, N., Sanjuán, Y., 2015. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology* 239, 160-173. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.03.008
- Giménez, P., 2009. Karl W. Butzer y la lectura ambiental de la expulsión de los moriscos. *Rev. Hist. Mod.* 27, 317-333. DOI: 10.14198/RHM2009.27.13
- González de Molina, M., 2001. El modelo de crecimiento agrario del siglo XIX y sus límites ambientales. Un estudio de caso. En: González de Molina, M., Martínez A., J. (Eds.), *Naturaleza transformada: estudios de historia ambiental en España*. Icaira Editorial. Barcelona, España. pp. 87-124.
- Guevara, P., 2000. Sistemas de conservación y rehabilitación de cuencas. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- Hall-Riaza, J., Valcárcel, M., Blanco-Chao, R., 2016. Caracterización morfométrica de formas glaciares en cuña en las Sierras de Xistral, Teleno y Cabrera. *Polígonos* 28, 55-71.
- Hancock, G., Verdon-Kidd, D., Lowry, J., 2017. Soil erosion predictions from a landscape evolution model: an assessment of a post-mining landform using spatial climate change analogues. *Sci. Total Environ.* 601-602, 109-121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.038
- Höfle, B., Griesbaum, L., Forbriger, M., 2013. GIS-based detection of gullies in terrestrial LiDAR data of the Cerro Llamoca Peatland (Perú). *Remote Sens.* 5, 5851-5870. DOI: 10.3390/rs5115851
- Hudson, N., 1981. Soil conservation. 2a ed. Cornell University Press, Ithaca, NY.
- Iborra, M., Grau, E., Pérez J., G., 2003. Recursos agrícolas y ganaderos en el ámbito fenicio occidental: estado de la cuestión. En: Gómez B., C. (Ed.), *Ecohistoria del paisaje agrario: la agricultura fenicio-púnica en el Mediterráneo*. Colecciones Oberta 95. Universitat de València, Valencia, España. pp. 33-56.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2010. El ABC de los suelos para no expertos. Bogotá.
- International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), 2017. Global assessment of human-induced soil degradation (GLASOD). Disponible en: <http://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/9e84c15e-cb46-45e2-9126-1ca38bd5cd22>; consultado: septiembre de 2017.
- Imeson, A., Curfs, M., 2008. La erosión del suelo. Lucinda 1B. Disponible en: http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/booklets/B1_Booklet_Final_ES.pdf; consultado: mayo de 2017.
- James, L., Watson, D., Hansen, W., 2007. Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA. *Catena* 71, 132-144. DOI: 10.1016/j.catena.2006.10.010
- Jaramillo J., D., 2014. El suelo: origen, propiedades, espacialidad. 2a ed. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Jorge, M., Guerra, A., 2014. Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. En: Guerra, A., Jorge, M. (Eds.), *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. 1ª reimpressão. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil. pp. 7-30.

- Junior, J., Cruz, L., Nogueira, T., Rodriguez, S., 2009. Monitoramento de processos erosivos em parcelas experimentais no município de Uberlândia-MG. *Caminhos Geogr.* 10, 92-108.
- Laflen, J., Elliot, W., Simanton, J., Holzhey, C., Kohl, K., 1991. WEPP: soil erodibility experiments for rangeland, and cropland soils. *J. Soil Water Conserv.* 46, 39-44.
- Lal, R., Stewart, B., 1990. Soil degradation. En: Stewart B. (Ed.), *Advances in soil science*. Vol. 11. Springer-Verlag. New York, NY. DOI: 10.1007/978-1-4612-3322-0
- Lanfredi, M., Coppola, R., Simoniello, T., Coluzzi, R., D'Emilio, M., Imbrenda, V., Macchiato, M., 2015. Early identification of land degradation hotspots in complex bio-geographic regions. *Remote Sens.* 7(6), 8154-8179. DOI: 10.3390/rs70608154
- Latham, J., Cumani, R., Bloise, M., 2015. Gracias a los sistemas geoespaciales y de teledetección se refuerzan las intervenciones de socorro tras el tifón Haiyan. *Unasylva* 243/244, 17-18.
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C., 2005. *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Li, Z., Fang, H., 2016. Impacts of climate change on water erosion: a review. *Earth-Sci. Rev.* 163, 94-117. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.10.004
- Li, P., Mu, X., Holden, J., Wu, Y., Irvine, B., Wang, F., Gao, P., Zhan, G., Sun, W., 2017. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau. *Earth-Sci. Rev.* 170, 17-30. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.05.005
- López-Falcon, R., 2002. *Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. Serie Suelos y Clima SC-75. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- López-Falcón, R., Delgado-Espinoza, F., 2015. Degradación y manejo sostenible de suelos de sabana. En: López-Falcón, R., Hetier, J., López-Hernández, D., Schargel, R., Zinck, A. (eds.), *Tierras Llaneras de Venezuela... tierras de buena esperanza*. Vol. 2: uso agrícola de los suelos de Sabana, Referencial Científico. Consejo de Publicaciones, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. pp. 555-654.
- Loureiro, H., Ferreira, S., 2014. O papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. En: Guerra, A., Jorge, M. (Eds.), *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. 1ª reimpressão. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil. pp. 95-125.
- Luna-Ramos, L., Solé-Benet, A., 2015. Erosión del suelo acentuada por un acolchado de gravilla en una ladera en restauración en canteras de Almería (sede España). *Rev. EIA* 1, 13-19. DOI: 10.24050/reia.v1i1.702
- McNeill, J., Winiwarter, V., 2004. Breaking the sod: humankind, history, and soil. *Science* 304, 1627-1629. DOI: 10.1126/science.1099893
- Martínez-Casasnovas, J., Ramos, M., Ribes-Dasi, M., 2001. Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. *Geoderma* 105, 125-140. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00096-9
- Martínez-Casasnovas, J., Ramos, M., Poesen, J., 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology* 58, 305-321. DOI: 10.1016/j.geomorph.2003.08.005
- Martínez-Casasnovas, J., Ramos, M., 2009. Erosión por cárcavas y barrancos en el área de viña del Alt Penedès-Anoia (NE España). *Cuad. Invest. Geogr.* 35, 223-238. DOI: 10.18172/cig.1220
- Marzen, M., Iserloh, T., de Lima, J., Fister, W., Ries, J., 2017. Impact of severe rain storms on soil erosion: experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Sci Total Environ.* 590, 502-513. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.190
- Mohamadi, M., Kavian, A., 2015. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 3, 273-281. DOI: 10.1016/j.iswcr.2015.10.001
- Montgomery, D., 2012. *Dirt: the erosion of civilizations*. University of California Press, Berkeley, CA.
- Montiel, K., Montes, E., Gouveia, E., 2009. Un ensayo de zonificación de áreas susceptibles a inestabilidad de laderas en el flanco norandino de Venezuela. *Rev. Geogr. Venez.* 50, 131-155.
- Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M., Folly, A., 1998. *The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide Version 3*. Silsoe College, Cranfield University, Bedford, UK.
- Needham, S., Macklin, M., 1992. *Alluvial archaeology in Britain: proceeding of a conference sponsored by the RMC Group plc*. Oxbow Books 27. Oxford, UK.
- Notti, D., Montserrat, O., Lamas, F., Mateos, R., Roldán, F., Fernández, F., Galve, J., Pérez, J., Azañón, J., 2015. Caracterización de movimientos de ladera en áreas urbanizadas integrando información geológica, datos de instrumentación directa e InSAR. En: Bustamante, J., Díaz-Delgado, R., Aragonés D., Afán I., García, D. (Eds.), *Memorias del XVI Congreso Teledetección Humedales y espacios protegidos*. Asociación Española de Teledetección, Sevilla, España. pp. 591-594.
- Ojeda, J., Sánchez, R., Prieto, A., Díaz, P., 2015. Tasas de erosión costera y ortofotos históricas: Una propuesta de corrección geométrica direccional. En: Bustamante, J., Díaz-Delgado, R., Aragonés, D., Afán I., García D. (Eds.), *Memorias del XVI Congreso Teledetección*

- Humedales y espacios protegidos. Asociación Española de Teledetección, Sevilla, España. pp. 612-615.
- Oldeman, L., Hakkeling, R., Sombroek, W., 1991. World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory Note. Global assessment of soil degradation GLASOD. Winand Staring Centre, International Society of Soil Science, Food and Agricultural Organization of the United Nations; International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences; Wageningen, Holanda.
- Oliveira, B., Santos, R., Câmara, T., Vicente, M., Lima, V., 2015. Mapeamento e análise multi-temporal da perda de solo por erosão na bacia de contribuição da represa do Rio Salinas, MG. En: Memórias, XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. INPE, João Pessoa, Brasil.
- Peña-Monne, J., De Dapper, M., De Vliegheer, B., 1995. Acumulaciones holocenas y geoarqueología en el sur de la isla de Eubea (Grecia). *Geographicalia* 32, 155-169. DOI: 10.26754/ojs_geoph/geoph.1995321728
- Pérez, M., García, M., 2013. Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Bol. Asoc. Geógr. Esp.* 61, 285-308.
- Petersen, G., Nizeyimana, E., Evans, B., 1998. Applications of geographic information systems in soil degradation assessments. En: Lal, R., Blum, W., Valentin, C., Stewart, B. (eds.), *Methods for assessment of soil degradation. Advances in Soil Science* 9. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 377-391.
- Pimentel, D., Burgess, M., 2013. Soil erosion threatens food production. *Agriculture* 3, 443-463. DOI: 10.3390/agriculture3030443
- Pineda, M., Martínez-Casasnovas, J., Vilorio, J., 2016. Cambios de cobertura vegetal y susceptibilidad a deslizamientos de tierras en la Serranía del interior, Venezuela. *Interciencia* 41, 190-197.
- Quinton, J., Morgan, R., 1996. Description of the European soil erosion model (EUROSEM) and an example of its validation. En: Pla, I., López R., Lobo, D. (Eds.), *Soil erosion processes on steep lands. Evaluation and modelling. International Society Soil Science; Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT)*. Mérida, Venezuela. pp. 239-258.
- Ramírez, R., Rivas, D., Flores, E., Ochoa, G., Oballos, J., Velázquez, J., Manrique, J., 2008. Clasificación de tierras con fines agrícolas en alta montaña: cuenca del río Pueblo Llano del estado Mérida. *Rev. Forest. Latinoam.* 23, 9-32.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., Yoder, D., 1993. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture Handbook* 703. USDA, Washington, DC.
- Riaño, O., 2010. Álgebra lineal en el procesamiento digital de imágenes. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Roa, J., 2007. Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Rev. Geogr. Venez.* 48(2), 183-219.
- Rosot, M., da Luz, J., Cruz P., Rosot, N., Oliveira, Y., 2008. Las geotecnologías como herramienta para el ordenamiento territorial: estudio de caso de un bosque de Araucaria en el sur de Brasil. *Rev. Forest. Latinoam.* 23, 111-130.
- Roy, D., Wulder, M., Loveland, T., Woodcock, C., Allen, R., Anderson, M., Helder, D., Irons, J., Jhonson, D., Kennedy, R., Scambos, T., Schaaf, C., Schott, J., Sheng, Y., Vermote, E., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., Gao, F., Hipple, J., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C., Kilic, A., Kovalsky, V., Lee, Z., Lymburner, L., Masek, J., Mccorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R., Zhu, Z., 2014. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens. Environ.* 145, 154-172. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001
- Sanders, D., 2004. Soil conservation. En: Verheye, W. (Ed.), *Land use, land cover and soil sciences. Vol. 4: Land use management. En: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Developed under the Auspices of the UNESCO. EOLSS Publishers. Oxford, UK.* pp. 198-218.
- Servicio de Conservación de Suelos (SCS)-USDA, 1988. *Manual de conservación de suelos.* 6a ed. Editorial Limusa, México DF.
- Stallings, J., 1981. *El suelo: su uso y mejoramiento.* 9a ed. Compañía Editorial Continental, México DF.
- Stocking, M., Murnaghan, N., 2003. *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra.* Ediciones Mundi-Prensa, Murcia, España.
- Suárez de Castro, F., 1956. *Conservación de suelos.* Colección Agrícola Salvat Editores, Barcelona, España.
- Suárez, J., 2001. *Control de erosión en zonas tropicales.* Instituto de Investigaciones sobre erosión y Deslizamientos; Universidad Distrital Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Troch, F., Hobbs, J., Donahue, R., 2003. *Soil and water conservation for productivity and environmental protection.* 4th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Ur, J., De Jong, L., Giraud, J., Osborne, J., MacGinnis, J., 2013. Ancient cities and landscapes in the Kurdistan Region of Iraq: the Erbil Plain. *Archaeological Survey 2012 Season. Iraq* 75, 89-117. DOI: 10.1017/S0021088900000425
- Valero, L., Delgado, F., López, R., 2010. Planificación del uso de la tierra en cuencas altas con base en el riesgo de erosión y la productividad del suelo. *Rev. Geogr. Venez.* 51, 93-111.

- Vanwallegem, T., Gómez, J., Infante Amate, J., González de Molina, M., Vanderlinden, K., Guzmán, G., Laguna, A., Giráldez, J., 2017. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. *Anthropocene* 17, 13-29. DOI: 10.1016/j.ance.2017.01.002
- Vidal G., P., 2003. Ecología y paisaje fenicio-púnico de la isla de Malta. En: Gómez B., C. (Ed.), *Ecohistoria del paisaje agrario: la agricultura fenicio-púnica en el Mediterráneo*. Colecciones Oberta 95. Universitat de València, Valencia, España. pp. 255-270.
- Vrieling, A., 2006. Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review. *Catena* 65, 2-18. DOI: 10.1016/j.catena.2005.10.005
- Wang, G., Sassa, K., 2003. Pore pressure generation and movement of rainfall - induced landslides: effects of grain size and fine particle content. *Eng. Geol.* 69: 109-125. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00268-5
- Wang, L., Huang, J., Du, Y., Hu, Y., Han, P., 2013. Dynamic assessment of soil erosion risk using Landsat Tm and H_j satellite data in Danjiangkou Reservoir Area, China. *Remote Sens.* 5, 3826-3848. DOI: 10.3390/rs5083826
- Wiegand, C., Rutzinger, M., Heinrich, K., Geitner, C., 2013. Automated extraction of shallow erosion areas based on multi-temporal ortho-imagery. *Remote Sens.* 5, 2292-2307. DOI: 10.3390/rs5052292
- Williams, J., 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. En: *Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources*. USDA-ARS, Washington DC. pp. 244-252.
- Williams, J., Berndt, H., 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. ASAE* 20, 1100-1104. DOI: 10.13031/2013.35710
- Wischmeier, W., Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *Agricultural Handbook* 537. USDA, Washington, DC.
- Zare, M., Nazari Samani, A., Mohammady, M., Salmani, H., Bazrafshan, J., 2017. Investigating effects of land use change scenarios on soil erosion using CLUE-s and RUSLE models. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 14, 1905-1918. DOI: 10.1007/s13762-017-1288-0
- Zhu, T., Zhu, A., 2014. Assessment of soil erosion and conservation on agricultural sloping lands using plot data in the semi-arid hilly loess region of China. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 2, 69-83. DOI: 10.1016/j.ejrh.2014.08.006