

Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México

Itzel Castro Mendoza

Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. México.

email: craxrubra2@yahoo.com.mx, craxrubra3@gmail.com

RESUMEN

La microcuenca de la presa Madín se ubica en el Estado de México y es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México y Zona Metropolitana. Uno de los factores que afectan el funcionamiento hidrológico de la microcuenca es la pérdida de suelo por erosión hídrica, lo cual disminuye la calidad y cantidad del recurso agua captado por la microcuenca y almacenado en la presa Madín. El cambio de uso de suelo, en detrimento de la cubierta vegetal, es la principal causa de erosión hídrica en la microcuenca. Se calcula que la tasa promedio anual de erosión actual es de 7.58 t/ha/año basándose en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), concentrándose en la parte media y baja de la microcuenca.

Palabras clave: ecuación universal de pérdida de suelo, erosión hídrica, México, microcuenca, presa.

Soil loss estimate by hydric erosion at Madin dam watershed, state of Mexico, Mexico

SUMMARY

Madin microbasin is located at the state of Mexico, and is one of the main supplies of drinkable water for Mexico City and The Metropolitan Zone. The hydrological behavior of the microbasin is affected by hydric erosion, diminishing the quantity and quality of the water collected and stored at Madin dam. The land use change is the main cause of hydric erosion at the microbasin and the annual average rate of soil erosion is 7.58 ton/ha/year, based on the Universal Soil Loss Equation. The loss is concentrated over the low and middle parts of the microbasin.

Keywords: dam, hydric erosion, Mexico, microbasin, universal soil loss equation.

INTRODUCCIÓN

La gran demanda y contaminación de agua potable para la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM) ha mermado la calidad y cantidad del recurso tanto en sus fuentes superficiales como subterráneas. Actualmente, dentro de la ZMVM la presa Madín y el río Magdalena son las únicas fuentes de aprovechamiento de agua superficial. La microcuenca aportadora a la presa Madín muestra signos de deterioro en el agua, suelo y vegetación, los cuales se reflejan en la presa Madín, ya que se han reportado problemas de algas y lirio acuático, además de residuos sólidos y partículas suspendidas que llegan a través de los arroyos provocando contaminación y azolvamiento del agua almacenada en la presa.

Para determinar la degradación de una cuenca o subárea, se evalúa la calidad del suelo, agua, aire y cobertura vegetal. El suelo es un factor determinante y se considera un recurso básico, es decir, de él se derivan otros, como la vegetación. Existen distintas metodologías y parámetros que cuantifican la degradación del suelo, una de ellas es la metodología ASSOD propuesta por Van Lynden and Oldeman (1997).

Esta metodología considera como una forma de degradación del suelo a la erosión hídrica, y para determinar la tasa media anual de pérdida de suelo existen varios modelos. La primera ecuación para calcular la pérdida de suelo la publicó Zingg (1940) estableciendo solamente la importancia de la pendiente y su longitud. Posteriormente se incorporaron los factores de manejo de cultivo, prácticas de conservación, erodabilidad del suelo. Hasta 1965 con la ecuación desarrollada por Wischmeier and Smith (1965), se dieron una serie de propuestas de ecuaciones que llegaron a incluir hasta nueve factores.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), USLE por sus siglas en inglés, se diseñó como una herramienta de trabajo para los conservacionistas (Figueroa et al. 1991) y es un modelo empírico o indirecto. Se buscaba con esta ecuación que el cálculo de la pérdida de suelo se estandarizara a la vez que resultara más sencillo; sin embargo existen limitaciones en su uso ya que la ecuación se desarrolló con datos de parcelas experimentales en condiciones de longitud y pendiente controladas, además que considera lluvias, cobertura vegetal y tipo de suelo uniformes y todo en el contexto de Estados Unidos. También es de señalar que la EUPS está basada en la capacidad de las gotas de lluvia para desprender partículas de suelo y no brinda información certera acerca de la producción de sedimentos ni su deposición dentro de la cuenca (McKay 2008).

En 1975, Figueroa desarrolló trabajos en la cuenca del río Texcoco, a modo de validación de la EUPS en México y desde entonces esta herramienta se ha convertido en una de las principales, en México, para determinar el proceso de pérdida de suelo. Pandoet al. (2003) menciona que a través de métodos directos se han estimado valores de erosión para la cuenca alta del río San Marcos en Tamaulipas de 13,5 ton/ha/año mientras que por métodos indirectos, como la EUPS, la erosión ronda los 492 ton/ha/año. En zonas de Veracruz se han estimado valores de erosión de hasta 568 ton/ha/año con métodos empíricos para zonas donde la pendiente aproximada es de 25 %. Sin embargo existen otros trabajos en donde se obtuvieron valores de erosión menores a través de métodos empíricos que por medición directa. En general, la medición directa siempre será lo más recomendable para determinar el comportamiento de una variable, sin embargo esto implica grandes sumas de dinero y aumenta el tiempo de ejecución de un estudio. Para la

obtención de resultados más certeros a través de métodos empíricos es de importancia la calidad de las bases de datos que alimentarán el modelo.

Este trabajo calcula la erosión hídrica como uno de los principales pasos para determinar la degradación. Se basa en el método empírico de la EUPS para el cálculo de la erosión hídrica actual y potencial, utilizando bases de datos nacionales para alimentar el modelo. Los cálculos se efectúan en la plataforma ArcGis 10 con base en el módulo *RasterCalculatory Slope*, mientras que el procesamiento de la imagen satelital para determinar la cobertura vegetal se realiza con el módulo *Basic Tools-Preprocessing-CalibrationUtilities-LandSatCalibration* de la paquetería ENVI 4.7.

UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En México la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) delimitó 13 regiones hidrológicas-administrativas reguladas y gestionadas por Organismos de Cuenca, 37 regiones hidrológicas las cuales se dividen en 160 cuencas hidrográficas que se redelimitaron por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI) y el Instituto de Geografía obteniendo un total de 1471 cuencas hidrográficas en México, 158 cuencas hidrológicas y 1003 subcuencas hidrológicas (Colter 2010) por lo que al área de estudio le corresponde la unidad jerárquica de microcuenca.

La microcuenca de la presa Madín se ubica en el Estado de México, al noroccidente del Distrito Federal. Abarca los municipios Naucalpan de Juárez, Atizapán de Zaragoza y Jilotzingo. La presa tiene coordenada central 19° 31' 34'' N y 99° 15' 39'' W (figura 1).

Descripción del área de estudio

La corriente principal de la microcuenca de la presa Madín es el Río Tlalnepantla y tiene 23,87 km de longitud. La microcuenca cuenta con 99,93 km², de los cuales 0,81 km² corresponden al nivel de embalse máximo de la presa. Tiene un perímetro de 59,92 km, su rango altitudinal va de los 2333 m a 3542 m SNMM. Presenta una temperatura media anual de 10,24 °C y precipitación media anual de 1090,4 mm con base en los datos climatológicos de 11 estaciones meteorológicas. Presenta una pendiente media de 16,067 % y seis unidades edafológicas: andosol, cambisol, durisol, luvisol, pheozem y regosol. El principal uso de suelo es el forestal, seguido del urbano y pequeñas áreas de suelo agrícola.

INSUMOS DEL MODELO

Se definió un polígono con coordenada extrema superior izquierda 452790x, 2162584y UTM 14N WGS84 para extraer del Continuo Digital de Elevación, generado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), los valores de altitud del área de estudio. El raster, o modelo digital de elevación (MDE) extraído tiene un total de 2 159 columnas y 1514 filas para una resolución de 10 m por pixel. Se consultaron los shapes vectoriales temáticos de edafología e hidrología superficial escala 1:250 000 de INEGI.

En cuanto a la determinación del clima se extrajo información de 11 estaciones meteorológicas del extractor de información climatológica ERIC III. Para el caso de la precipitación se elabora un raster de isoyetas medias anuales. Para determinar el cambio en la cobertura vegetal y uso de suelo, se empleó una imagen satelital LandSat 7 ETM+ de febrero que

corresponde a la temporada de secas para el año 2008, escena 26/47.



Figura 1. Localización de la microcuenca de la presa Madín

MODELO BASADO EN LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO

Se realizó la evaluación de la erosión actual y potencial con base en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) desarrollada por Wischmeier and Smith (1965) (Figuroa et al. 1991) para estimar la pérdida de suelo promedio anual.

La EUPS es un modelo empírico, en el que la pérdida de suelo está expresada como masa por unidad de área por unidad de tiempo y es una función del efecto combinado de seis factores: Factor de erosividad de la lluvia (R); Factor de erosionabilidad del suelo (K); Factor longitud de pendiente (L); Factor grado de la pendiente (S); Factor manejo del cultivo (C) y Factor prácticas de conservación (P). EUPS ayuda a predecir las variaciones en la erosión en función de los cambios en el uso y manejo del suelo y vegetación, a la vez que auxilia en la selección de éstos.

La función que describe el proceso se expresa en la ecuación (1).

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

donde:

A = Promedio anual de pérdida de suelo por hectárea expresado en ton/ha/año

R = Factor de erosividad de la lluvia en MJ.mm/ (ha.hr)

K = Factor de erosionabilidad del suelo en ton.ha.hr/ (MJ.mm.ha)

S = Factor del grado de pendiente, es adimensional

L = Factor del grado de longitud de la pendiente, es adimensional

C = Factor del manejo de vegetación, es adimensional

P = Factor de prácticas mecánicas en el manejo de la vegetación agrícola, es adimensional

Cuando se consideran todos los factores de la EUPS, se dice que se ha calculado la erosión hídrica actual, en cambio cuando no se incluyen los factores C y P , se ha calculado la erosión hídrica potencial, es decir, una estimación de cuánto suelo se perdería si no hubiera ninguna cobertura vegetal y no se realizaran prácticas de conservación. En la figura 2 se observa la metodología general para determinar cada uno de los factores según la EUPS.

Factor de erosividad (R)

La erosividad es la capacidad potencial que tienen las gotas de agua de lluvia para causar erosión. Existen muchas formas de determinarla, una de ellas es a través del índice EI_{30} el cual fue propuesto por Wischmeier and Smith (1965). Se define como el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) por la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}). Se enfoca en el desprendimiento de partículas de suelo por erosión laminar (Figuroa et al. 1991). En México, Cortés (1991), a través del análisis de 53 estaciones meteorológicas determinó un mapa de isoerosividad con el cual formó 14 regiones delimitadas por la erosividad de la lluvia.

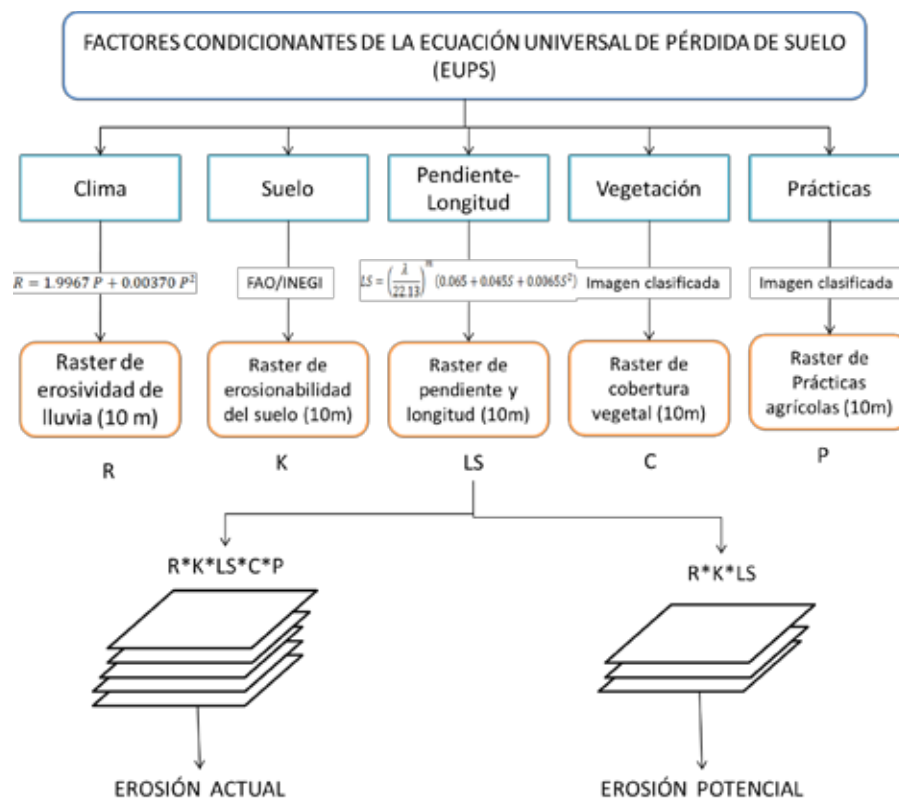


Figura 2. Metodología para el cálculo de la EUPS

De acuerdo con dicha zonificación, la microcuenca de la presa Madín se ubica en la región número VIII y le corresponde la ecuación (2) para el cálculo del factor R (Figuroa et al. 1991):

$$R = 1,9967 P + 0,00370 P^2 \tag{2}$$

donde:

R = Erosividad de la lluvia [MJ.mm / (ha.hr)]

P = Precipitación media anual (mm)

El raster del factor R se calcula al considerar como variable P , de la ecuación 2, al raster de isoyetas medias anuales.

Factor de erosionabilidad (K)

El término erosionabilidad del suelo se usa para indicar la susceptibilidad de un suelo a la erosión (Figueroa et al. 1991). La erosionabilidad de suelos está influida por algunas de sus propiedades, tales como distribución del tamaño de las partículas primarias, materia orgánica, estructura del suelo, óxidos de hierro y aluminio, uniones electroquímicas, contenido inicial de humedad y procesos de humedecimiento y secado. Se define como la tasa de pérdida de suelo por cada unidad adicional de EI_{30} cuando la pendiente y su longitud, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación del suelo permaneces constantes y son iguales a uno.

Con base en las unidades edafológicas identificadas dentro de la microcuenca presa Madín (INEGI) se obtienen los valores estimados para el tipo de suelo y su textura conforme datos generados por la FAO en 1979 (Figueroa et al. 1991) y se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de Erosionabilidad del suelo (K) estimada en función de las unidades de suelo y textura reportadas por INEGI en la microcuenca de la presa Madín (ton.ha.hr/ (MJ.mm.ha))

Tipo de Suelo	Textura INEGI	Textura FAO	K
Andosol	2	Media	0,040
Cambisol	2	Media	0,020
Durisol	2	Media	0,079
Agua	-	-	0,000
Luvisol	2	Media	0,079
Pheozem	3	Fina	0,013
Pheozem	2	Media	0,040
Regosol	2	Media	0,040
Zona Urbana	-	-	0,000

Factor de grado de pendiente (LS)

La topografía del terreno afecta el proceso de erosión y se representa por el factor LS . La relación entre erosión y factor LS es directamente proporcional, es decir, la erosión aumenta conforme la longitud del terreno en el sentido de la pendiente aumenta (factor L) y la inclinación del terreno se hace mayor (factor S).

El factor de la pendiente (S) incorpora el efecto de la topografía a la EUPS, la pérdida de suelo aumenta al incrementarse la pendiente (θ %) del terreno, también se ve afectada por la longitud aunque en menor grado.

A partir del MDE, se generó el raster de la pendiente (θ) del terreno, con el módulo *Slope* de

la paquetería ArcGis 10.

La longitud de la pendiente L (λ) se define como la proyección horizontal de la hipotenusa de la pendiente del terreno.

Este factor se obtiene mediante la ecuación (3).

$$L = [\lambda/22,1]^m \quad (3)$$

donde:

λ = Longitud de la pendiente (m)

m = Exponente adimensional

Esta es válida cuando se tienen parcelas de 22,13 m de largo con pendientes uniformes de 9 %, sin embargo, existen adecuaciones para las condiciones en campo donde estos factores son altamente variables. Por lo anterior, se utiliza para el cálculo del factor LS la ecuación (4) en función de las características de la microcuenca.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m (0,065 + 0,045S + 0,0065S^2) \quad \text{para } S \leq 20\% \quad \lambda < 350 \text{ m} \quad (4)$$

donde:

λ = Longitud del tramo de pendiente en metros, en este caso de 10 m (tamaño de pixel y por lo tanto la unidad de análisis).

S = Pendiente en tanto por ciento.

$m = 0,59$ es un exponente que depende del grado de pendiente y se define en la ecuación (5):

$$m = \beta / ((1 + \beta)) \quad (5)$$

β se define en la ecuación (6):

$$\beta = \frac{\sin \theta / 0,0896}{3 * (\sin \theta)^{0,8} + 0,56} \quad (6)$$

donde:

θ = Pendiente en grados

Se genera una capa raster con valor único de 0,59 al cual se denomina “ m ”, con iguales especificaciones espaciales que el de la pendiente, es decir, con coordenada extrema superior izquierda 452790x, 2162584y UTM 14N WGS84 con un total de 2159 columnas y 1514 filas a una resolución de pixel de 10 m. A través del módulo *RasterCalculator*, se introduce la ecuación (4) para determinar los valores del factor LS .

Calibración de imagen satelital

Para determinar la cobertura vegetal se analiza una imagen satelital LandSat 7 ETM+ de febrero, correspondiente a la temporada de secas para el año 2008. Con el módulo *Basic Tools-Preprocessing-CalibrationUtilities-LandSatCalibration* de la paquetería ENVI 4.7 se realiza la corrección radiométrica con base en las ecuaciones de Chávez (Chander et al. 2009), ecuaciones (7) y (8), y las especificaciones para cada imagen y tipo de sensor (Chander et al. 2009) como se muestra en la tabla 2.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{Lmax_{\lambda} - Lmin_{\lambda}}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} \right) (Qcal - Qcal_{min}) + Lmin_{\lambda} \quad (7)$$

donde:

- L_{λ} = Radiancia Espectral [W/(m².µm)]
- $Qcal$ = Valor del pixel calibrado [DN]
- $Qcal_{min}$ = Valor mínimo del pixel calibrado [DN]
- $Qcal_{max}$ = Valor máximo del pixel calibrado [DN]
- $Lmin_{\lambda}$ = Radiancia mínima en el sensor escalado al Qcalmin [W/(m².µm)]
- $Lmax_{\lambda}$ = Radiancia mínima en el sensor escalado al Qcalmax [W/(m².µm)]

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s} \quad (8)$$

donde:

- ρ_{λ} = Reflectancia [adimensional]
- π = Constante matemática ~ 3,14159 [adimensional]
- L_{λ} = Radiancia Espectral [W/(m².µm)]
- d = Distancia entre el Sol y la Tierra [Unidades astronómicas]
- $ESUN_{\lambda}$ = Valor medio de la irradiancia solar exoatmosférica [W/(m².µm)]
- θ_s = Ángulo zenital [grados]

Los valores de $ESUN_{\lambda}$ utilizados para cada tipo de sensor y banda se muestran en la tabla 3.

Tabla 2. Parámetros de calibración radiométrica. Parte I

Sensor	Año	Mes	Día	Escena	Bandas	Ángulo solar
LandSat 7 ETM+	2008	02	08	26/47	B01, B02, B03, B04, B05, B61, B62, B07, B08, GapMask	44,9701569

En el caso de la imagen del año 2008, se cuenta con la máscara (Gap Mask) de las líneas producidas por la desestabilización del sensor como se muestra en USGS (2009). Con dicha máscara se genera un recorte de los píxeles faltantes de la imagen más cercana con información, correspondiente al año 2000, los cuales son extraídos sin corrección radiométrica para posteriormente ser corregidos con los parámetros del año 2008 (figura 3). Para el análisis de cada banda se calibra por la vía *Lmin-Lmax*.

Tabla 3. Parámetros de calibración radiométrica. Parte II

Sensor	Año	ESUN
LandSat 7 ETM+	B01	1997
	B02	1812
	B03	1533
	B04	1039
	B05	230,8
	B61	N/A
	B62	N/A
	B07	84,9
B08	1362	

Factor de cobertura vegetal (C)

El parámetro de cobertura vegetal representa la capacidad de la vegetación para impedir el arrastre de sedimentos, es decir, que si el suelo permanece desnudo durante la época de lluvias la capacidad de desprendimiento y arrastre del material es más alta que si tuviese algún tipo de cobertura. Dentro de la EUPS el parámetro C representa un factor de reducción de erosión y es adimensional.

Debido a que en el área se presenta una baja intensidad de uso agrícola, la determinación del factor C se realiza a base de la imagen satelital LandSat 7 ETM+, corregida del año 2008.

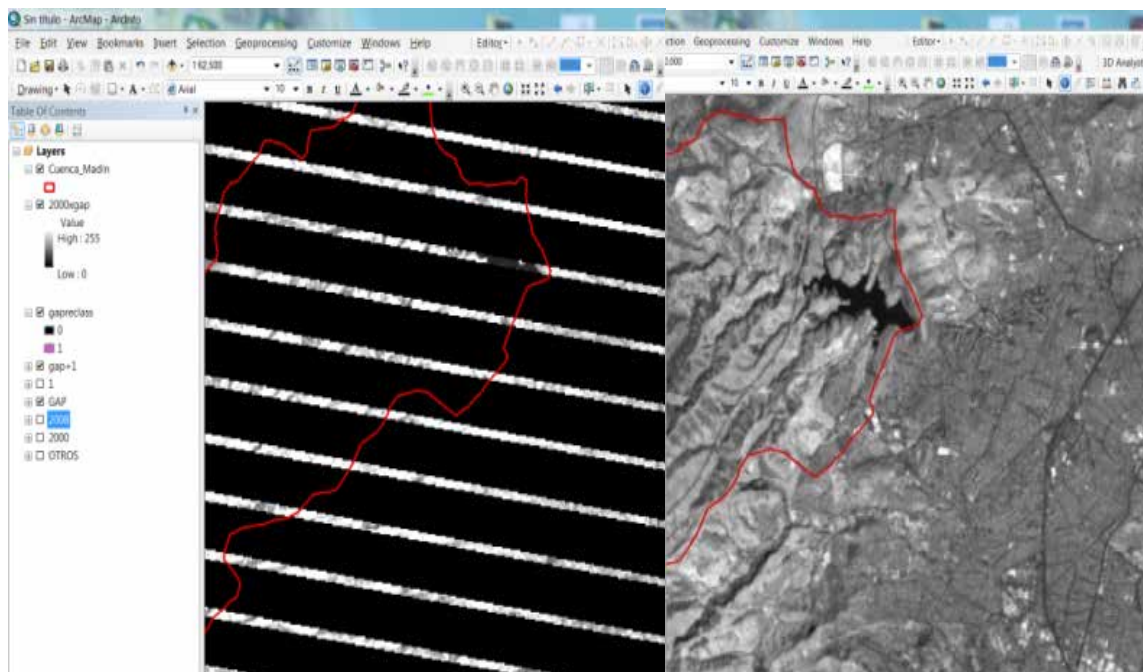


Figura 3. Extracción- vaciado de pixel

Se analizaron las áreas basales de vegetación forestal y otros usos de suelo. Para ello se aplicó

el índice de vegetación de diferencia normalizada conocido por sus siglas en inglés como *NDVI* y el cual se calcula conforme a la ecuación (9).

$$NDVI = \frac{(IRCercano - Rojo)}{(IRCercano + Rojo)} \quad (9)$$

donde:

IRCercano = correspondiente a la B04 (0,76 a 0,90 micrones)

Rojo = correspondiente a la B03 (0,63 a 0,69 micrones)

El *NDVI* varía de -1 a +1 en donde la vegetación con actividad fotosintética tiende a +1 mientras que zonas como nubes o agua tienden a -1.

Con base en los recorridos de campo se realiza la clasificación supervisada de la imagen *NDVI* delimitando los polígonos de extracción de firma espectral o entrenamiento y estableciendo cuatro categorías básicas. Como suelo desnudo se considera a todo terreno sin cobertura vegetal, lo cual incluye tanto cárcavas como zonas urbanas, ya que tienen similares niveles de reflectancia. Obtenido el uso de suelo para el año 2008 y conforme a los valores descritos para diferentes tipos de cobertura por Figueroa et al. (1991) el factor *C* se distribuye según la tabla 4.

Factor de prácticas mecánicas (*P*)

Cuando se introducen cultivos en suelos con pendiente, en ocasiones se utilizan prácticas mecánicas que reducen el agua de escurrimiento y por consecuencia la cantidad de suelo que se puede transportar (Figueroa et al. 1991). El factor *P* se define como la relación que existe entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación a la pérdida correspondiente en un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente, su valor es adimensional y se encuentra entre 0 y 1.

Cuando *P* toma valores cercanos a cero indica que el suelo no está siendo erosionado debido a las prácticas mecánicas de conservación; y cuando tiende al valor de 1, indica que se tiene la erosión máxima debido a que el tipo de prácticas agrícolas que se emplean en el área estudiada no mitiga los efectos de la agricultura en pendiente. Este último sería el caso de la microcuenca de la presa Madín.

Tabla 4. Firmas espectrales de los polígonos de uso de suelo y valores correspondientes del factor *C*

FIRMAS ESPECTRALES (MICRONES)			C
	PISO	TECHO	
Bosque	0,27	0,6	0,004
Arbusto (Vegetación inducida)	0,04	0,27	0,2
Suelo desnudo	-0,25	0,04	0,2
Agua	-0,71	-0,25	0

En la figura 4 se muestran las capas raster obtenidas de cada uno de los factores de la EUPS.

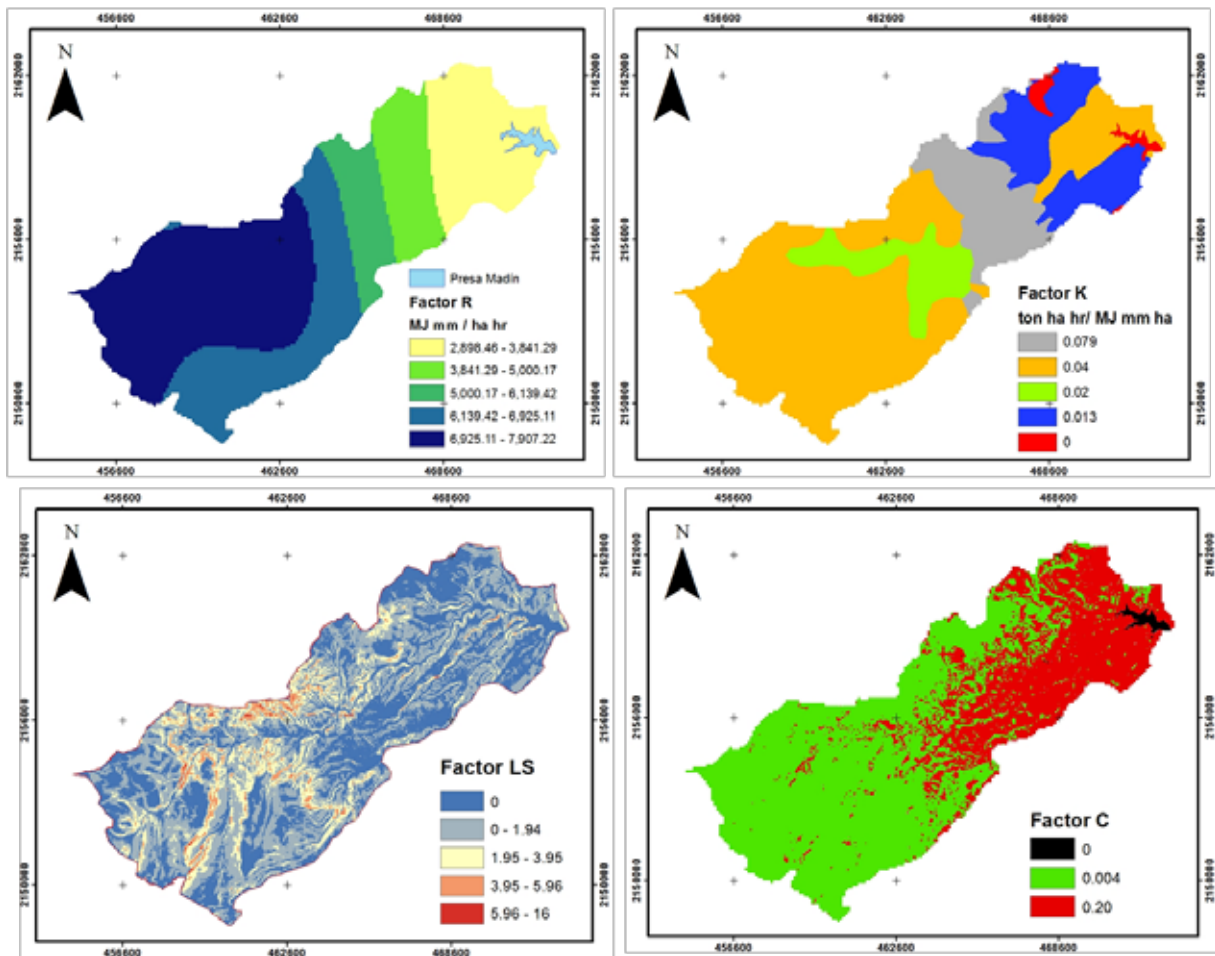


Figura 4. Factores de la EUPS

EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL

Para calcular la erosión hídrica potencial y la actual se efectúa el álgebra de mapas con el módulo *Raster Calculator* de la paquetería ArcGIS 10 introduciendo las capas raster de todos los factores conforme a la EUPS (ecuación 1).

Con base en la EUPS, se calcula la erosión hídrica potencial de la microcuenca de la presa Madín, considerando los factores *R*, *K*, *L* y *S*. Con los valores obtenidos se realiza la clasificación mostrada (FAO 1979) en la tabla 5 y su distribución en la figura 5. La tasa de erosión potencial media anual presente en la microcuenca es de 166,6 ton/ha/año, lo cual se presenta en el límite del rango de erosión fuerte.

EROSIÓN HÍDRICA ACTUAL

A diferencia de la erosión potencial, la actual evalúa el efecto de la cobertura vegetal y de las prácticas mecánicas, en caso de existir (factores *C* y *P*). La clasificación de rangos es la

propuesta por la FAO (1979) y se muestra en la figura 6 y tabla 6.

Como se puede ver, el efecto del factor *C* es considerable, ya que prácticamente desaparece la erosión en su condición de severa, y su tasa promedio anual es de 7,58 ton/ha/año ubicado en erosión hídrica incipiente.

Tabla 5. Erosión potencial para la microcuenca de la presa Madín

EROSIÓN	RANGO (ton/ha/año)	SUPERFICIE (ha)
Incipiente	0 a 10	275
Ligera	10 a 50	1095
Fuerte	50 a 200	2 684
Severa	>200	5 910

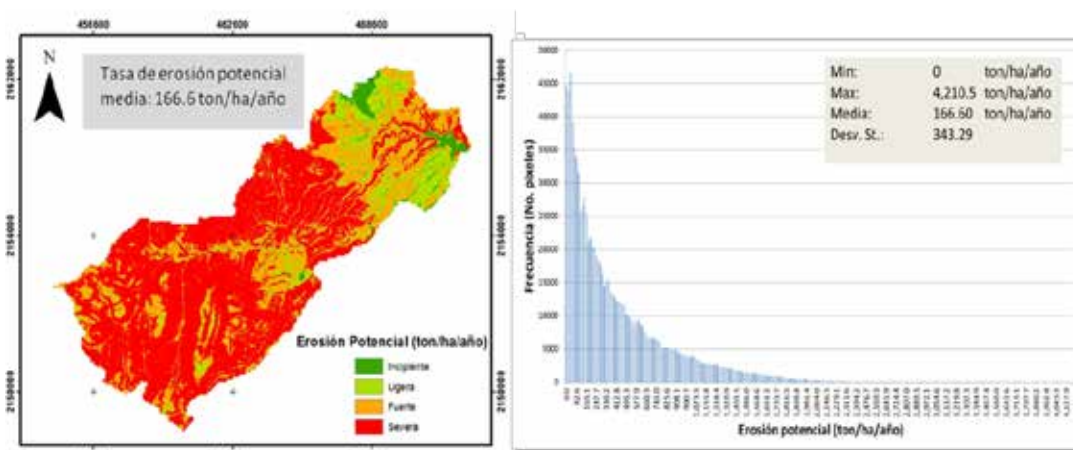


Figura 5. Histograma y distribución de la erosión potencial en la microcuenca de la presa Madín

Tabla 6. Erosión actual para la microcuenca de la presa Madín

EROSIÓN	RANGO (ton/ha/año)	SUPERFICIE (ha)
Incipiente	0 a 10	7 424
Ligera	10 a 50	1 575
Fuerte	50 a 200	809
Severa	>200	155

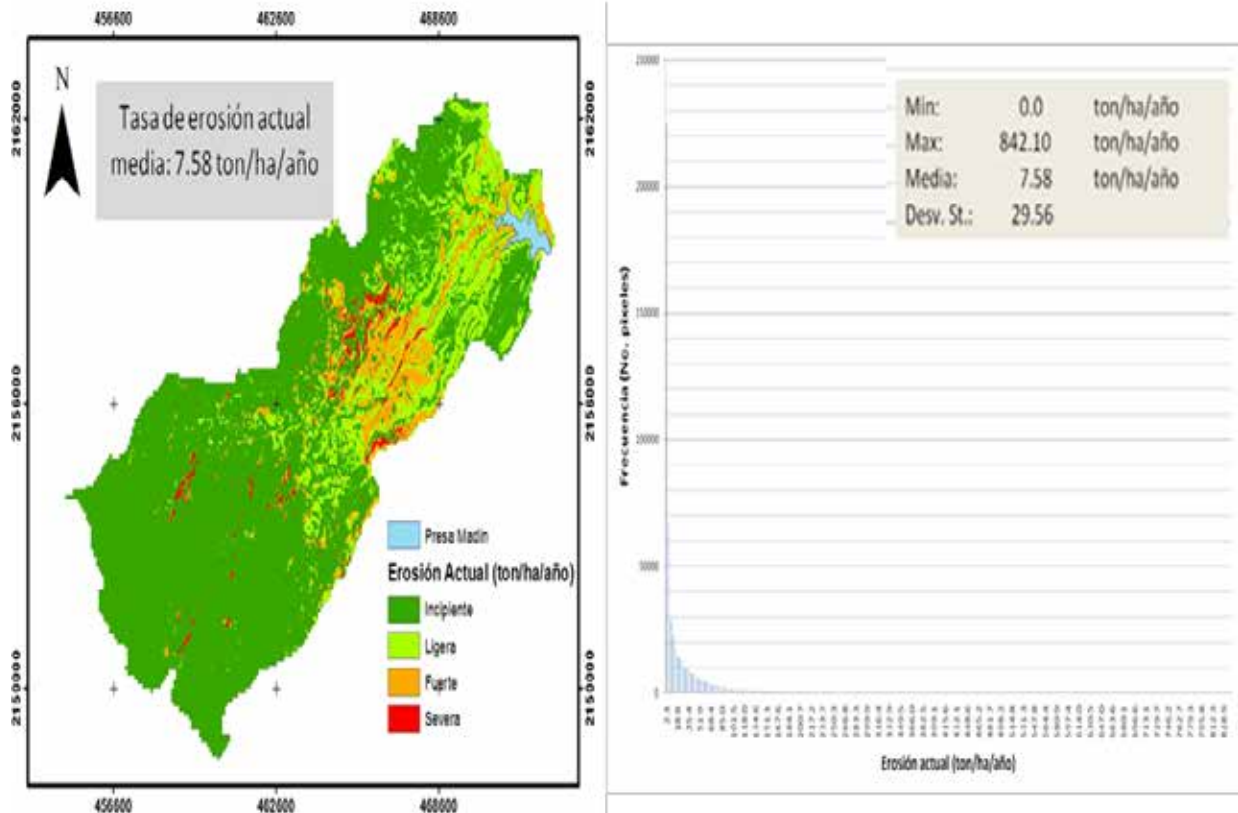


Figura 6. Histograma y distribución de la erosión actual en la microcuenca de la presa Madín

CONCLUSIONES

La erosión actual de la microcuenca se considera incipiente y es de 7,58 ton/ha/año pudiendo incrementarse hasta 166,6 ton/ha/año, si se perdiera completamente la cobertura vegetal en la microcuenca.

La distribución de la erosión potencial (figura 5) está determinada por el factor *LS* y *R* ya que las zonas consideradas con erosión severa son las que presentan los valores más altos para ambos factores; sin embargo, la distribución de las zonas de erosión fuerte y severa actual están determinadas por el factor *C* en consecuencia de la deforestación. Con base en el grado de erosión y distribución es posible implementar prácticas de conservación que disminuyan los efectos de la erosión en el proceso de degradación de la microcuenca.

Para determinar la degradación de la microcuenca de la presa Madín, son necesarios los análisis de calidad del agua, nivel de azolvamiento de la presa, análisis de degradación química del suelo y estudios socio-económicos para trazar estrategias integrales para la recuperación de la microcuenca.

REFERENCIAS

- Chander G., Markham B. L., Helder D.L.** (2009). “Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors”. *Remote Sensing of Environment, USA*, vol. 2009, No. 113, pp. 893–903.
- Colter, H.** (2010). “Las Cuencas Hidrográficas de México. Diagnóstico y Priorización”. 1ra. Edición. Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V, pp. 22, México.
- Cortés T.** (1991). “Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados”. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, pp 168, México.
- Figuroa S. B., Amante A., Cortés H. G., Pimentel J., Osuna E.S., Rodríguez J. M., Morales J. F.** (1991). “Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión”. Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados (CREZAS). México.
- McKay R.** (2008). “A GIS analysis of the impact of soil erosion on archaeological visibility on the island of Antyhythera, Greece”. Tren University, pp 186, Canada.
- FAO** (1979). “A provisional methodology for soil degradation assessment”. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.
- Pando M., Gutiérrez M., Maldonado A., Palacio J.L., Estrada A.E.** (2003). “Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica”. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*, vol. 2003, No. 51, pp 23-36.
- USGS** (2009). “LandSat 7 ETM+ SLC Gap fill methodology”. United States Geological Service. http://landsat.usgs.gov/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf.
- Van Lynden G.W.J. and Oldeman L.R.** (1997). “The assessment of the status of human-induced soil degradation in south and south-east Asia (ASSOD)”. United Nations Environment Programme (UNEP), Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen.
- Wischmeier, W. H. and Smith D.D.** (1965). “Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning”. U.S. Department of Agriculture Handbook, No. 537.
- Zingg A.W.** (1940). “Degree and length of land slope as it affect soil loss in runoff”. *Agricultural Engineering, USA*, No. 21, pp 59-64.