

Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo

Erosion map of Mexico soils and its possible implications for soil organic carbon pool

Martín A. Bolaños González^{1‡}, Fernando Paz Pellat², Carlos O. Cruz Gaistardo³,
Jesús A. Argumedo Espinoza³, Víctor M. Romero Benítez³ y Julio C. de la Cruz Cabrera¹

¹ Programa Mexicano del Carbono, Chiconautla No.8, Col. Lomas de Cristo. 56225, Texcoco, Estado de México.

[‡] Autor responsable (martinb72@gmail.com)

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Estado de México, México.

³ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Av. Héroe de Nacozari Sur N° 2301, Frac. Jardines del Parque. 20276. Aguascalientes, Ags., México.

RESUMEN

Debido a la poca disponibilidad de información a nivel mundial y de manera acentuada en México del fenómeno de erosión de suelos; en este trabajo se presenta el Mapa Nacional de Erosión escala 1:50 000, el cual consolida un esfuerzo realizado por varios años en los que fue necesario conjuntar diversas fuentes de información para que mediante técnicas de fotointerpretación de imágenes de satélite de alta resolución, cartografía especializada e información de campo se concretara este producto, mismo que representa la información básica requerida para que, en el futuro, sea posible estimar de manera general las pérdidas de carbono orgánico del suelo debidas a éste fenómeno, dado que es uno de los componentes menos estudiados y, por consiguiente, menos cuantificados en el balance general de este elemento. Así, este primer resultado muestra que el 76% de la superficie nacional tiene algún grado de afectación por erosión hídrica, que corresponde a 6.79% con un grado de erosión extrema, el 5.79% fuerte, 26.37% moderada y 37.06% leve. Los estados más afectados por erosión apreciable (superficie relativa) son: Distrito Federal, Tlaxcala, Estado de México y Michoacán y, por el contrario, los menos afectados: Tabasco, Quintana Roo y Campeche.

Palabras clave: erosión hídrica; carbono orgánico del suelo; degradación del suelo.

SUMMARY

Because of the limited availability of information worldwide and markedly in Mexico on the phenomenon of soil erosion, this paper presents the National Map of

Erosion with a scale of 1:50 000. This map consolidates several years of work for which it was necessary to combine several sources of information: techniques of photo interpretation of high-resolution satellite images, specialized mapping and field information. It includes basic information required for a second stage, in which it will be possible to estimate general losses of soil organic carbon to erosion, one of the least studied components and, thus, the least quantified in the general carbon balance. This first result reveals that 76% of the national territory has some degree of evident water erosion: 6.79% extreme, 5.79% severe, 37.06% moderate and 26.37% light erosion. The states most affected by significant erosion (relative area) are Federal District, Tlaxcala, State of Mexico and Michoacán, and conversely, the least affected are Tabasco, Quintana Roo and Campeche.

Index words: water erosion; soil organic carbon; soil degradation.

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo se define en términos generales como la eliminación acelerada de la capa superior del suelo de la superficie de la tierra por agua, el viento o la labranza (FAO, 2015). El proceso de la erosión está estrechamente vinculado con la desertificación y el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad, lo que acentúa los índices de pobreza y migración, disminución de la productividad del suelo e incrementa la frecuencia de eventos extremos como lluvias torrenciales, abandono de tierras por efectos de la sequía y desertificación (INEGI, 2014a). A pesar de que la erosión es la causa más común de la degradación del suelo en el mundo, ya que representa más del 80%

Como citar este artículo:

Bolaños González, M. A., F. Paz Pellat, C. O. Cruz Gaistardo, J. A. Argumedo Espinoza, V. M. Romero Benítez y J. C. de la Cruz Cabrera. 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. Terra Latinoamericana 34: 271-288.

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado junio de 2016.

Publicado en Terra Latinoamericana 34: 271-288.

de la superficie terrestre con algún grado de afectación (Oldeman, 1994), las estadísticas disponibles de la extensión y gravedad de este fenómeno en su mayoría son subjetivas, cualitativas, obsoletas, gruesas y poco fiables, además de que existen incertidumbres en las estadísticas disponibles sobre la extensión y gravedad de la erosión del suelo (Lal, 2003). En este sentido, FAO e ITPS (2015) mencionan que durante la última década, las cifras publicadas de erosión hídrica se encuentran en un orden de magnitud de 20 Pg año⁻¹ a más de 200 Pg año⁻¹, por lo que esta enorme variación sugiere, en un principio, que las estimaciones de la erosión global del suelo a nivel mundial son muy inciertas, aunque en un análisis más detallado muestra que las estimaciones superiores a 50 Pg año⁻¹ no son realistas.

Las estadísticas que se utilizan ampliamente con respecto a la degradación del suelo, son las generadas por Oldeman (1994), que se diseñaron para fines de comparación internacional en el proyecto denominado Evaluación Mundial de la Degradación de Tierras (GLASOD, por sus siglas en inglés), quien reporta que la erosión hídrica es el principal factor inducido por actividades humanas de degradación del suelo, estimando una superficie total de tierras afectadas de 1094 millones de hectáreas (Mha), de las cuales 751 Mha están afectadas gravemente; por erosión eólica 549 Mha, de las cuales 296 Mha están gravemente afectadas. En menor medida los suelos han sido afectados por degradación química (239 Mha) y física (83 Mha).

En México, los principales tipos de degradación del suelo son: erosión hídrica (37%), erosión eólica (14.9%) y degradación química; en tanto que el 36% de la superficie se encuentra sin algún tipo de degradación. De acuerdo con el nivel de degradación el 30.9% es moderada, 19.6% ligera, 12.6% severa y 0.9 extrema (SEMARNAT, 2002); aunque con fuertes variaciones que dependen de la fuente de información utilizada (Balbontín *et al.*, 2009). En contraste, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), mediante el uso de técnicas de fotointerpretación de imágenes de satélite y puntos de verificación en campo, reportó que cerca de 52.86% de la superficie de México está afectada por erosión hídrica (INEGI, 2014b), aunque posteriormente, el mismo INEGI (2015a y 2015b) reportó que el 66% de la superficie nacional está afectado por erosión hídrica, de los cuales el 6% es erosión fuerte o extrema, aproximadamente

el 24% se clasificó como moderada, el 36% como leve y casi el 34% como suelo estable.

La erosión acelerada del suelo, agravada por las perturbaciones antropogénicas, es un proceso destructivo, ya que agota la fertilidad y degrada la estructura del suelo, reduce la profundidad efectiva de enraizamiento, destruyendo el más básico de todos los recursos naturales (Lal, 2003) y agrava la desertificación (Lal, 2004b; INEGI, 2014a); sin embargo, a sus efectos sobre la dinámica del carbono (C) y emisión de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera no se les ha dado el énfasis que merecen (Lal, 2003). La degradación del suelo exacerba el agotamiento del carbono orgánico del suelo (COS) debido a la reducción en la producción de biomasa y bajas cantidades de residuos que se integran al suelo (Lal, 2004b). Así, el uso de prácticas de manejo que previenen o reducen la erosión pueden ser la mejor estrategia para mantener o aumentar, posiblemente, el almacenamiento de C del suelo en el mundo (Gregorich *et al.*, 1998). Asimismo, el COS es una biomembrana que filtra los contaminantes, reduce la carga de sedimentos en los ríos, disminuye la hipoxia en ecosistemas costeros, degrada contaminantes y es un sumidero importante de CO₂ y CH₄ atmosféricos (Lal 2004a).

La Importancia del Suelo como Almacén de Carbono

El almacén de C del suelo comprende dos componentes: el COS, estimado en 1550 Pg y el carbono inorgánico del suelo (CIS) estimado en 750 Pg (Eswaran *et al.*, 1993; Batjes, 1996), lo que da un almacén total de C en el suelo de aproximadamente 2300 Pg a 1 m profundidad. Aproximadamente 615 Pg del COS se almacena en los primeros 20 cm; en tanto la densidad a 1m de profundidad varía desde 30 Mg ha⁻¹ en climas áridos a 800 Mg ha⁻¹ en los suelos orgánicos de las regiones frías, con un rango predominante de 50-150 Mg ha⁻¹ (Lal, 2004a). De acuerdo con los datos presentados por Eswaran *et al.* (1993), los suelos que almacenan la mayor cantidad de C a nivel mundial son los Histosoles (357 Pg), Inceptisoles (352 Pg) y Entisoles (148 Pg); aunque los que tienen mayor densidad de C en promedio son los Histosoles (2045.85 Mg ha⁻¹), Inceptisoles (305.64 Mg ha⁻¹) y Andosoles (163.11 Mg ha⁻¹), siendo el promedio a nivel mundial para los suelos de 116.56 Mg ha⁻¹. Cada año,

los suelos del mundo liberan aproximadamente el 4% de su almacén (60 Pg) a la atmósfera, que es diez veces la combustión de combustibles fósiles, aunque la magnitud exacta de la pérdida no se conoce y, de hecho, puede ser mucho mayor debido a las perturbaciones antropogénicas y la degradación de los ecosistemas (Lal, 2003).

El COS se remueve principalmente por el viento y sedimentos acarreados por el agua a través de procesos de erosión. Algunos de los sedimentos enriquecidos con COS se redistribuyen sobre el paisaje, otros se depositan en depresiones, y algunos son llevados a los ecosistemas acuáticos, donde contribuyen a la eutrofización, anoxia, turbidez, emisiones de gases de efecto invernadero (Starr *et al.*, 2000) y la degradación de la calidad del agua en general, antes de que una parte de ellos sean finalmente almacenados en los sedimentos. Aunque una parte del C trasladado por la erosión puede ser enterrado y redistribuido, el resto se emite a la atmósfera, ya sea como CO₂ por la mineralización o como CH₄ por la metanogénesis (Lal, 2004a). Así, mientras que la erosión y la deposición solamente redistribuyen suelo y C orgánico, la mineralización resulta en una pérdida neta de C del sistema suelo a la atmósfera (Gregorich *et al.*, 1998).

Lal (1995) estimó que 1.14 Pg C año⁻¹ se emite a la atmósfera por la erosión hídrica. Posteriormente, Lal (2003 y 2004a) calculó que, en la escala global, de los 4.0 a 6.0 Pg C año⁻¹ trasladados por la erosión hídrica, 2.8-4.2 Pg C año⁻¹ son redistribuidos sobre el paisaje y se transfieren a depresiones, en tanto 0.4-0.6 Pg C año⁻¹ se transportan al océano y pueden ser mineralizados o sepultados con los sedimentos marinos y los ecosistemas costeros y 0.8-1.2 Pg C año⁻¹ se emiten a la atmósfera.

La erosión es uno de los pocos procesos del suelo que puede eliminar COS estable en grandes cantidades, por lo que sus efectos pueden ser dramáticos (Starr *et al.*, 2000). Por lo tanto, la importancia de la degradación del suelo en general y la de la erosión en particular, en la dinámica del carbono y las posibles emisiones de gases de efecto invernadero, no se puede ignorar, por lo que el control efectivo de la erosión del suelo es esencial para el uso sostenible de los suelos agrícolas, pecuarios y forestales, así como la mejora de la calidad del medio ambiente.

En este trabajo se presenta una estimación tipo semi-cuantitativa de la erosión de los suelos de México, como un primer paso para la estimación de las pérdidas

de COS por este proceso y la estimación de emisiones de CO₂ a la atmósfera. El mapa generado de la erosión del suelo en México, basado en evidencia de campo e información satelital, será usado como insumo en estudios posteriores de estimación de la erosión, hídrica principalmente, analizando el transporte de sedimentos con mediciones en estaciones hidrométricas, así como sus contenidos de carbono.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se reporta la elaboración del mapa nacional de erosión, el cual considera cinco grados y tres formas de erosión hídrica. Se realizaron procesos de fotointerpretación a partir de la información espectral contenida en imágenes de satélite para definir los polígonos de acuerdo al grado de erosión, dado que éstas contienen información útil y han sido utilizadas de manera efectiva para evaluar áreas erosionadas (Vrieling, 2006). El etiquetado de los atributos de los polígonos se apoyó en trabajo de campo y se sustentaron con datos y evidencias fotográficas puntuales. Este esfuerzo representa el primer acercamiento de conocimiento a los diversos grados y formas de la erosión hídrica del país a la escala de visualización 1:50 000, haciendo énfasis en los procesos acelerados o inducidos por el hombre. Los insumos principales fueron los conglomerados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009 de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la cobertura nacional de imágenes multiespectrales y pancromáticas del satélite Spot 5, con 10 y 2.5 m de resolución espacial, respectivamente, adquiridas durante 2007, principalmente en la época seca (enero-mayo), en la que es más común encontrar imágenes de satélite libres de nubes; mismas que fueron suministradas por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Para realizar los procesos de fotointerpretación se realizaron fusiones de las bandas pancromáticas y multiespectrales, que resultaron en imágenes compuestas en falso color con tamaño de píxel de 2.5 m.

Adicionalmente, se empleó información cuantitativa sobre perfiles de suelo y fotografías panorámicas georeferidas generadas en el INFyS para validar las coberturas de erosión extrema, fuerte y suelo estable a la erosión, incluyendo 23 000 perfiles de suelo levantados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de 1968 a 2008

(base de perfiles del suelo INEGI-COLPOS), con información indirectamente relacionada con procesos erosivos (textura, materia orgánica, etc.) de diversa magnitud, así como estudios y descripciones de campo sobre erosión en 4750 conglomerados, levantados por CONAFOR en su Inventario Nacional Forestal y de Suelos, que describieron en campo directamente la erosión y degradación del suelo, su causa, magnitud y principales relaciones geográficas. Ésta última información se utilizó de manera adicional a la fotointerpretación de imágenes de satélite para definir las áreas con erosión moderada y leve; es decir, se agregó evidencia de campo. Una debilidad del uso de información de perfiles de suelo es el amplio periodo que representa, generando datos difíciles de interpretar en términos del carbono (propiedad dinámica), pero no para el caso de la textura del suelo.

Conceptos y Criterios de Diagnóstico

Zona de exclusión. Todos aquellos rasgos geográficos con posibles evidencias de erosión, pero no comparables con escurrimientos superficiales relativamente recientes. Pueden ser de cuatro tipos:

- a) Rasgos de erosión geológica neta: declives naturales abruptos, abanicos aluviales extremos, cauces estables, afloramientos rocosos, malpaíses y dunas.
- b) Rasgos de erosión antrópica dominante: Asentamientos humanos, con superficie de suelo removida para construcción urbana, bancos de material a cielo abierto, salinas artificiales o con remoción de material por construcción de caminos y obras de infraestructura mayor. Los asentamientos humanos se consideran zonas de erosión extrema debido a que la mayor parte del suelo superficial ha sido removido por obras de construcción o ha sido sepultado bajo una capa de concreto (Tecnosoles ekránicos). Los asentamientos humanos incluyen áreas urbanas consideradas por INEGI. Sin embargo, existen áreas con población densa no consideradas aún dentro de la cartografía temática oficial, pero para efectos de este trabajo han sido digitalizadas y representadas espacialmente. Los criterios para delimitar asentamientos humanos son dos: área mínima superior a 10 ha y ser identificables claramente en la imagen de satélite en escala de visualización 1:50 000. La escala de visualización se refiere a la proyección en pantalla

de los insumos satelitales y otras fuentes, donde se realiza el rayado de polígonos en forma manual. Para el caso de imágenes satelitales, el tamaño de los píxeles fue de 2.5 m. En términos generales, la escala 1:50 000 tiene un tamaño mínimo de polígono de 10-20 ha y puede interpretarse como escala 1:125 000 en la impresión del mapa generado (*sensu* INEGI).

- c) Rasgos geográficos de acumulación de suelo. Representa en la práctica el concepto inverso de erosión: pantanos, zonas palustres, deltas y terrenos sujetos a inundación periódica.
- d) Rasgos geográficos complementarios: Cuerpos de agua de carácter intermitente o permanente.

Erosión. Es el desgaste que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos como el viento y el agua y que son acelerados por la acción del hombre (INEGI, 2014a). El proceso de desgaste/remoción fue antecedido de un intemperismo profundo del material parental (afloramientos rocosos y declives naturales abruptos) y es predecesor de un proceso intenso de transporte de sedimentos (cauces estables) con posible acumulación de material de suelo (rellenos aluviales y terrenos sujetos a inundación).

Evidencia de erosión. Ocurre cuando es posible delimitar e interpretar el grado y forma erosiva de un suelo en una imagen de satélite a partir del conocimiento y experiencia de campo del analista fotointérprete o por medio de evidencias históricas obtenidas mediante trabajo de campo. Los casos más frecuentes corresponden a eventos de erosión fuerte, extrema y suelos estables a la erosión. Esta situación es típica de áreas de vegetación densa o cubrimiento de nubes en las imágenes de satélite, donde las estimaciones fueron realizadas usando información de contexto y evidencias indirectas.

Erosión apreciable. Evidencia visual o documentada en campo de la remoción del horizonte superficial o exposición de la cementación o lecho rocoso. La intensidad de la forma erosiva y la proporción de superficie afectada es el criterio principal para diferenciar el grado fuerte o extremo de la erosión.

- *Erosión extrema.* Remoción del horizonte superficial o exposición frecuente de la cementación o lecho rocoso en más del 90% de la superficie del polígono de erosión cuando la forma erosiva dominante es lineal o planar y en cualquier proporción de la superficie cuando la forma erosiva es masiva.

- *Erosión fuerte.* Remoción del horizonte superficial o exposición frecuente de la cementación o lecho rocoso entre un 50 y 90% de la superficie del polígono de erosión cuando esta es lineal o planar. Se incluye la erosión masiva, excepto cuando corresponde a un rasgo de exclusión geomorfológica.
- *Suelo estable.* Cuando el suelo no presenta evidencias de erosión tanto en la imagen de satélite como evidencias de campo que indiquen afectación por escurrimiento superficial en el terreno. Generalmente sucede cuando la cobertura vegetal es cerrada, la vegetación es prístina o está en fase de sucesión muy temprana.

Erosión no apreciable. Cuando es necesario un análisis de elementos de fotointerpretación exhaustivo y la disposición de elementos cartográficos adicionales para lograr establecer algunas evidencias de erosión, por ejemplo: la posición en el relieve, el grado de afectación humana sobre la cobertura original del suelo y la erodabilidad de éste, etc.

- *Erosión moderada.* No hay evidencias visuales de erosión fuerte o extrema en la imagen de satélite, por lo que fue necesario un análisis de elementos de fotointerpretación tales como patrones de drenaje típicos, coberturas de vegetación abierta, posición en la geoforma relacionada con fenómenos de intensidad gravitacional o mayor evidencia de actividad humana aún en zonas con acumulación o cobertura vegetal cerrada.
- *Erosión leve.* No hay evidencias visuales de erosión fuerte o extrema en la imagen de satélite. El análisis de elementos de fotointerpretación y la disposición de elementos cartográficos adicionales no logró aportar alguna evidencia significativa de erosión tanto por causa antrópica como asociada (natural-antrópica).

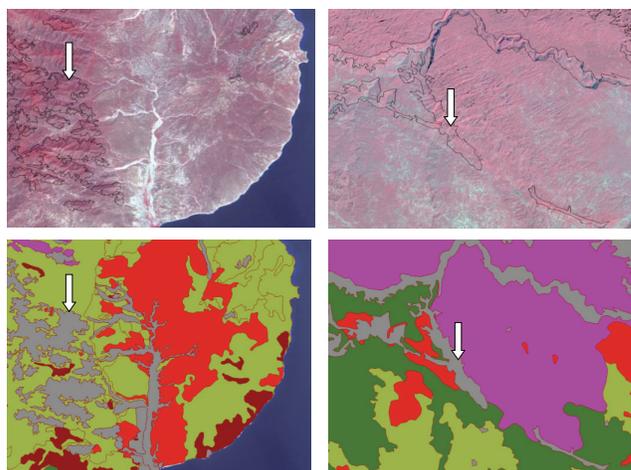
Forma de la erosión. Patrón espacial visible durante el proceso de fotointerpretación o donde existe documentación de formas erosivas ocultas por vegetación o actividad humana.

- *Erosión planar.* También conocida como erosión laminar. Ocurre cuando el desprendimiento del horizonte superficial es relativamente homogéneo en el polígono de erosión. Se considera grado fuerte cuando la evidencia visual ocupa aproximadamente entre 50 y 90% de la superficie del polígono y grado extremo cuando supera el 90%.

- *Erosión linear.* Incluye todas las formas de erosión con evidencias de cárcavas o surcos, la cual se consideró de grado fuerte cuando los patrones lineares se identificaron en más del 50% del polígono y grado extremo cuando la erosión linear se asoció fuertemente con erosión planar de grado extremo o cuando los patrones lineares ocupan más del 90% de la superficie del polígono de erosión.
- *Erosión masiva.* Están incluidos en este concepto los deslizamientos naturales de laderas escarpadas por causa de falla o fractura geológica. También se incluyen algunas formas de erosión planar o linear relacionadas con geoformas extensas donde muchas veces el hombre ha incrementado el proceso erosivo. Las formas especiales de abanico aluvial de gran superficie son consideradas zonas de exclusión geomorfológica.

Criterios para Delimitar Zonas de Exclusión

Declives naturales abruptos. La identificación de los declives abruptos, se realizó empleando el modelo de elevación obtenido a partir de las curvas de nivel 1:50 000. Se generaron las áreas con pendiente mayor a 40%, valor arbitrario que fue seleccionado a partir de experiencia en campo. Las áreas resultantes se contrastaron con la imagen de satélite para determinar la autenticidad del rasgo localizado (Figura 1).



a) Declive mayor a 55%. Sierra San Bernardo, Baja California Sur.

b) Declive entre 40 y 50%. Cordón El Pájaro, Chiapas.

Figura 1. Identificación, delimitación y contraste de zonas con declives naturales abruptos.

Afloramientos rocosos y malpaíses. Estructuras formadas por intemperismo del material rocoso o por el efecto gravitacional o de erosión eólica del escaso suelo presente en laderas escarpadas que terminan por desnudar la roca. También se incluyen derrames volcánicos con flujo lento que fueron solidificados al exterior de la corteza terrestre. Los afloramientos rocosos no tienen pérdida significativa de material reciente de suelo y se encuentran, por lo general, en las partes más elevadas de los sistemas montañosos o en sitios hiper-áridos donde la actividad humana es menor. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de afloramientos rocosos extensos.

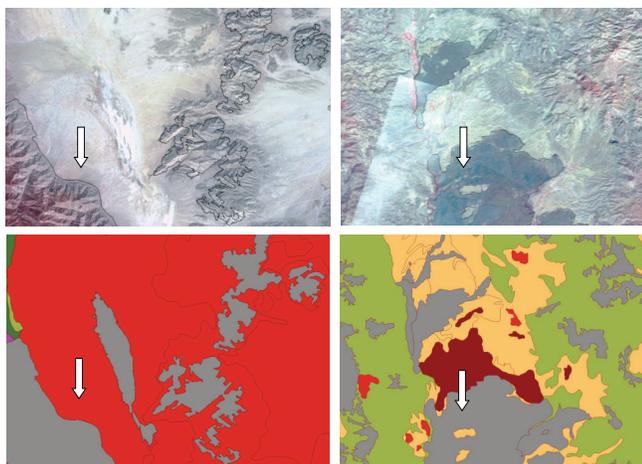
Cauces estables. Los cauces pueden clasificarse de acuerdo a su orden o posición dentro de la red de avenamiento, entre menor sea el orden del cauce el proceso erosivo resulta más activo. Los cauces de orden más alto corresponden a los cauces más estables. El diagnóstico de la erosión reciente excluyó los cauces estables debido a que son el transporte fluvial natural de sedimentos cuesta abajo. Mediante procesos de cruce entre los modelos digitales de elevación y del uso de la herramienta *Stream Order* de *ArcView^{MR}* fue posible generar un primer acercamiento del ordenamiento fluvial según el índice de Horton (Horton, 1945; Pidwirny, 2006), seleccionando los cauces de orden 4 y 5 (600 m de amplitud promedio, 100 m amplitud en más del 50% del polígono, superficie promedio mayor a 4000 ha, generalmente próximos a desembocadura

o diseccionando valles extensos). Se corroboró la existencia del cauce y se afinó el límite mediante comparación directa con la imagen satelital, tal como se muestra en la Figura 3.

Dunas y zonas arenosas. La dinámica de formación en las dunas se relaciona estrechamente con la erosión eólica y generalmente no presentan evidencias de erosión hídrica. Para efectos de este trabajo, se delimitaron únicamente las zonas arenosas más importantes por su extensión y que no presentan evidencias de erosión hídrica.

Salinas. Se delimitaron las zonas que por su proximidad al mar o zonas donde su posición geográfica interior está asociada con clima extremo, lo que favorece la evaporación del agua para obtener sal. Los valores de reflectancia natural de los suelos salinos son altos en el visible e infrarrojo cercano de las imágenes de satélite (Rao *et al.*, 1995; Metternicht y Zinck, 2003), semejantes a las reflectancias de suelos con erosión extrema, por tanto, fue conveniente separarlos para evitar una posible confusión en el análisis del proceso erosivo (Figura 4).

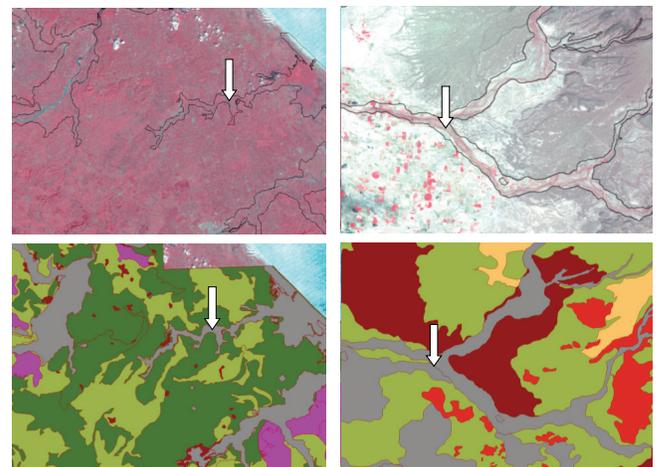
Zonas palustres y terrenos sujetos a inundación. Son sitios donde los sedimentos previamente removidos y transportados son acumulados constantemente. Las zonas palustres, los pantanos y los terrenos sujetos a inundación están asociados frecuentemente entre sí y en ocasiones están conectados con sitios lacustres, en especial los próximos al límite costero; sin embargo, no



a) Afloramiento rocoso: Cañada La Providencia, Baja California.

b) Malpaís: Volcán Cerro Blanco, Sonora.

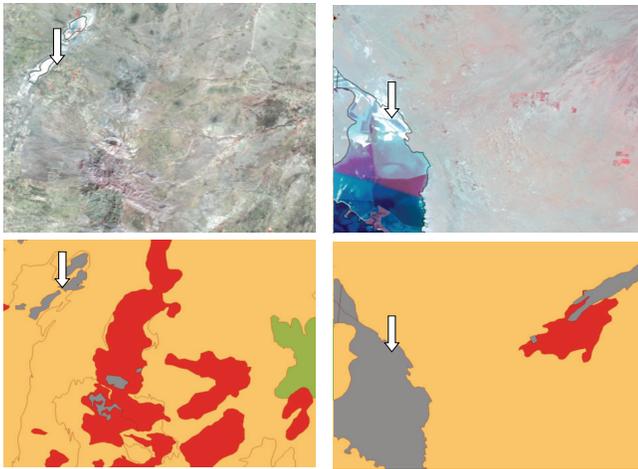
Figura 2. Identificación, delimitación y contraste de zonas con afloramientos rocosos extensos.



a) Río Bobos y río Tecolutla, Veracruz.

b) Arroyo San Lucas, Baja California Sur.

Figura 3. Identificación, delimitación y contraste de cauces estables.



a) Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí.

b) Salinas Guerrero Negro, Baja California Sur.

Figura 4. Identificación, delimitación y contraste de salinas naturales o artificiales.

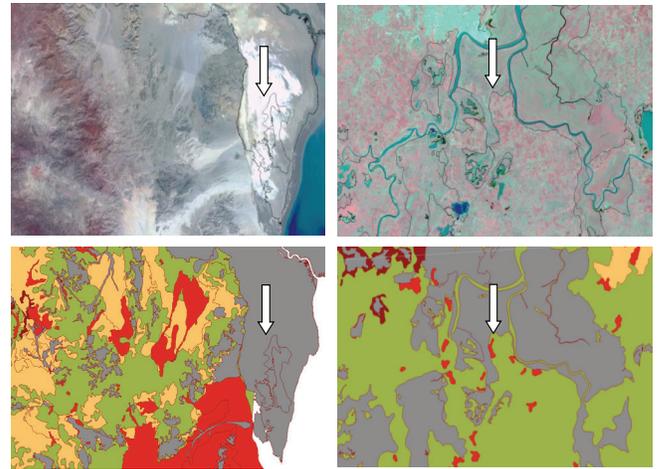
se consideran para este trabajo los sitios lacustres como zonas de exclusión natural debido a que en general su delimitación no corresponde necesariamente con el patrón erosivo observado en la imagen de satélite. Tanto las zonas palustres, como los terrenos sujetos a inundación fueron obtenidos de la cartografía nacional topográfica y geológica 1:50 000 y sus límites están validados o ajustados directamente sobre la imagen satelital (Figura 5).

Asentamientos humanos. Se consideran zonas de erosión extrema debido a que la mayor parte del suelo superficial ha sido removido por obras de construcción o ha sido sepultado bajo una capa de concreto (Tecnosoles ekránicos). Los asentamientos humanos incluyeron áreas urbanas consideradas por INEGI y áreas con población densa, no consideradas aún dentro de la cartografía temática oficial, pero que tuvieron un área mínima superior a 10 ha y se identificaron claramente en la imagen de satélite en escala de visualización 1:50 000.

Cuerpos de agua. Se excluyeron del concepto de suelo cualquier material encontrado bajo agua, con más de 1 m de profundidad durante la mayor parte del año y con una superficie mayor de 0.5 ha.

Criterios de Fotointerpretación para Identificar y Delimitar Áreas con Erosión Hídrica

Se consideraron diversos criterios relacionados con textura, matiz, tono, moteado y patrón espacial de la imagen de satélite, así como interpretación de



a) Pantano y zona de inundación en la Reserva de la Biósfera del Alto Golfo de California, Baja California.

b) Confluencia de los ríos Uxpanapa y Coatzacoalcos con el estero Cuanochapa, Veracruz.

Figura 5. Identificación, delimitación y contraste de zonas palustres, sujetas a inundación o pantanos extensos.

la uniformidad en los tamaños de polígonos resultantes y escalas máximas para digitalización. Algunos ejemplos de los grados y formas de erosión más comunes se muestran en la Figura 6.

Procedimiento para Delimitar Erosión no Apreciable: Erosión Leve o Moderada

Una gran proporción de áreas en el país no manifestaron evidencias claras de erosión a partir del análisis exclusivo de las imágenes de satélite. Esto se debió tanto a los ruidos externos a la imagen (nubes o excesiva brillantez) como a la naturaleza homogénea del terreno, donde no se aprecia el contraste de los suelos con y sin remoción del horizonte superficial. Para generar nuevos elementos exógenos de fotointerpretación fue conveniente establecer las partes más altas y más bajas del paisaje, evaluar la transición de la geoforma y la sección donde la perturbación humana es más fuerte, identificar la orientación donde las corrientes recorren cuesta abajo con mayor devastación (sotavento, barlovento), asimismo, tener información más precisa del tipo de avenamiento asociando al elemento geomorfológico de la red hídrica.

Ajuste por Condiciones Geomorfológicas

Una alternativa eficiente fue el procesamiento de los modelos digitales de elevación para obtener un modelo de pendientes del terreno para analizar patrones

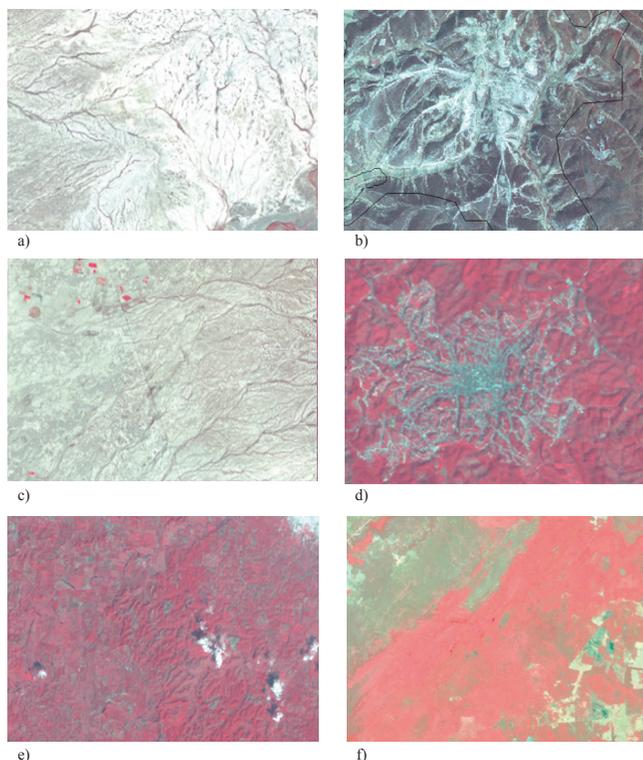


Figura 6. Ejemplos de erosión hídrica dominante: a) Erosión planar extrema, asociada con fuerte erosión en cárcavas, b) Erosión linear extrema (asociada con erosión planar extrema), c) Erosión linear fuerte (con relictos de erosión planar extrema), d) Erosión antrópica intensa, asociada con erosión linear moderada e) Erosión leve (oeste) a moderada (este), se aprecia el avenamiento linear asociado con cobertura vegetal cerrada y f) Suelo estable, asociado con alto contenido de COS y cubierta vegetal bien conservada.

de erosión. Aunque en la mayoría de los casos la relación entre pendiente y grado de erosión es evidente, esta depende del contexto (p. ej.: geomorfometría y longitud de la pendiente) y, en otros casos, de otros factores con mayor influencia (p. ej.: uso del suelo y vegetación). Las pendientes, fueron estandarizadas en cuatro grupos diferentes:

a) Menor de 1%. Sitios con pendiente plana, característicos de valles, llanuras costeras o zonas de relleno aluvial y que son profundos por lo general. Muchas de estas zonas son empleadas para asentamientos humanos y agricultura de riego. En general son suelos con erosión leve, donde las excepciones más importantes corresponden a las superficies de meseta que pueden presentar rasgos de erosión fuerte o incluso extrema.

b) De 1 a 4%. Sitios con pendiente casi plana, característicos de lomeríos muy suaves. Muchas

regiones agrícolas de temporal están asentadas aquí. Generalmente los arrastres de material de estos sitios, en especial aquellos cercanos al pie de monte, alcanzan su punto máximo de velocidad y con ello su mayor poder erosivo de manera natural.

c) De 4 a 16%. Declives inferiores. Situados en la sección baja de una ladera, en una colina bien desarrollada o en una bajada pronunciada. Los declives inferiores están más afectados por las actividades humanas por su acceso más fácil y su mayor densidad de vías de transporte que las laderas fuertes.

d) De 16 a 40%. Declives superiores. Situados en la parte alta de una ladera o en un banco de terraza. Normalmente las sierras altas de tipo escarpado o plegado tienen bien diferenciada la localización de este tipo de declive. En campo puede distinguirse cuando un declive tiene una sección transversal cóncava o convexa. Las formas cóncavas son regularmente más erosionadas que las formas convexas, dependiendo de la posición geomorfológica del área de evaluación.

e) Mayores a 40%. Son identificadas finalmente como declives abruptos y se consideran zonas de exclusión no comparable con la erosión hídrica reciente.

Finalmente, cuando el modelo de pendientes fue construido, se realizó un retoque o ajuste manual de los linderos contra el fondo de la imagen de satélite georeferida (Figura 7).

Ajuste por Erodabilidad del Suelo

La sequía aparente y la reflectancia elevada que proporciona una superficie blanca pueden reducir la efectividad en el diagnóstico de la erosión, lo cual puede deberse a que suelos oscuros y profundos son ocultados con una superficie pedregosa, que refleja una aparente erosión extrema, pero que en realidad esconde suelos fértiles y mejor protegidos contra la erosión, por lo que fue necesario utilizar información adicional (como el tipo de suelo, textura y materia orgánica) para definir si la alta reflectancia visualizada se debe a este factor o a erosión extrema, tal como se muestra en los ejemplos de la Figura 8.

Ajuste por Presión Antrópica

Indudablemente la actividad humana es el único factor no natural y una de las causales más importantes de la aceleración del proceso erosivo. Pudieron

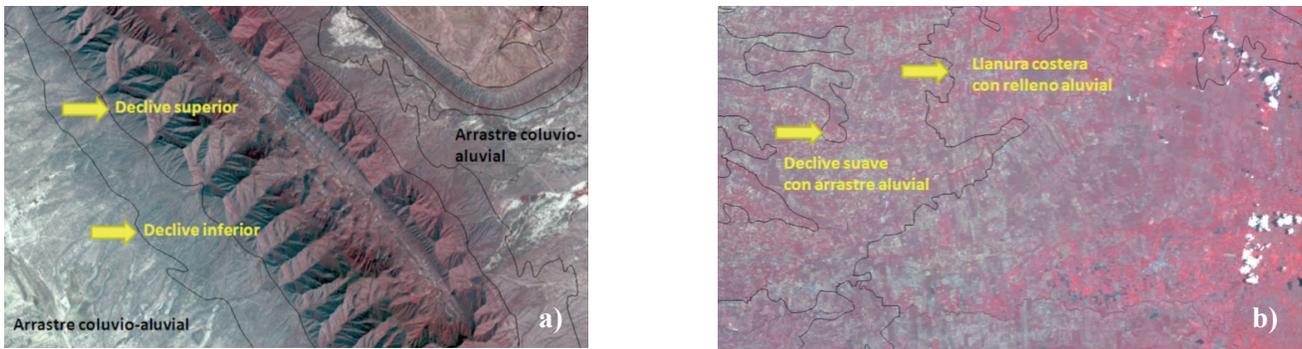


Figura 7. Ajuste del proceso erosivo a partir de la orientación y grado de inclinación de la pendiente. La imagen a), muestra que la cobertura vegetal protectora más intensa se localiza en el declive superior. Por el contrario, sobre el declive inferior cruzan las corrientes más veloces que alcanzan su punto máximo en las zonas de arrastre coluvio-aluvial. La imagen b), corresponde a una zona costera donde la llanura aluvial es diferenciable con el apoyo del modelo de pendientes. La zona de transición entre el declive suave inferior y el relleno aluvial es la zona con mayor potencial de erosión. Conocer la posición geomorfológica es importante para sustentar los criterios de separación entre los procesos erosivos leves y moderados.

identificarse sobre las imágenes de satélite varios rasgos antrópicos causales de remoción directa del suelo: bancos de material, construcción urbana y obras de transporte, presión por actividad rural intensa y obras hidráulicas de diversa magnitud (Figura 9).

Ajuste por Condiciones Climáticas

Finalmente, fue conveniente asociar los polígonos con erosión y su medio climático (expresada generalmente como un tipo particular de uso del suelo y vegetación), debido a que gran parte de los polígonos con erosión extrema están localizados en regiones de extrema aridez, donde el régimen de lluvias torrencial es el factor causal más relacionado. Por otro lado, la relación del clima y el componente geológico es tan estrecha que ciertas regiones de granito situadas bajo

régimen de lluvia abundante tienen fuerte erosión, aún bajo cobertura vegetal relativamente cerrada (Figura 10).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante aplicaciones del software ArcInfo^{MR} (dissolve, unión, eliminate, etc.) fueron integradas las coberturas relacionadas con erosión en una cobertura única en formato coverage y posteriormente exportada a cobertura shape para visualización en Arc View^{MR}, Arc Explorer^{MR}, Quantum GIS^{MR}, etc. En la Figura 11 se muestra el mapa de erosión actual obtenido como resultado del presente trabajo. La escala de visualización de esta figura no permite apreciar los detalles de los polígonos generados, pero el producto digital generado evita esta restricción.

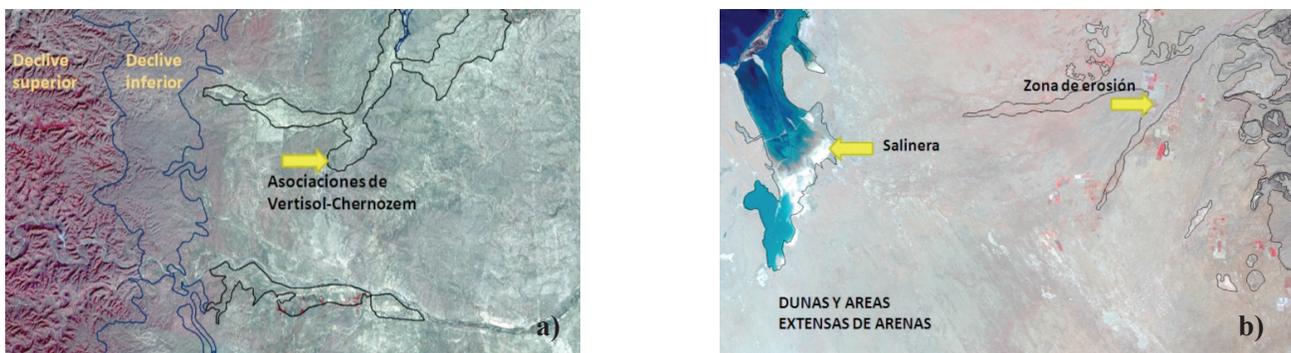


Figura 8. Ajuste del grado de erosión en polígonos con información edafológica disponible. a) Algunos ejemplos frecuentes son los Vertisoles áridicos y los Kastañozems hipercálcicos, que por un lado reflejan histogramas de alto contraste, similares a sitios con extrema erosión, pero que en realidad poseen alta fertilidad natural (profundidad, carbono orgánico, ligera basicidad) ideal para la actividad agrícola. b) Un caso especial son los Arenosoles con gran extensión, que en general no tienen problemas de erosión hídrica significativa, excepto los situados en los márgenes o dentro de los cauces más inestables.



Bancos de material localizados en el área metropolitana de Monterrey. Se observa el contraste de la superficie afectada con el complemento de la imagen.

Cuerpos de agua pequeños y frecuentes, dispuestos sobre una región rica en limolitas con gran potencial de erosión. Es notorio el contraste de la superficie erosionada que se encuentra justamente en la línea de conexión entre bordos de agua cuesta abajo.

Superficie de suelo según grado de erosión hídrica

- Extrema
- Fuerte
- Moderada
- Leve
- Suelo estable
- No aplica
- No determinado

Figura 9. Ajuste del grado de erosión en polígonos con información de actividad humana disponible.

Estructura de la Tabla de Atributos (nombres de campos y valores)

La tabla contiene 71 211 polígonos con atributos, de los cuales el 53% fue obtenido por fotointerpretación directa (erosión fuerte, erosión extrema y suelo estable

a la erosión), el 36% fue obtenido por modelación geomorfológica con ajuste directo por fotointerpretación y análisis de otras variables asociadas. Finalmente el 11% de los polígonos fue obtenido a través de diversas coberturas temáticas -escala 1:50 000- y con ajuste directo sobre imagen de satélite.

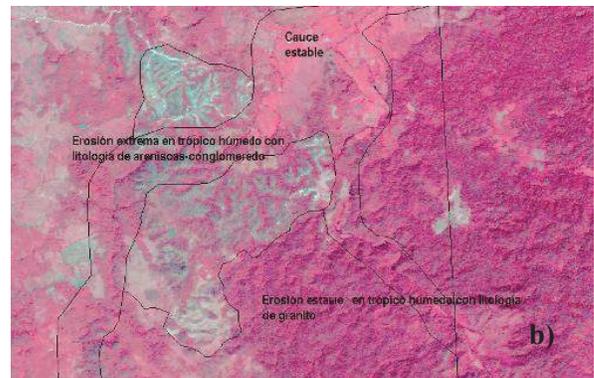
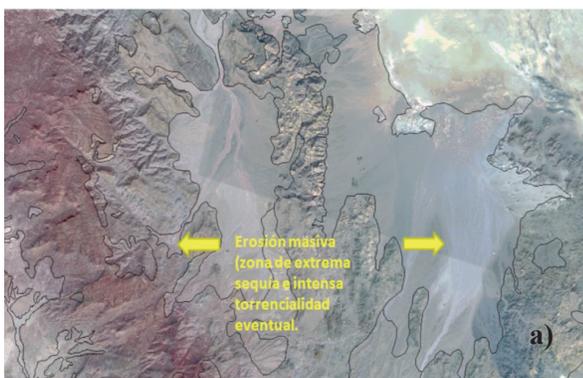


Figura 10. Ajuste del grado de erosión en polígonos con información climática disponible. a) Erosión extrema en ambiente de intensa sequía natural. b) Erosión extrema (zona de areniscas) y leve (zona de granito), con similar condición de precipitación, pero con litología y grado de actividad humana diferente.

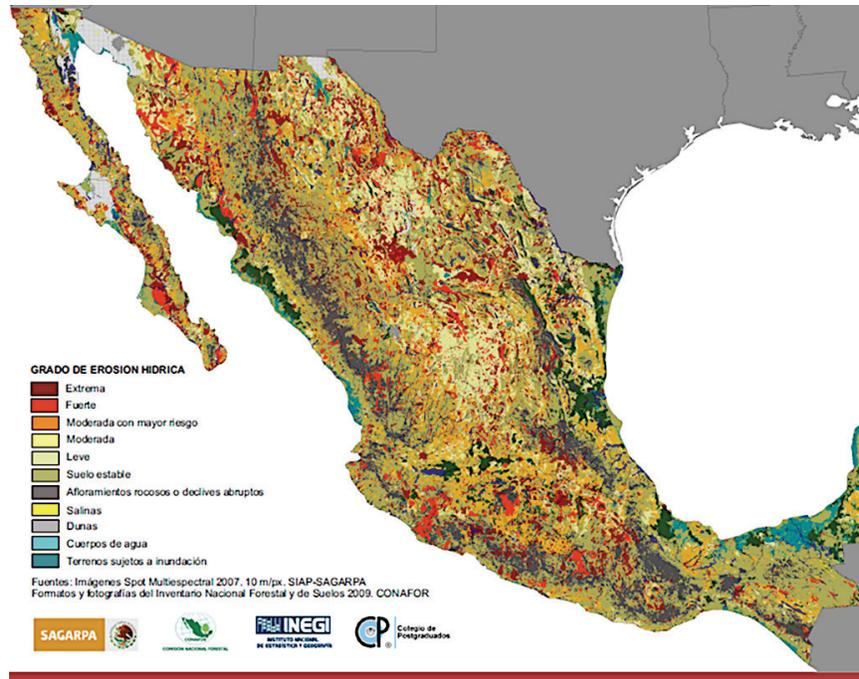


Figura 11. Mapa Nacional de Erosión, escala 1:50,000. SAGARPA- INEGI-CONAFOR- COLPOS.

Los valores empleados para describir los atributos de erosión son finitos y están distribuidos en cuatro columnas básicas de información (Cuadro 1).

De acuerdo con los resultados obtenidos, el 76% de la superficie de México tienen algún grado de erosión

hídrica, siendo el predominante el grado leve (37.06%) y moderado (26.37%), tal como se puede apreciar en la Figura 12. El resultado obtenido es similar al reportado por Oldeman (1994) a nivel mundial que es del 80% (incluye erosión hídrica y eólica) para erosión

Cuadro 1. Estructura de la tabla de atributos del Mapa Nacional de Erosión.

Grado	Forma	Componente geomorfológico	Componente antrópico
Extrema	Linear	Abanico aluvial	Construcción
Fuerte	Planar	Aluvial profundo	Caminos y carreteras
Moderada	Masiva	Cauce estable	Extracción
Leve	No apreciable	Coluvial-Aluvial	Presión rural
Suelo estable	Suelo estable	Cuerpo de Agua	Vegetación densa
Afloramiento rocoso	No aplica	Declive abrupto	No determinada
No aplica		Declive inferior	
		Declive superior	
		Dunas	
		Relieve mixto	
		Malpaís	
		No determinada	
		Salinas	
		Palustres-Pantano	
		Relleno aluvial	
		Zona de inundación	

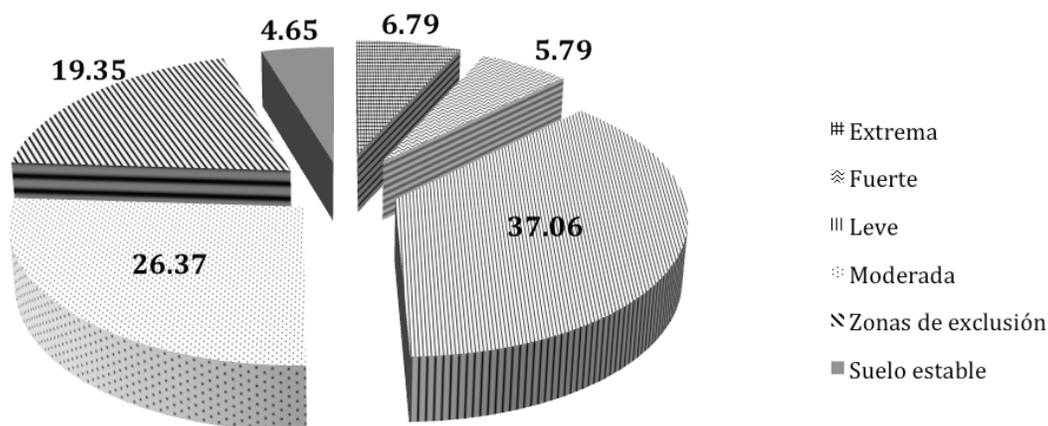


Figura 12. Porcentaje de superficie afectada por grado de erosión hídrica en México.

hídrica, quienes reportaron que un 37% de la superficie nacional es afectada por este fenómeno. Otro dato que es importante destacar es que solo el 4.6% de la superficie se clasificó como suelo estable, es decir, sin riesgo de erosión hídrica, por lo que, de continuar con las tendencias de cambio de uso de suelo, deforestación y degradación de los recursos naturales, el problema se puede agravar aún más.

De acuerdo al grado de erosión apreciable (fuerte + extrema) y utilizando el Marco Geoestadístico 2013 Versión 6.0 (INEGI, 2013), los estados con mayor superficie afectada por erosión hídrica fueron Chihuahua (4 362 953 ha), Coahuila (2 271 147 ha), Sonora (2 192 886 ha) y Durango (2 148 092 ha). Los estados anteriormente mencionados tienen una gran superficie afectada debido en gran medida a que son los estados más grandes del país, pero analizando la superficie relativa afectada por erosión apreciable, los casos más graves son: Distrito Federal (Figura 13), Tlaxcala (Figura 14), Estado de México (Figura 15) y Michoacán (Figura 16) y, por el contrario, los menos afectados: Tabasco, Quintana Roo y Campeche. Los datos completos de superficie relativa afectada se muestran en el Cuadro 2.

El Distrito Federal (Figura 13), ahora Ciudad de México, representa un caso particular, ya que al ser la mayor parte de su superficie de uso urbano y debido a los criterios utilizados en el presente trabajo, ésta se considera como erosión extrema. Asimismo, zonas extensas del Parque Nacional Cumbres del Ajusco están afectadas por erosión fuerte; en cambio, en la parte occidental del mismo parque existen grandes

áreas clasificadas como suelo estable, al igual que en el área del Parque Nacional Desierto de los Leones.

En el caso de Tlaxcala (Figura 14) existen zonas con erosión extrema en la parte occidental del estado, en el corredor Huyotlipan-San Simeón-Apizaco, así como en el suroeste, de Nanacamilpa a Villa Mariano Matamoros (límite con Puebla, próximo a San Martín Texmelucan); y en el noroeste, desde Tlaxco hasta el límite con Hidalgo (próximo a Apan). También existen zonas importantes con erosión fuerte, principalmente en la zona de La Malinche y en el corredor central del estado, desde el norte de Apizaco hasta el sur de Tlaxcala y Santa Ana Chiautempan.

En el caso del Estado de México (Figura 15), debido a los criterios utilizados en el presente trabajo como ya se mencionó anteriormente, se clasificó como erosión extrema las áreas conurbadas a la Ciudad de México (Naucalpan, Tlalnepantla, Cuatitlán, Ecatepec, Netzahualcóyotl y Chimalhuacán, principalmente) y el corredor Toluca-Metepec-Lerma-San Mateo Atenco. Adicionalmente, existen zonas con grado de erosión extrema en el área de Santa María Zolotepec-Temoaya-Jiquipilco-San Lorenzo Malacota (cara oeste de la Sierra de Las Cruces); en la zona centro occidente del estado (límite con Michoacán), desde el Oro de Hidalgo hasta Donato Guerra y en el sur del estado (Luvianos, Tejupilco y Sultepec).

En el estado de Michoacán (Figura 16) se encontraron zonas menos compactas de erosión extrema, la mayoría de ellas en la cuenca del Río Balsas, próxima a la presa El Infiernillo, principalmente

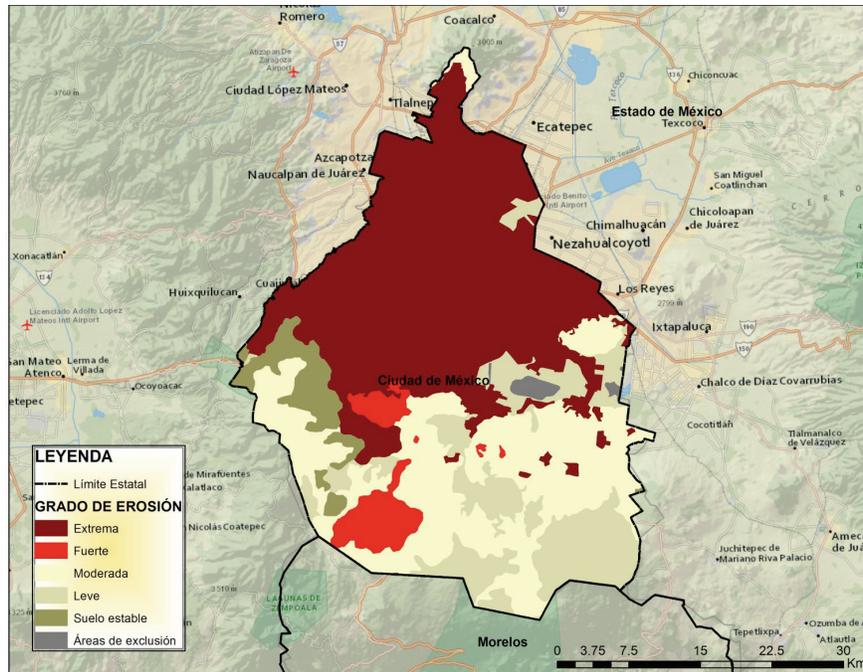


Figura 13. Grado de erosión actual, Ciudad de México.

en la zona de Churumuco, Huetamo, Nueva Italia, Parácuaro, Apatzingán y Buenavista Tomatlán. También existen zonas de erosión de grado extremo en las inmediaciones de Morelia y noreste del Estado, en los límites con el Estado de México y Guanajuato (Tlalpujahua y Maravatío).

ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARBONO ORGÁNICO DE LOS SUELOS

Para estimar las pérdidas de carbono orgánico del suelo (COS) por erosión hídrica, es necesario realizar balances a escala de cuencas o subcuencas

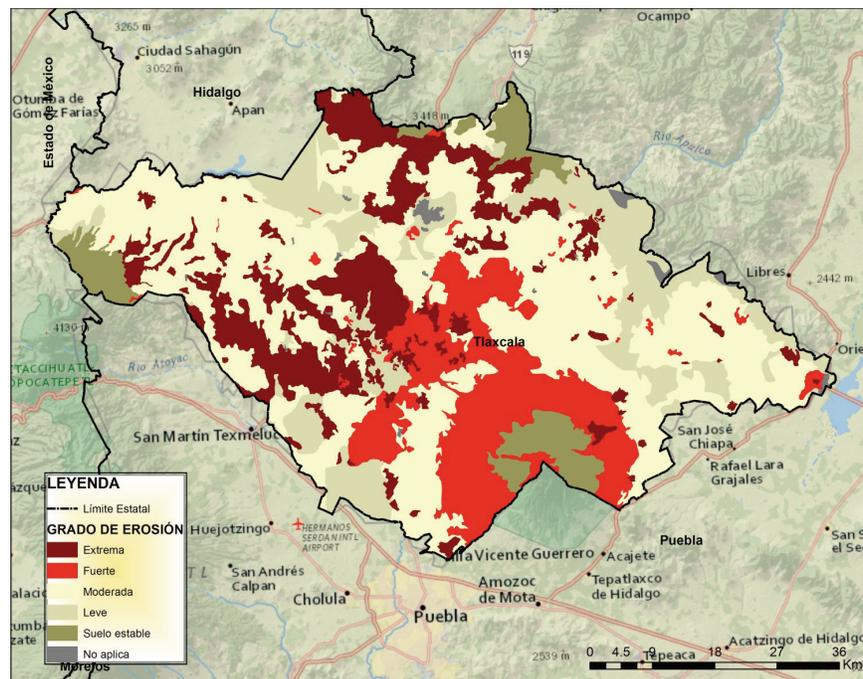


Figura 14. Grado de erosión actual, Tlaxcala.

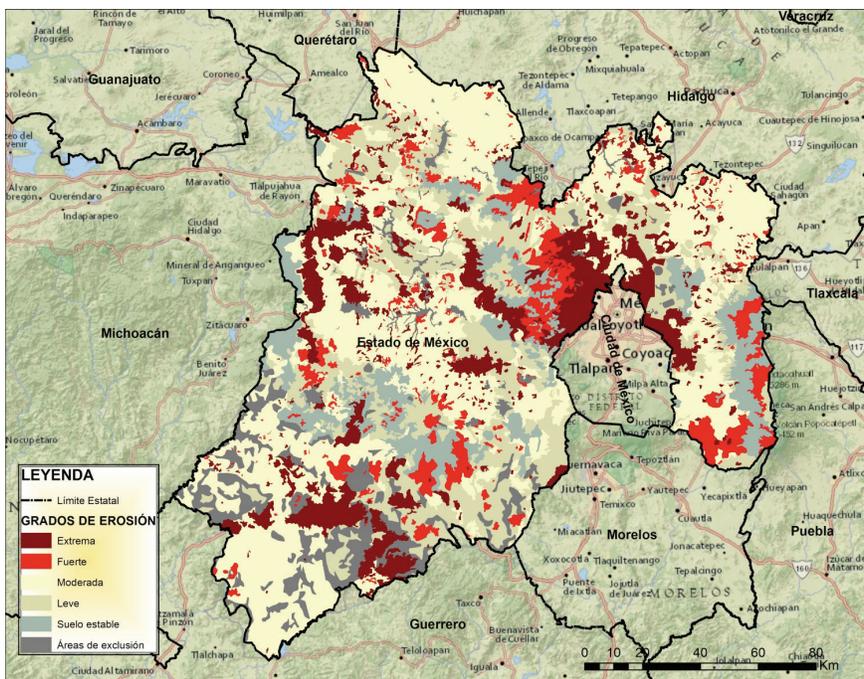


Figura 15. Grado de erosión actual, Estado de México.

hidrológicas, particularmente para el análisis de los flujos horizontales del carbono o las transferencias tierra-mar. El enfoque utilizado consiste generalmente de la estimación de la erosión bruta a nivel de áreas de una cuenca usando modelos de erosión (Smith

et al., 2001) como el de la ecuación universal de pérdida del suelo (USLE; Wischmeier y Smith, 1978) o su revisión (RUSLE; Renard *et al.*, 1991). Desde el punto de vista de un área erosionada en relación a los sedimentos en el punto de salida de la cuenca,

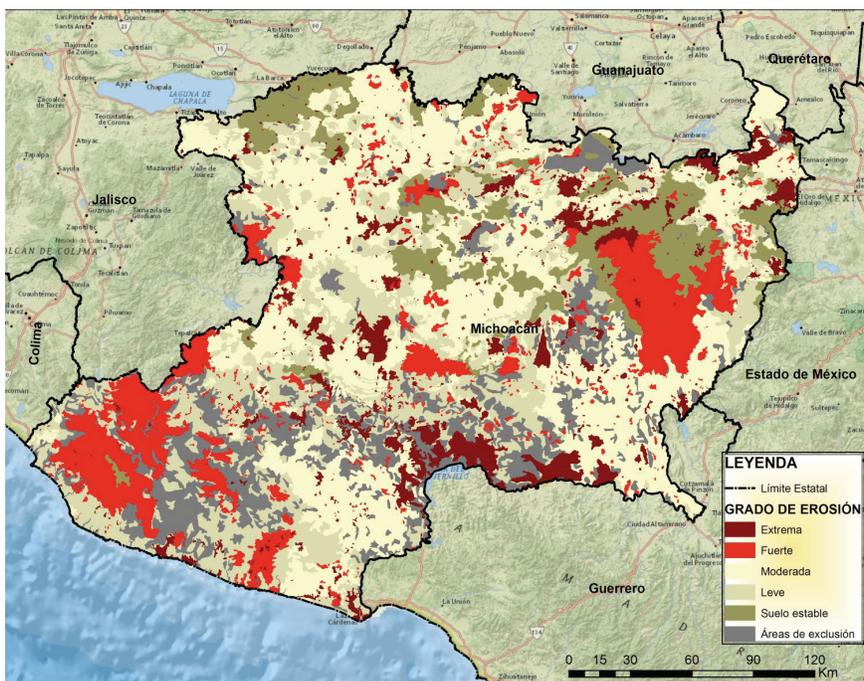


Figura 16. Grado de erosión actual, Michoacán.

Cuadro 2. Superficie relativa afectada (%) por erosión hídrica por entidad federativa.

Estado	Extrema	Fuerte	Leve	Moderada	Zona de exclusión	Suelo estable	Total erosión	Erosión apreciable
Aguascalientes	6.04	5.16	29.34	56.56	2.91	0.00	97.09	11.20
Baja California	4.85	3.35	32.90	15.61	42.36	0.92	56.72	8.21
Baja California Sur	10.33	8.93	33.39	20.03	27.32	0.00	72.68	19.26
Campeche	0.40	0.79	40.21	22.83	19.25	16.52	64.23	1.19
Chiapas	2.59	4.17	61.60	13.12	16.74	1.79	81.48	6.76
Chihuahua	10.32	7.34	30.23	33.80	17.57	0.74	81.69	17.67
Coahuila de Zaragoza	8.49	6.59	33.72	34.10	15.86	1.25	82.89	15.07
Colima	3.71	6.91	49.75	17.79	20.61	1.22	78.17	10.62
Distrito Federal	46.67	4.44	16.05	27.52	0.76	4.55	94.69	51.12
Durango	9.61	7.98	34.63	25.22	22.00	0.56	77.44	17.59
Estado de México	13.79	8.27	20.21	38.92	8.19	10.62	81.19	22.06
Guanajuato	7.83	5.77	22.05	42.24	6.78	15.34	77.89	13.60
Guerrero	9.00	9.45	34.75	15.34	31.35	0.10	68.55	18.46
Hidalgo	11.63	4.61	24.35	30.66	26.79	1.97	71.25	16.24
Jalisco	4.15	8.88	37.61	29.80	16.29	3.28	80.43	13.02
Michoacán de Ocampo	7.68	13.73	22.32	32.86	13.77	9.65	76.58	21.41
Morelos	11.58	6.56	27.59	49.01	4.63	0.63	94.74	18.14
Nayarit	2.60	7.86	48.60	7.12	33.83	0.00	66.17	10.45
Nuevo León	8.31	3.70	29.56	34.75	14.21	9.47	76.32	12.01
Oaxaca	5.95	3.09	45.00	9.63	31.77	4.55	63.68	9.05
Puebla	11.60	4.84	39.69	25.52	16.64	1.70	81.65	16.44
Querétaro	15.55	3.82	21.27	34.81	17.12	7.43	75.45	19.37
Quintana Roo	0.54	0.80	68.93	4.14	19.79	5.80	74.41	1.34
San Luis Potosí	8.18	5.46	33.32	40.58	4.83	7.62	87.55	13.64
Sinaloa	2.92	3.92	44.87	14.39	20.96	12.94	66.10	6.84
Sonora	6.20	6.01	36.85	23.18	25.30	2.46	72.24	12.21
Tabasco	0.93	0.60	44.16	4.35	35.38	14.60	50.03	1.52
Tamaulipas	5.26	2.48	31.97	30.03	12.59	17.67	69.74	7.74
Tlaxcala	16.76	16.28	15.55	44.39	0.76	6.25	92.99	33.04
Veracruz de I. de la Llave	1.63	0.69	41.66	26.24	15.09	14.68	70.23	2.32
Yucatán	1.98	0.93	91.73	0.03	4.37	0.96	94.67	2.92
Zacatecas	5.31	8.46	24.54	56.13	5.54	0.01	94.43	13.76

la pérdida de suelo es estimada de:

$$Ps = (Eb)(TTS) \quad (1)$$

donde Ps ($\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$) es la pérdida de suelo, producción de sedimentos, a la salida de la cuenca; Eb ($\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$) es la erosión bruta y TTS (adimensional) es la tasa de transporte de sedimentos (Walling, 1983), definida como la razón

entre el sedimento transportado en la salida de la cuenca y la erosión bruta. La TTS es dependiente de la configuración espacial del área erosionada en relación a los cauces de drenaje de la cuenca y la topografía, suelo y vegetación en la trayectoria de drenaje del área.

Desde el punto de una medición hidrométrica a la salida de una cuenca, la producción de sedimentos está definida por:

$$Ps = (Q)(Cs) \tag{2}$$

donde Q (L m⁻² año⁻¹) es el gasto medido y Cs (g L⁻¹) es la concentración gravimétrica de los sedimentos. De la relación (2) podemos estimar Ps y así determinar TTS de la relación (1). Este esquema supone un simple balance de masa y es independiente del método de estimación de la erosión bruta. Por ejemplo, es posible usar un promedio ponderado de la erosión (asignada de alguna forma) de clases como las de este trabajo y estimar TTS.

En lo general, el uso de datos hidrométricos a la salida de las cuencas, relación (2), resulta en la mejor estimación de las pérdidas del suelo en las cuencas, evitando el uso de estimaciones indirectas y tasas de transferencia calibradas *ad hoc*. El problema de este enfoque es que no es posible establecer una relación de causa-efecto, tal como en el USLE o RUSLE, entre las actividades antropogénicas y naturales y la erosión y transporte de sedimentos.

Desde la perspectiva de pérdidas de carbono orgánico en los suelos (COSp) a la salida de las cuencas es necesario contar con mediciones de la concentración de carbono, dato que en lo general no está disponible. Un esquema de estimación de COSp (g C m⁻² año⁻¹) está dado por (Starr *et al.*, 2000):

$$COSp = (Ps)(COSo)(TEC) \tag{3}$$

donde COSo (g C g⁻¹ suelo) es el COS original en la cuenca antes de ser erosionado y transportado; y TEC (adimensional) es la tasa de enriquecimiento del carbono (razón entre el C del sedimento y el C del suelo original).

En el caso de México se cuenta con 265 estaciones hidrométricas con datos de sedimentos (BANDAS, 2013), Figura 17, medidos en términos volumétricos, por lo que es necesario hacer estimaciones de la densidad aparente de los sedimentos.

Los datos de mediciones de sedimentos en México son de sólidos en suspensión y no consideran el sedimento de la cama de arrastre del cauce; aunque generalmente el sedimento en suspensión representa alrededor del 80% del total de los sedimentos (Smith *et al.*, 2001).

Para poder realizar estimaciones fundamentadas en medición de sedimentos en las cuencas de México, es necesario calibrar algún modelo que relacione los gastos de sedimentos con variables hidrológicas, climáticas, clases de suelos y vegetación, así como clases de erosión como las del presente trabajo, a nivel de cuencas instrumentadas y de esta manera extrapolar el modelo en cuencas no instrumentadas. Con datos

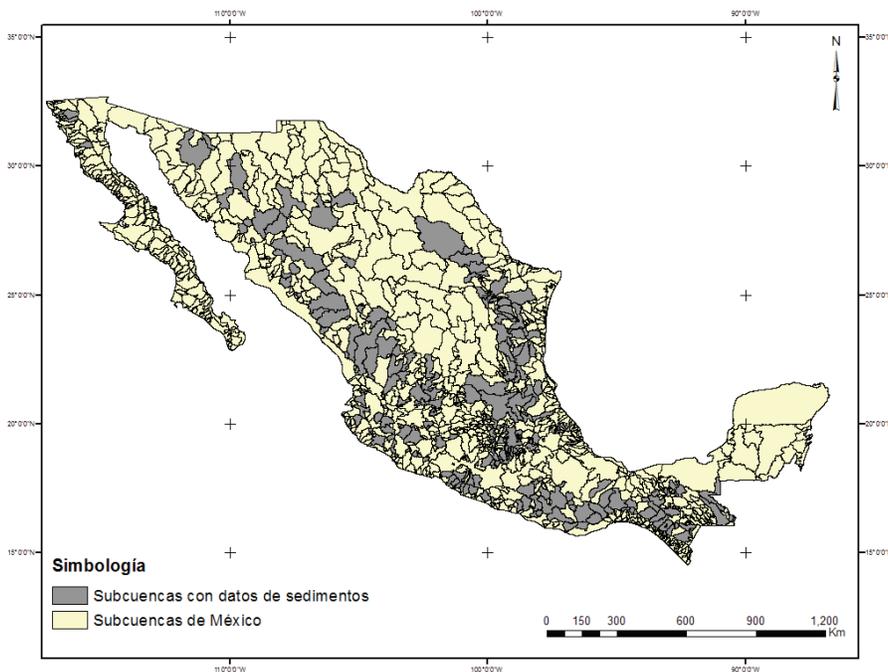


Figura 17. Distribución de las subcuencas instrumentadas en México con datos de sedimentos.

del carbono orgánico en los suelos, ligado a clases de uso del suelo y vegetación, tal como se discute en Balbontín *et al.* (2009), además de considerar una tasa de enriquecimiento de carbono por textura del suelo y clima (Müller-Nedebock y Chaplot, 2015), es posible realizar estimaciones razonablemente precisas de las pérdidas de COS por flujos laterales en las aguas continentales de México.

CONCLUSIONES

Para poder estimar las pérdidas de COS a la atmósfera y transferencias ecosistemas terrestres-acuáticos, mismas que como se ha demostrado en diversos trabajos en la literatura están ocurriendo y son parte de los elementos desconocidos en el balance general del carbono, es indispensable, como primer paso, caracterizar y cuantificar el proceso de erosión hídrica del país, ya que como se mencionó anteriormente, es el principal agente de degradación del suelo, por lo que el presente trabajo contribuye significativamente en este esfuerzo, siendo el primer mapa de erosión hídrica elaborado a escala nacional 1:50 000. En el corto plazo se tiene planeado realizar una estimación actual de la erosión del suelo (año base 2014) usando la misma metodología empleada en este trabajo, para poder estimar y analizar las tasas de pérdidas de suelo por erosión entre estos periodos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló gracias al financiamiento de la Coordinación General de Ganadería (CGG) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), en convenio con el Colegio de Postgraduados.

LITERATURA CITADA

- Balbontín, C., C. Cruz, F. Paz, and J. Etchevers. 2009. Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico. pp 71-96. *In*: R. Lal and R. Follet (coeds). Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. SSSA Special Publication 57. Madison, WI, USA.
- BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales). 2013. Consulta de datos hidrométricos, de presas y sedimentos. Comisión Nacional del Agua, México. www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/contenido/documentos/portada%20bandas.htm (Consulta: septiembre 15, 2015).
- Batjes, N. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- CONAFOR-UACH (Comisión Nacional Forestal - Universidad Autónoma Chapingo). 2013. Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final. Jalisco, México.
- Eswaran, H., E. Van Den Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:192-194.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. Chapter 6: Global soil status, processes and trends. *In*: FAO. Status of the World's Soil Resources. Rome, Italy. ISBN 978-92-5-109004-6.
- Gregorich, E. G., K. J. Greerb, D. W. Anderson, and B. C. Liang. 1998. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil Tillage Res.* 47 291-302.
- Horton, R. E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative geomorphology. *Bull. Geol. Soc. Am.* 56: 275-370.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Marco geoestadístico 2013 versión 6.0 (Inventario Nacional de Viviendas 2012). <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825292829>, (Consulta: marzo 15, 2016).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014a. Guía para la interpretación de la cartografía de erosión del suelo escala 1: 250 000 Serie I. INEGI, Aguascalientes, México. ISBN 978-607-739-013-8.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014b. Erosión de suelos en México, escala 1: 250 000. Boletín de prensa Núm. 295/14 2014. INEGI, Aguascalientes, México. <http://www.noodls.com/view/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015a. Estadísticas a propósito del día mundial del suelo (5 de diciembre): datos nacionales. Aguascalientes, México, 2 de diciembre de 2015. <http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2015/suelo0.pdf> (Consulta: abril 13, 2016).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015b. Conjunto de datos de erosión hídrica del suelo. Escala 1:250 000. INEGI. Aguascalientes, México. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825004223> (Consulta: abril 13, 2016).
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamics. pp. 131-142. *In*: R. Lal, J. Kimble, E. Levine, and B. A. Stewart (eds.). Soil management and greenhouse effect. CRC/Lewis. Boca Raton, FL, USA.
- Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environ. Int.* 29: 437-450.
- Lal, R. 2004a. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
- Lal, R. 2004b. Offsetting China's CO₂ emissions by soil carbon sequestration. *Clim. Change* 65: 263-275.
- Lal, R., M. Griffin, J. Apt, L. Lave, and M. G. Morgan. 2004. Managing soil carbon. *Science* 304: 393. doi: 10.1126/science.1093079.
- Oldeman, L. R., D. J. Greenland, and I. Szabolcs. 1994. The global extent of soil degradation. pp. 99-118. *In*: D. J. Greenland and I. Szabolcs (eds.). Soil resilience and sustainable land use. CAB International. Wallingford, CT, USA.
- Metternicht, G. and J. A. Zinck. 2003. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints. *Remote Sens. Environ.* 85: 1-20.

- Müller-Nedebock, D. and V. Chaplot. 2015. Soil carbon losses by sheet erosion: A potentially critical contribution to the global carbon cycle. *Earth Surf. Processes Landforms* 40: 1803-1813.
- Pidwirny, M. 2006. Stream morphometry. *Fundamentals of physical geography*. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10ab.html> (Consulta abril 5, 2016).
- Rao, B. R., R. C. Sharma, T. Ravi Sankar, S. N. Das, R. S. Dwivedi, S. S. Thammappa, and L. Venkataratnam. 1995. Spectral behaviour of salt-affected soils. *Int. J. Remote Sens.* 16: 2125-2136.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, and J. R. Porter. 1991. RUSLE: A revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 46: 30-33.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. *Inventario Nacional de Suelos*. México, D.F.
- Smith, S. V., W. H. Renwick, R. B. Buddemeier, and C. J. Crossland. 2001. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. *Global Biochem. Cycles* 15: 697-707.
- Starr, G. C., R. Lal, R. Malone, D. Hothem, L. Owens, and J. Kimble. 2000. Modeling soil carbon transported by water erosion processes. *Land Degrad. Develop.* 11: 83-91.
- Vrieling, A. 2006. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena* 65: 2-18.
- Walling, D. E. 1983. The sediment delivery problem. *J. Hydrol.* 65: 209-237.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning*. USDA Handbook 537. U.S. Gov. Print. Off. Washington, DC, USA.