

Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México

Recibido: 20 de septiembre de 2012. Aceptado en versión final: 5 de julio de 2013.

Rosalía Castelán Vega*
Víctor Tamariz Flores*
Gladys Linares Fleites*
Abel Cruz Montalvo*

Resumen. La falta de información de la erosividad de la lluvia en la Sierra Norte de Puebla, ha impedido una evaluación objetiva de su contribución al proceso de erosión. En este trabajo se planteó como objetivo determinar el potencial erosivo y la variabilidad temporal de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, a partir de diferentes índices que miden el grado de agresividad de las precipitaciones, así como establecer relaciones entre los mismos. Se utilizaron los registros pluviométricos de diez años de siete estaciones meteorológicas. Se calcularon los Índices de Fournier Anual (IFA), Modificado de Fournier (IMF), Concentración de Precipitaciones (ICP) y Erosividad Total (IET). El estudio permite concluir que los riesgos de erosión son mayores en

la zona de influencia de las estaciones climáticas de Xicotepac, Venustiano Carranza y Progreso, ubicadas en altitudes comprendidas entre 1 279 y 886 msnm. Las precipitaciones según el ICP se concentran de manera estacional moderada de julio a octubre, y el IET evidencia que las precipitaciones presentan alta potencialidad erosiva. Los resultados fundamentarían el desarrollo de una estrategia agroecológica de conservación de suelos en función de la agresividad climática que presenta la zona en estudio.

Palabras clave: Agresividad climática, erosividad, precipitación.

Aggressiveness of precipitations in the San Marcos river subwatershed, Puebla, Mexico

Abstract. Lacks of information on the erosive nature of rain in Puebla's Northern Sierra have not allowed an objective evaluation on its contribution to the overall erosive process. The following study had as objective to determine the erosive potential and temporal variability of precipitation in the

San Marcos river sub-basin through different indices that measure the degree of aggressiveness of rainfall, as well as to establish correlations between these indices. Precipitation values registered during a ten year period, encompassing seven meteorological stations, were used. The following

* Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 14 Sur 6301, Col. San Manuel, 72590, Puebla, Puebla. E-mails: rosalia.castelan@correo.buap.mx; jose.tamariz@correo.buap.mx; gladys.linares@correo.buap.mx; abel.cruz@correo.buap.mx

Cómo citar:

Castelán Vega, R., V. Tamariz Flores, G. Linares Fleites y A. Cruz Montalvo (2014), "Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 83, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 29-41, doi: 10.14350/rig.33480.

índices were calculated: yearly Fournier Index (FI), Modified Fournier Index (MFI), Precipitation Concentration Index (PCI), and Erosion Index (EI). The study allow to conclude that the risks of erosion are greater in the influence zone of the climatic stations of Xicotepec, Venustiano Carranza, and Progreso, found in altitudes between 1 279 and 886 m.a.s.l. Rainfall, in accordance to the PCI, concentrates in a moderate seasonal manner between the months of July and

October, and the EI shows that the rainfall presents a high erosive potential. Results would support the development of an agro-ecological strategy for the conservation of soil in accordance to the aggressiveness of the climate in the zone of study.

Key words: Climatic aggressiveness, erosive, erosion, precipitation, rainfall.

INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos fundamentales del inicio de la degradación de los suelos es la erosión hídrica, los procesos erosivos se caracterizan por ser lentos, recurrentes, progresivos e irreversibles y el hombre difícilmente puede modificarlos; pueden agruparse en factores de energía y de resistencia (López-Vicente *et al.*; 2008), a los primeros pertenece la agresividad de la lluvia, que es una de las características menos abordadas en Meteorología y Climatología; sin embargo, para las Ciencias Agrícolas y Forestales resulta de extraordinaria importancia, debido a que es el agente activo de la degradación hídrica del suelo, guardando relación directa con la sostenibilidad agroambiental de este recurso (Vega y Febles, 2007).

La erosión se ve afectada por factores de tipo climático, relieve, tipo de suelo, cubierta vegetal y por los usos humanos, todos estos factores pueden agruparse en erosividad y erosionabilidad. La erosividad expresa la capacidad erosiva del agente geológico predominante que depende del clima (lluvia, hielo y viento). La erosionabilidad expresa la susceptibilidad del suelo para ser movilizado. Este factor depende del tipo de suelo (estructura y cantidad de materia orgánica que posea, ya que la presencia de agregados impide la erosión), de la pendiente y cobertura vegetal (Diodato, 2004).

La eliminación de la cubierta vegetal es el primer factor que desencadena el proceso de erosión; aunado a esto el inadecuado uso y manejo agrícola del suelo reduce la capacidad productiva de éste, ya que se siembra en pendientes pronunciadas sin considerar medidas de conservación, por lo que el suelo se encuentra desprotegido ante la intensidad de las gotas de lluvia y el arrastre de las aguas de escorrentía (Tolón *et al.*, 2007). En este contexto, determinar la magnitud de la agresividad pluvial

de una región permite proponer, de forma sustentable, su uso presente y/o futuro, zonificar áreas de acuerdo con su potencial erosivo y planificar los usos adecuados en cualquier suelo dependiendo de su riesgo a la erosión (Colotti, 1998). Además, es una herramienta básica para la toma de decisiones de investigación y transferencia de tecnología, que incluyen medidas encaminadas a la protección y al ordenamiento integral de los recursos suelo-agua de cualquier región (Soto *et al.*, 2006). En la subcuenca del río San Marcos la alta deforestación, el relieve montañoso y las características de intensidad y frecuencia de las precipitaciones (3 000 mm anuales), constituyen factores de presión en la sostenibilidad ambiental de esta región (Castelán, 2009). Sin embargo, nulas son las investigaciones encaminadas a conocer la distribución espacial de esta agresividad climática, por lo que el objetivo de este trabajo fue determinar el potencial erosivo y la variabilidad temporal de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, a partir de diferentes índices que miden el grado de agresividad y concentración temporal de las precipitaciones, así como compararlos estadísticamente para identificar el índice que mejor describe este factor en la región. Sin duda alguna la erosión hídrica es una de las fuentes naturales más degradantes, por lo que es necesario controlar, analizar y predecir los procesos erosivos en el entorno que nos rodea, para poder establecer zonas de riesgo y ordenamientos ecológicos sustentables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del área en estudio

La subcuenca del río San Marcos se localiza al noroeste de Puebla, enmarcada dentro de las coordenadas geográficas: 20°03' y 20°34' de latitud

Norte y $97^{\circ} 24'$ y $98^{\circ} 17'$ de longitud Oeste del Meridiano de Greenwich (INEGI, 2000; Figura 1); cuenta con una superficie de 70 376.6 ha y abarca territorio de los municipios: Naupan, Jalpan, Pahuatlán, Tlacuilotepec, Xicotepec de Juárez, Venustiano Carranza y Zihuateutla de la Sierra Norte del estado de Puebla; y Coyutla y El Espinal del estado de Veracruz. Presenta tres tipos de clima: al oeste, templado húmedo con lluvias todo el año, al centro semicálido subhúmedo y, finalmente, al este cálido húmedo con lluvias todo el año. Cuenta con precipitaciones promedio de 3 000 mm anuales. La vegetación dominante es bosque mesófilo de montaña y selva alta perennifolia, ambos tipos con evidente estado de degradación debido a su deforestación para la siembra de cultivos como maíz, frijol, café y vainilla, así como pastizales para la alimentación del ganado; el uso doméstico de varias especies vegetales para construcción de viviendas, muebles y artesanías, también ha favorecido su degradación (Ruiz *et al.*, 2005; Castelán 2003). Se encuentra dominada por una topografía montañosa al oeste y ligeramente ondulada al este, con altitudes que van desde los 200 hasta los 2 000 msnm. Los suelos presentes son leptosoles, regosoles, calcisoles y luvisoles en las partes más altas; los vertisoles se distribuyen en las áreas con menor elevación que

se encuentran sujetas a constantes inundaciones (Ruiz *et al.*, 2005).

Información pluviométrica

Se analizaron los registros pluviométricos diarios para un periodo de diez años en siete estaciones meteorológicas (2001-2011) que tienen influencia sobre la zona en estudio (Cuadro 1). La información fue recabada en dependencias de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Procedimientos

Inicialmente se dividió la precipitación total mensual de cada año en tres periodos decadales. La década I (día 1 al 10), década II (día 11 al 20) y la década III (día 21 al 28, 29, 30 o 31) según el mes, tal como propone Gómez (1991). Posteriormente se calcularon ocho procedimientos (cuatro para el Índice de Fournier Anual: IFA₁, IFA₂, IFA₃ e IFA₄; dos para el Índice Modificado de Fournier: IMF₁ e IMF₂ y dos para el Índice de Concentración de las Precipitaciones: ICP₁ e ICP₂).

IFA₁. Primero se estimó para cada año el IFA por periodo decadal (IdF), utilizando la ecuación (1), propuesta por Gómez (1991). Luego se sumaron los tres IdF para obtener el IFA mensual (IFm).

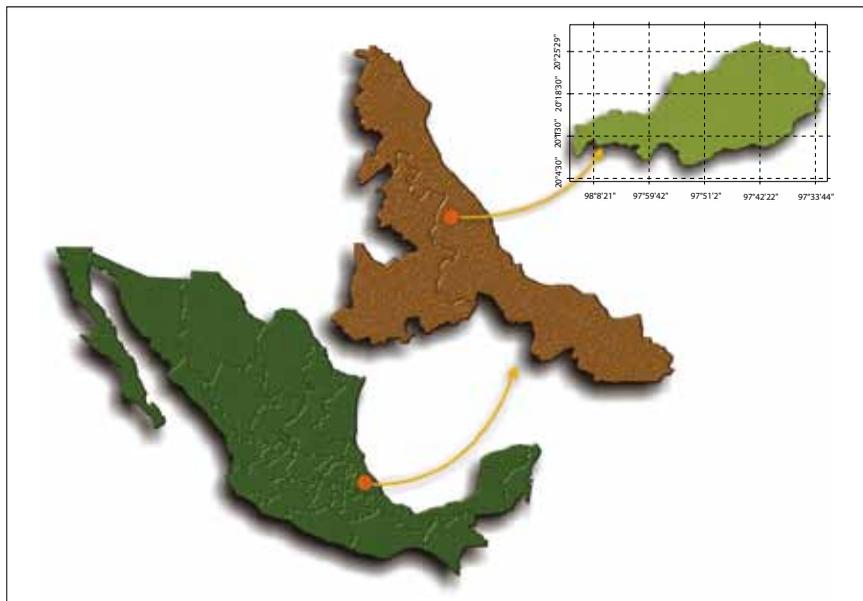


Figura 1. Localización de la subcuenca del río San Marcos, Puebla.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas en la subcuenca

Estación	Municipio	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnm)	Dependencia
Apapantilla	Jalpan, Pue.	20° 23'	97° 51'	623	CNA
Chumatlán	Espinal, Ver.	20° 18'	97° 40'	752	CNA
Coyutla	Coyutla, Ver.	20° 15'	97° 38'	673	CFE
Mihuapan	Espinal, Ver.	20° 18'	97° 40'	413	CNA
Progreso de Zaragoza	Coyutla, Ver.	20° 15'	97° 42'	886	CFE
Venustiano Carranza	Venustiano Carranza, Pue.	20° 30'	97° 50'	1 075	CNA
Xicotepec	Xicotepec, Pue.	20° 17'	97° 57'	1 279	CNA

Posteriormente para cada mes se sumaron todos los IFm estimados y se promediaron sobre el número de años analizados. Finalmente el IFA₁ corresponde a la sumatoria de los doce IFm.

$$IdF = (PMpd)^2 / PTp \quad (1)$$

donde: IdF = Índice decadal de Fournier; PMpd = Precipitación máxima del periodo decadal (mm); PTpd = Precipitación total del periodo decadal (mm).

IFA₂. Se obtuvo calculando el IFA al sumar los 36 IdF de cada año; luego se dividió la sumatoria de todos los IFA sobre el número de años considerados.

IFA₃. Se determinó con base en la metodología propuesta por Rey (1996), ecuación (2). Para cada día decadal, se estimó la precipitación media, al sumar la lluvia total del día en cada mes y en cada año y promediarla sobre el número de años de registro; posteriormente se elevó al cuadrado, luego

se sumaron los valores obtenidos y se dividieron sobre la sumatoria de los promedios de los diez días para calcular el IdF'. Posteriormente se sumaron los 3 IdF' para encontrar el IF mensual (IFm). Finalmente, el IFA₃ corresponde a la sumatoria de los 12 IFm.

$$IdF = (Y \text{ día } 1)^2 + \dots + (Y \text{ día } 10)^2 / (Y \text{ día } 1) + \dots + (Y \text{ día } 10) \quad (2)$$

donde: IdF' = Índice decadal de Fournier; Y = Precipitación media del día decadal (mm).

El IFA estimado utilizando los anteriores procedimientos, se clasificó según los rangos propuestos por Gómez (1975; Cuadro 2).

IFA₄. Se estimó mediante la ecuación (3) y se clasificó de acuerdo con los valores considerados por Delgado (2003), (Cuadro 3).

$$IF = p^2 / P \quad (3)$$

Cuadro 2. Clasificación de la erosividad de las lluvias

IFA	Grado de agresividad	Características de la precipitación
< 140	Leve	Lluvias leves, frecuentes, bien distribuidas
140 – 210	Baja	Lluvias de baja intensidad, frecuentes, bien distribuidas
210 – 280	Media	Lluvias de mediana intensidad, frecuentes, de buena o regular distribución
280 – 350	Alta	Lluvias fuertes, frecuentes o no, de buena o mal distribución
> 350	Muy alta	Lluvias, frecuentes o no, de buena o mala distribución

Fuente: Gómez, 1975.

Cuadro 3. Valores de referencia del Índice de Fournier (IF)

IF	Calificación
< 15	Muy bajo
16 – 30	Bajo
31 – 50	Moderado
51 – 65	Alto
> 65	Muy alto

Fuente: Delgado, 2003.

donde: IF = Índice de Fournier; p = Precipitación media del mes más lluvioso del año (mm); P = Precipitación media anual (mm).

IMF₁. Para su cálculo se utilizó la ecuación (4) citada por Gabriels *et al.* (2003).

$$IMF = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P_t} \quad (4)$$

donde: IMF = Índice modificado de Fournier; P_i = Precipitación media mensual (mm); P_t = Precipitación media anual (mm); i = Mes.

IMF₂. Se calculó mediante la ecuación (5) citada por Apaydin *et al.* (2006), donde el IMF se obtuvo para cada año con los datos de precipitación total mensual y anual. Luego se promedió la sumatoria de los IMF estimados sobre el número de años analizados.

$$IMF_j = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^b IMF_j \quad (5)$$

donde: IMF_j = Índice Modificado de Fournier; j = Año; b = Número de años de registro.

ICP₁ = Se estimó utilizando el procedimiento citado por Gabriels *et al.* (2003), ecuación (6).

$$ICP = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P^2} \quad (6)$$

donde: ICP = Índice de concentración de las precipitaciones (%); P_i = Precipitación media mensual (mm); i = Mes.

ICP₂. Se calculó mediante la ecuación (7) citada por Apaydin *et al.* (2006), donde el ICP se obtuvo para cada año con los datos de precipitación total mensual y anual. Luego se promedió la sumatoria de los ICP estimados sobre el número de años analizados.

$$ICP_j = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^b ICP_j \quad (7)$$

donde: ICP_j = Índice de concentración de las precipitaciones (%); j = Año; b = Número de años de registro.

Los valores del IMF y del ICP se clasificaron de acuerdo con los rangos presentados por CEC (1992) y Michiels y Gabriels (1996; Cuadros 4 y 5).

Índice de Erosividad Total. El IMF evalúa directamente la agresividad de las precipitaciones pero su efecto es diferente en dependencia de la forma en que la actividad pluvial se distribuye a lo largo del año, información que aporta el ICP, la combinación de ambos genera el Índice de Ero-

Cuadro 4. Clasificación del Índice Modificado de Fournier (IMF)

Clase	Rango	Descripción
1	< 60	Muy bajo
2	60 – 90	Bajo
3	90 – 120	Moderado
4	120 – 160	Alto
5	> 160	Muy alto

Fuente: CEC, 1992.

Cuadro 5. Clasificación del Índice de Concentración de las Precipitaciones (ICP)

Rango	Descripción
8.3 – 10	Uniforme
11 – 15	Estacional moderada
16 – 20	Estacional
21 – 50	Fuertemente estacional
51 - 100	Aislada

Fuente: Michiels y Gabriels, 1996.

sividad Total (IET) expresado en la ecuación (8), mismo que se clasifica según el Cuadro 6 (Vega y Febles, 2008).

$$IET = IMF * ICP \quad (8)$$

Estimación del factor R. Para este procedimiento se utilizó la ecuación (9) presentada por Figueroa *et al.* (1991), los cuales construyeron modelos de regresión donde a partir de datos de precipitación anual se puede estimar el valor de la erosividad de la lluvia (R), estos modelos son aplicados en 14 diferentes regiones del país, la zona en estudio cae dentro de la región IX con un coeficiente de correlación de 0.97 a un nivel de significancia del 5% (Cuadro 7).

$$R = 7.0458P - 0.002096P^2 \quad (9)$$

donde: R = Erosividad de la lluvia en MJ/ha.mm/hr; P = Precipitación anual de la región.

Cuadro 6. Clasificación del Índice de Erosividad Total (IET)

Valores	Descripción de la clase	Clase
<1500	Baja	1
1501 – 2500	Moderada	2
2501 -5000	Alta	3
> 5000	Muy Alta	4

Cuadro 7. Clasificación de la erosividad de las lluvias según el valor de R

Clase	Erosividad R (MJ.mm.ha ⁻¹)	Clasificación
1	< 1 000	Natural
2	1 000 a 2 500	Muy baja
3	2 500 a 5 000	Baja
4	5 000 a 7 500	Moderada
5	7 500 a 10 000	Alta
6	10 000 a 15 000	Muy alta
7	15 000 a 20 000	Severa
8	> 20 000	Extremadamente severa

Fuente: Rivera y Gómez, 1991.

De igual manera se calculó este factor mediante la ecuación (10) presentada por Ramírez (2006).

$$EI_{30} = \sum_{12}^1 30.4(IMF) + 28.3 \quad (10)$$

donde: EI₃₀ = Erosividad en MJ.mm.ha⁻¹; IMF = Índice Modificado de Fournier (promedio mensual).

Los valores obtenidos por ambos métodos se clasificaron según proponen Rivera y Gómez (1991; Cuadro 7).

Análisis estadístico. Mediante el paquete estadístico MINITAB versión 15 se elaboró una matriz de coeficientes de correlación de Pearson. Se consideraron los procedimientos con correlaciones significativas ($\alpha=0.05$) y altamente significativas ($\alpha=0.01$). Se aplicó el procedimiento de regresión lineal simple entre el IMF y el factor R estimado a partir de las ecuaciones 9 y 10 para un periodo de diez años en las estaciones evaluadas, lo que permitirá realizar las interpolaciones requeridas.

RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra el pluviograma obtenido a partir del análisis de la información de las estaciones, dicho pluviograma es unimodal y se observa que en tres de las estaciones climáticas, julio fue el

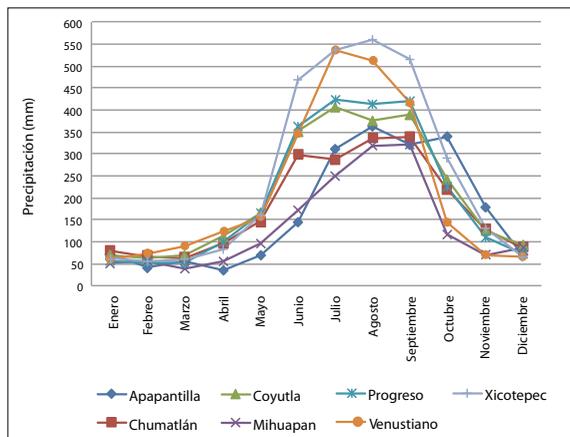


Figura 2. Régimen pluviométrico de las estaciones consideradas.

mes más lluvioso del año con valores entre 405.2 y 537.3 mm. Agosto fue el mes con mayor precipitación media mensual en las estaciones Apapantilla (363 mm) y Xicotepec (560.3 mm); mientras que en las estaciones Mihuapan y Chumatlán, septiembre presentó el mayor valor de precipitación con 338.3 y 320.7 mm, respectivamente.

Al analizar la distribución espacial de la precipitación promedio anual (Figura 3) se observa un gradiente de precipitación caracterizado por la zona de transición de una región templada a cálida, apreciando que las lluvias son más abundantes al oeste y centro-oeste de la subcuenca, donde llegan a

alcanzar valores cercanos a los 3 000 mm anuales; el oriente registra la menor precipitación con valores alrededor de los 1 600 mm anuales. No se presenta una estación seca muy bien definida, ya que los meses menos lluviosos tienen valores superiores a los 50 mm, lo que implica que gran parte de la zona en estudio tiene un clima constantemente húmedo.

El Cuadro 8 resume los valores de los ocho procedimientos utilizados para estimar el potencial erosivo y la variación temporal de las lluvias en la subcuenca del río San Marcos. La erosividad de las lluvias, estimada mediante el IFA₁, es alta en las estaciones Progreso (345.68), Apapantilla (335.07),

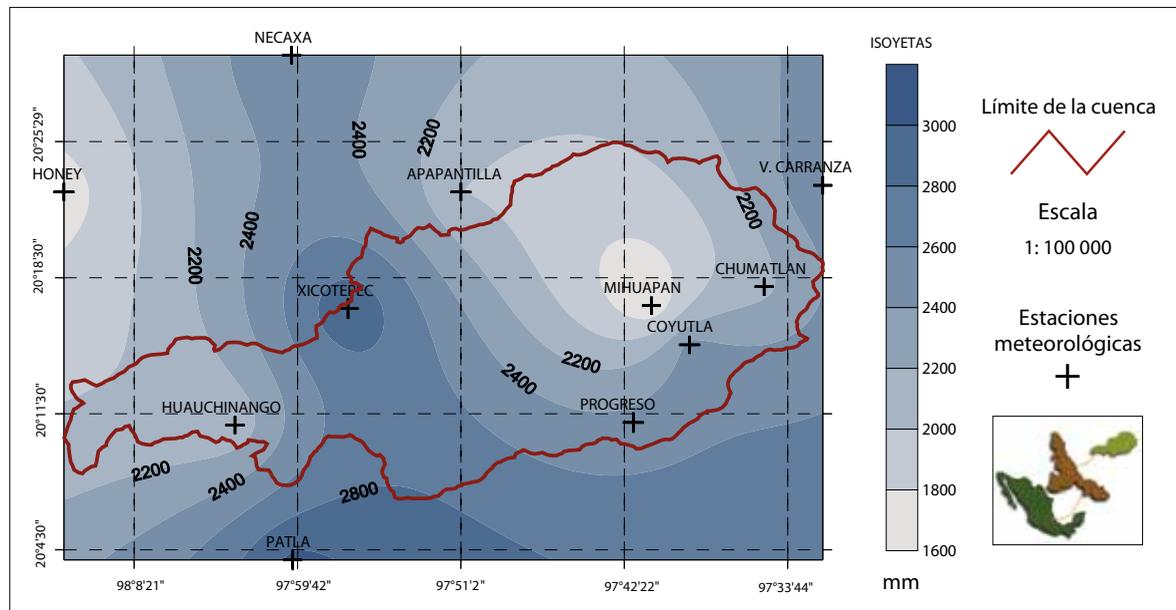


Figura 3. Distribución espacial de la precipitación en la subcuenca.

Cuadro 8. Valores promedio del IFA, IMF e ICP de las estaciones

Estación	(IFA) ₁	(IFA) ₂	(IFA) ₃	(IFA) ₄	(IMF) ₁	(IMF) ₂	(ICP) ₁	(ICP) ₂
Apapantilla	335.07	358.97	405.19	65.85	260.22	260.37	13.00	14.53
Chumatlán	324.31	349.73	380.69	53.33	240.48	240.48	11.21	12.57
Coyutla	294.74	325.44	370.59	66.62	291.80	291.80	11.84	12.64
Mihuapan	355.86	385.65	296.01	63.40	209.65	209.89	12.92	13.87
Progreso	345.68	381.39	379.57	73.28	315.12	315.12	12.84	13.98
Venustiano	486.93	526.74	396.10	111.40	359.00	359.00	13.86	14.23
Xicotepec	556.45	583.46	419.88	105.20	413.00	412.99	13.84	13.87

Chumatlán (324.31) y Coyutla (294.74); mientras que en las tres estaciones restantes sobrepasó el umbral de 350, valor por encima del cual las precipitaciones se consideran de muy alta agresividad. El IFA_1 más alto se presentó en la estación Xicotepec con un valor de 556.45 y el más bajo se registró en la estación Coyutla (294.74).

Para el IFA_2 , la estación Xicotepec nuevamente reportó el valor más alto (583.46), y el más bajo (325.44) se encontró en la estación Coyutla, ubicada en el estado de Veracruz. Sin embargo, cinco de las siete estaciones evaluadas presentaron precipitaciones con una agresividad muy alta según la clasificación propuesta por Gómez en 1975. El IFA_3 calificó la erosividad de seis estaciones como de muy alta agresividad (370.59 - 419.88) y solo a la estación de Mihuapan (296.01) con un valor alto, esto sugiere una baja variabilidad anual de la precipitación diaria decadal (Diodato, 2004). Con respecto al IFA_4 , el potencial erosivo de las lluvias se clasificó como alto solo en una estación climática y como muy alto en el resto de las estaciones. El IFA_4 más elevado se registró en la estación Venustiano Carranza (111.40) y el valor más bajo (53.33) se reportó en la estación Chumatlán. Resultados que evidencian que no existió una subestimación de la

erosividad por este índice al considerar solo la precipitación media del mes más lluvioso del año, por lo que esta metodología puede considerarse como apropiada para las condiciones de la zona en estudio.

El IMF_1 muestra que todos los valores superaron considerablemente el rango de 160, el cual es considerado el valor por encima del cual las lluvias son de muy alta erosividad (Figura 4). La estación Xicotepec presentó el IMF_1 más alto, con un valor de 413, mientras que la estación Mihuapan, registró el valor más bajo (209.65). Los resultados obtenidos para el IMF_2 , en general fueron muy parecidos a los del IMF_1 , donde las precipitaciones de todas las estaciones son consideradas como de muy alta erosividad.

De igual manera se encontró que el valor del ICP_1 fue mayor en los meses de junio a octubre (Cuadro 9), lo cual indica que durante este periodo se genera una dinámica más activa de la precipitación sobre la erosión del suelo, debido a una mayor concentración de las lluvias.

De forma general el ICP_1 mostró que la concentración de las precipitaciones en la subcuenca es estacional moderada con valores que oscilan entre 11 y 14% (Figura 5); el ICP_2 mostró mayor variabilidad, con un rango de 12 a 15%, sin em-

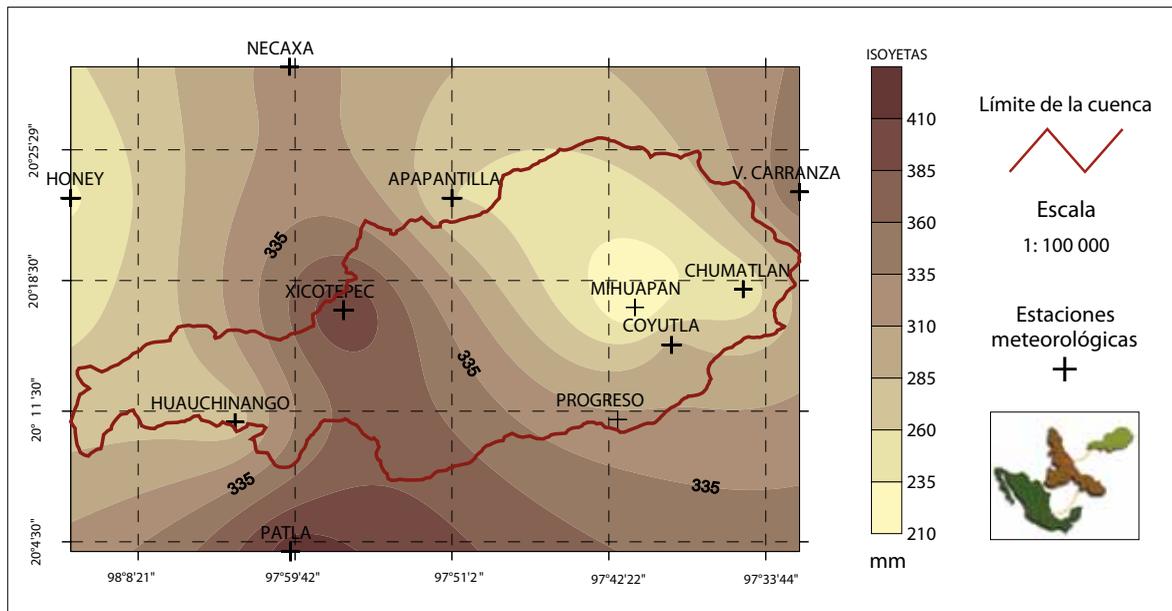


Figura 4. Distribución espacial del IMF_1 en la subcuenca del río San Marcos.

Cuadro 9. Valor del ICP₁ promedio mensual y anual de las estaciones climáticas

Estación	En	Fb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc
Apapantilla	0.136	0.041	0.081	0.030	0.123	0.508	2.428	3.291	2.593	2.857	0.802	0.115
Chumatlán	0.140	0.095	0.082	0.207	0.474	1.941	1.790	2.436	2.485	1.038	0.354	0.164
Coyutla	0.080	0.065	0.079	0.211	0.449	2.042	2.703	2.325	2.506	0.985	0.255	0.140
Mihuapan	0.099	0.114	0.052	0.112	0.352	1.126	2.389	3.812	3.909	0.516	0.173	0.272
Progreso	0.054	0.043	0.047	0.166	0.445	2.171	2.987	2.849	2.939	0.860	0.198	0.086
Venustiano	0.055	0.080	0.116	0.228	0.361	1.767	4.302	3.934	2.573	0.309	0.071	0.064
Xicotepec	0.045	0.034	0.039	0.078	0.286	2.443	3.228	3.523	2.972	0.950	0.187	0.051

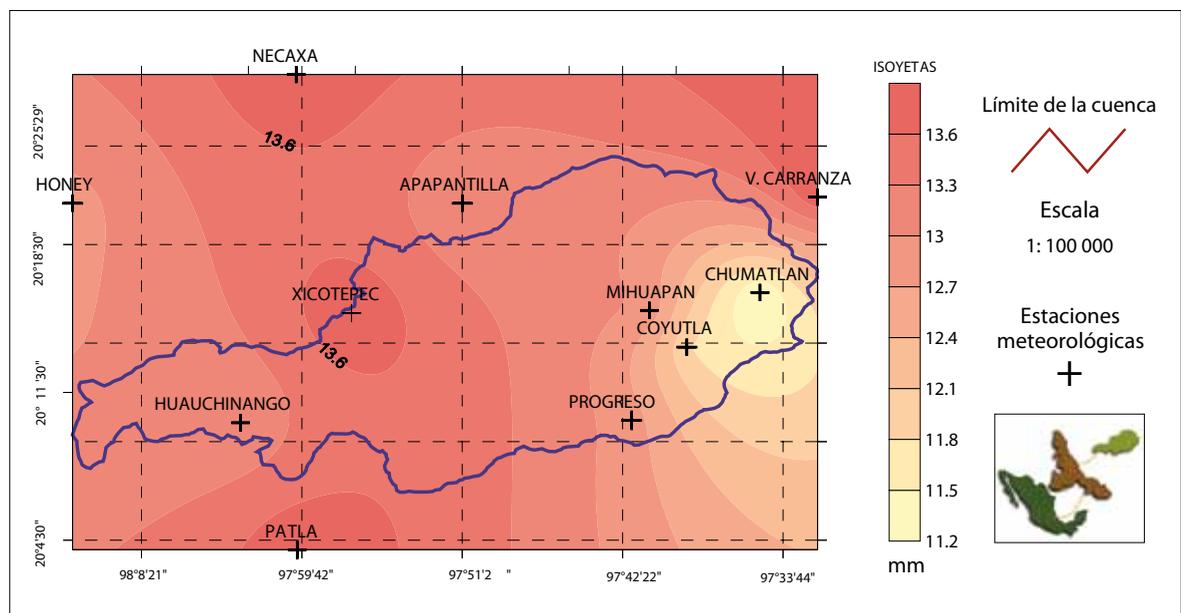


Figura 5. Distribución espacial del ICP₁ en la subcuenca del río San Marcos.

bargo, la distribución de la precipitación es igual al ICP₁. Esto significa que las precipitaciones se distribuyen de manera relativamente contenida en cierto número de meses del año, manteniendo así su efecto erosivo durante este intervalo de tiempo. De manera que los eventos de lluvia constituyen un factor de presión a la degradación de estos agroecosistemas no solo por la agresividad con que impacta al suelo, sino también por no estar estrictamente restringidos a un estrecho periodo estacional (Angulo *et al.*, 2009; Alatorre *et al.*, 2012).

En lo que respecta al IET se puede observar que seis de las siete estaciones registran valores

categorizados como Altos, de éstas la estación Chumatlán y Mihuapan presentan los datos más bajos (2 693.40 y 2 708.69, respectivamente) y las estaciones Progreso y Venustiano presentan los datos más altos (4 046.14 y 4 972.17, respectivamente; Cuadro 10); Xicotepec es la única estación con valores Muy Altos (Figura 6). Estos resultados contribuyen a revelar con mayor objetividad la acción de las precipitaciones en la superficie edáfica de la zona en estudio, ya que este índice en el que se han integrado la agresividad climática por el IMF y la distribución de las precipitaciones a lo largo del año, evalúa cualitativamente la acción de la lluvia

Cuadro 10. Clasificación del Índice de Erosividad Total en la subcuenca

Estación	IMF	ICP	IET
Apapantilla	260.22	13	3 382.89
Chumatlán	240.48	11.2	2 693.40
Coyutla	291.81	11.83	3 452.11
Mihuapan	209.65	12.92	2 708.69
Progreso	315.12	12.84	4 046.14
V. Carranza	359.00	13.85	4 972.17
Xicotepec	413.00	13.83	5 711.83

sobre el suelo como intensa, provocando inicialmente erosión por impacto y a continuación por el escurrimiento superficial (Catari *et al.*, 2011). Debe destacarse que los suelos de la zona en estudio tienen sus nutrientes concentrados en los primeros 20 cm y de acuerdo con Sandhu (1989) y Ries *et al.* (2000), una vez que la erosión se desencadena remueve de forma selectiva los coloides minerales, orgánicos y los nutrientes del suelo, provocando la pérdida de la fertilidad natural mediante un proceso asintomático (Febles, 1988). Por lo que de mantenerse este proceso a lo largo del tiempo

sin aplicar medidas adecuadas de uso y manejo de los suelos, el factor climático estará contribuyendo a la insostenibilidad de los espacios rurales que se encuentran dentro de la zona en estudio.

Análisis estadístico

El Cuadro 11 resume la matriz de coeficientes de correlación de Pearson entre los ocho procedimientos utilizados para estimar la erosividad y la concentración de las lluvias en las estaciones climáticas de la subcuenca. Se observaron correlaciones altamente significativas entre los siguientes procedimientos ($\alpha=0.01$): IFA₁ vs. IFA₂, IFA₄, IMF₁, IMF₂ e ICP₁; IFA₂ vs. IFA₄, IMF₁, IMF₂, e ICP₁; IFA₃ vs. IMF₁ e IMF₂; IFA₄ vs. IMF₁, IMF₂ e ICP₁; ICP₁ vs. ICP₂, y correlaciones significativas ($\alpha=0.05$) entre IMF₁ vs. ICP₁ e IMF₂ vs. ICP₁.

El análisis del Factor R propuesto por Figueroa *et al.* (1991) mostró un coeficiente de correlación al cuadrado alto con respecto al índice Modificado de Fournier y al Factor R (EI₃₀) propuesto por Ramírez (2006), ya que en ambos casos el valor de “r²” fue de 0.906 (Figuras 7 y 8), lo cual indica la posibilidad de utilizar ambos índices (IMF e EI₃₀) en cualquier estudio dentro de la subcuenca para definir la erosividad de la lluvia y poder generar

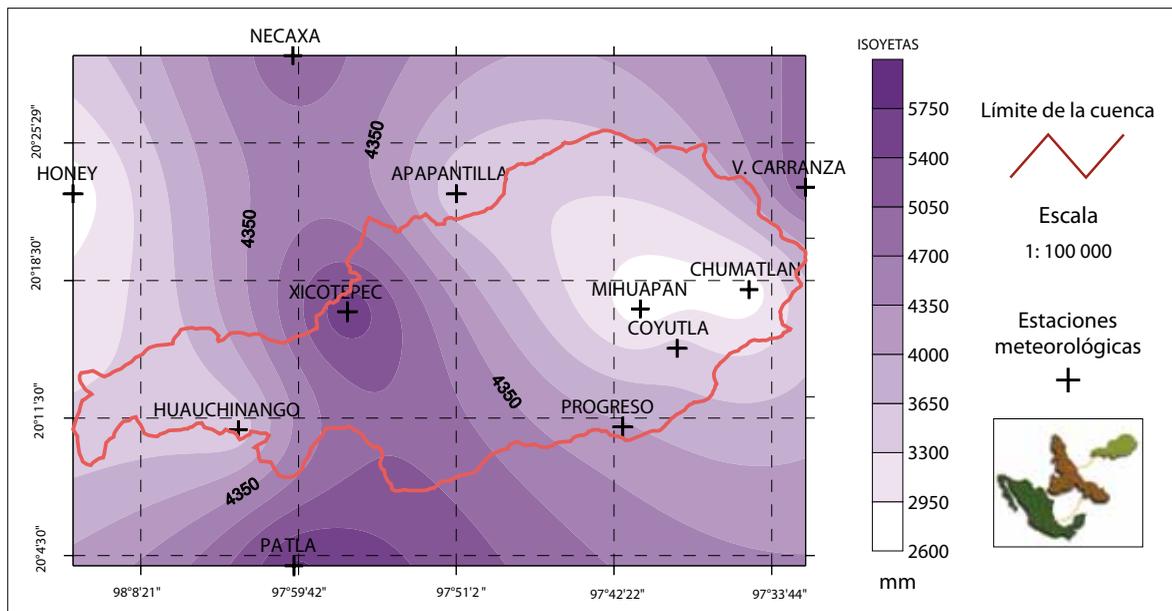


Figura 6. Distribución espacial del IET en la subcuenca del río San Marcos.

Cuadro 11. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson entre los procedimientos utilizados

	IFA ₁	IFA ₂	IFA ₃	IFA ₄	IMF ₁	IMF ₂	ICP ₁	ICP ₂
IFA ₁	1.000							
IFA ₂	0.998	1.000						
IFA ₃	0.451	0.439	1.000					
IFA ₄	0.912	0.929	0.491	1.000				
IMF ₁	0.823	0.831	0.712	0.885	1.000			
IMF ₂	0.823	0.831	0.712	0.885	1.000	1.000		
ICP ₁	0.798	0.808	0.259	0.837	0.637	0.638	1.000	
ICP ₂	0.428	0.434	0.167	0.472	0.254	0.254	0.841	1.000

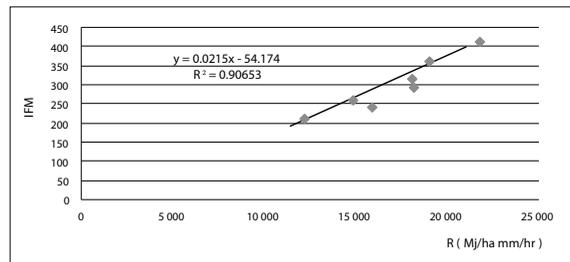


Figura 7. Relación entre el Factor R y el Índice Modificado de Fournier (IMF).

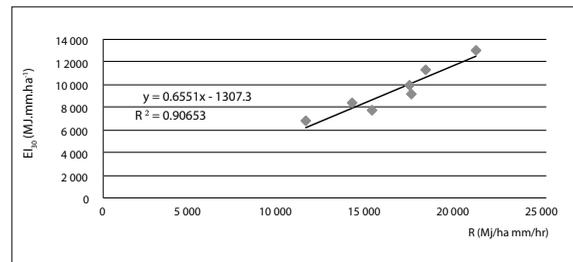


Figura 8. Relación entre el Factor R y EI₃₀ para la subcuenca.

mapas de riesgo de erosión que sean utilizados en la prevención de desastres, los cuales son frecuentes en la zona, así como en programas de ordenamiento sustentable de la actividad agropecuaria, que involucren acciones de estabilización de laderas, medidas de conservación de suelo y zonas de restauración ecológica que recarguen los mantos freáticos de la región. De igual forma, las gráficas generadas (Figuras 7 y 8) pueden emplearse para la interpolación de los valores del IMF y el IE₃₀, de esta forma conocer el valor estimado del Factor R (Alatorre *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES

El estudio permite concluir que las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, según el Índice de Concentración de las Precipitaciones (ICP), se concentran de manera estacional en los meses de junio a octubre, periodo donde se acumula el 70% de la precipitación total, y por lo tanto, el suelo no debe permanecer desnudo para evitar su pérdida por erosión. Las lluvias presentan alto potencial erosivo, ya que el IET en seis de las siete estaciones registra valores categorizados como altos, siendo la

de Xicotepec la única estación con valores considerados como muy altos.

En lo que respecta a los resultados del Índice de Agresividad Climática o Índice Modificado de Fournier (IMF), los valores más altos coinciden con el núcleo más lluvioso de la zona evaluada, el mismo que se localiza en el área de influencia de la estación climática de Xicotepec, con una altitud de 1 279 msnm, específicamente en la zona agrícola cafetalera de la zona en estudio, por lo tanto, en esta zona impera la aplicación de programas destinados a la introducción de medidas de conservación de suelo y de restauración ecológica, ya que es la más afectada por la agresividad climática de la región. Los valores menos agresivos se ubican al oriente de la subcuenca, en territorio influenciado por la estación de Mihuapan, con una altitud de 886 msnm. Cabe destacar que todos los valores de las estimaciones del IMF de la subcuenca se ubican en una sola clase, quedando definida toda el área como de muy alta agresividad climática, por lo que estos resultados evidencian que la zona en estudio es altamente vulnerable a la erosión de los suelos. Por tal motivo y, con el propósito de lograr la sostenibilidad de los sistemas productivos establecidos, es necesario que los agricultores tomen medidas adecuadas de conservación de suelos, para minimizar la acción erosiva de las lluvias, manteniendo una cobertura vegetal permanente y así evitar la disminución de la fertilidad por consecuencia de la erosión.

De igual manera, el coeficiente de correlación entre el IMF y el Factor R (EI_{30}) es considerado como alto (0.906), lo que indica la posibilidad de utilizar este índice para definir la erosividad de la lluvia de manera confiable cuando no se cuente con los datos requeridos para el cálculo de dicho factor.

Por otro lado, se concluye que resulta imprescindible tener en cuenta el factor climático en las propuestas de manejo y uso de ecosistemas montañosos, para conjuntamente con la evaluación de otros indicadores de presión, contribuir al diseño de programas y acciones de conservación que garanticen la sostenibilidad agroambiental del suelo y la productividad de la región; en este contexto la información y cartografía generadas sirven como una herramienta fundamental y básica

en la planeación y gestión del manejo integral de la subcuenca del río San Marcos, enclavada en la Sierra Norte de Puebla. Finalmente, el empleo de los índices de agresividad climática evaluados en este trabajo, permiten caracterizar la erosividad de la lluvia como un indicador de presión ambiental que puede utilizarse de manera económica y fácil, aunque considerando la escasez e intermitencia de la información climática que generalmente existe en las estaciones meteorológicas del país.

REFERENCIAS

- Alatorre, L., S. Beguería, N. Lana-Renault, A. Nava and J. M. García Ruiz (2012), "Soil erosion and sediment delivery in a mountain catchment under scenarios of land use change using a spatially distributed numerical model", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, no. 16, pp. 1321-1334.
- Angulo Martínez, M., M. López Vicente, V. Serrano and S. Beguería (2009), "Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro Basin (NE Spain)", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, no. 13, pp. 1907-1920.
- Apaydin, H., G. Erpul, I. Bayramin and D. Gabriels (2006), "Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey", *Journal of Hydrology*, vol. 328, no. 3-4, pp. 726-732.
- Catari, G., J. Latron and F. Gallart (2011), "Assessing the sources of uncertainty associated with the calculation of rainfall kinetic energy and erosivity – application to the Upper Llobregat Basin, NE Spain", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, no. 15, pp. 679-688.
- Castelán Vega, R. (2003), *Diagnóstico de la erosión de los suelos rojos de la Sierra Norte de Puebla. Alternativas de uso y manejo*, tesis de Maestría, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Castelán Vega, R. (2009), *Estrategia de manejo integral de los recursos naturales de la subcuenca del río San Marcos, Puebla: enfoque para un desarrollo sustentable*, tesis de Doctorado, Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- CEC (1992), CORINE soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community, Commission of the European Communities, Luxembourg.

- Colotti, E. (1998), "Determinación de la energía cinética de la lluvia con datos horarios", *Terra*, XIV (23): 55. 11 de enero 2005 [<http://revele.com.ve/programas/indice/ria.php?id=11283&rev=terra>].
- Delgado, E. F. (2003), "Un protocolo para apoyar la selección de prácticas de conservación de suelos en tierras montañosas tropicales", *Memorias del I Seminario Internacional de Agricultura de Conservación en Tierras de Ladera*, Manizales.
- Diodato, N. (2004), "Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regimen", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 103-107.
- Febles, J. M. (1988), *La erosión de los suelos en las regiones cársicas de la provincia de La Habana*, tesis de Doctorado en Ciencias Agrícolas de la Facultad de Agronomía, Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana, Cuba.
- Figuroa, S., B. A. Amante, H. G. Cortés, J. Pimentel, E. S. Osuna, J. M. Rodríguez y F. Morales (1991), *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Colegio de Postgraduados-CREZAS, San Luis Potosí, México.
- Gabriels, D., A. Vermeulen, K. Verbist and V. Meirvenne (2003), "Assessment of rain erosivity and precipitation concentration in Europe", in Gabriels, D. and W. Cornelis (eds.), *Proceedings of the International Symposium 25 Years of Assessment of Erosion*, Ghent, Belgium, pp. 87-92.
- Gómez, A. A. (1975), "Sistema IUM para determinación del uso y manejo de los suelos de ladera", *Cenicafé*, vol. 26, núm. 2, pp. 72-86.
- Gómez, F. E. (1991), "El potencial de erosión pluvial por período decadal y su manejo conservacionista-zona suroccidental del departamento de Antioquia (Metodología de Fournier)", *Boletín de Ciencias de la Tierra*, núm. 10, pp. 1-21.
- INEGI (2000), *Síntesis Geográfica del estado de Puebla y anexo cartográfico*, México [cd-rom].
- López-Vicente, M., A. Navas and J. Machín (2008), "Identifying erosive periods by using RUSLE factors in mountain fields of the Central Spanish Pyrenees", *Hydrology and Earth System Sciences*, no. 12, pp. 523-535.
- Michiels, P. and D. Gabriels (1996), "Rain variability indices for the assessment of rainfall erosivity in the Mediterranean region", in Rubio, J. I. and A. Calvo (eds.), *Soil degradation in Mediterranean environments*, Geofoma Ediciones, Logroño, pp. 49-70.
- Ramírez O., A. F. (2006), *Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetalera central del departamento de Caldas*, tesis de grado Ingeniero Forestal, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima, Ibagué.
- Rey, J. (1996), *Proyecto de erosión*, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, documento interno, Bogotá.
- Ries, J. B., M. Langer and Ch. Rehberg (2000), "Experimental investigation on water and wind erosion on abandoned fields and arable land in the central Ebro Basin, Aragón/Spain", *Z. Geomorph. N. F.*, no. 121, pp. 91-108.
- Rivera P., J. H. y A. A. Gómez (1991), "Erosividad de las lluvias en la zona cafetalera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda)", *Cenicafé*, vol. 42, núm. 2, pp. 37-52.
- Ruiz, C., R. M. Riverol Rosquet y E. Calderón Fabián (2001), "Diagnóstico de la erosión de los suelos en la Sierra Norte del estado de Puebla", *Fundamentos para una agricultura sostenible*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Ruiz, C., R. M. Riverol y F. V. Tamariz (2005), *Zonificación agroecológica de la Sierra Norte de Puebla*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Sandhu, G. R. (1989), "Soil physics application under stress environment", *Proceedings of the International Symposium on Applied Soil in Stress Environment*, Islamabad, Pakistan.
- Soto, G., F. Santibáñez y K. Verbist (2006), "Zonificación de los regímenes hídricos de América Latina y el Caribe desde una perspectiva climática", *IV Foro Mundial del Agua*, México.
- Tolón, A., X. Lastra y M. D. Ramírez (2007), "Sistemas de indicadores de sostenibilidad, pasado, presente y futuro", *I Seminario de Cooperación y Desarrollo en Espacios Rurales Iberoamericanos, Sostenibilidad e Indicadores*, Almería, España.
- Vega, M. B. y J. M. Flebes (2007), "Dinámica de la erosión de los suelos en áreas rurales de La Habana, Cuba como contribución al desarrollo rural sostenible", *I Seminario Internacional de Cooperación y Desarrollo en Espacios Rurales Iberoamericanos, Sostenibilidad e Indicadores*, Almería, España.
- Vega, M. B. y J. M. Flebes (2008), "La agresividad de la lluvia en áreas rurales de la provincia de La Habana como factor de presión en la sostenibilidad agroambiental", *II Seminario Internacional de Cooperación y Desarrollo en Espacios Rurales Iberoamericanos, Sostenibilidad e Indicadores*, Almería, España.