

INDICES DE CLIMA, EROSION Y PRODUCTIVIDAD DE SUELOS EN VENEZUELA

Deyanira Lobo Lujan¹, Donald Gabriels², Fernando Delgado³, Zenaida Lozano¹

La erosión hídrica constituye uno de los factores más serios de degradación ambiental que afecta significativamente la sostenibilidad de los ecosistemas naturales y de los agroecosistemas.

Este proceso consiste en la separación y remoción de partículas de suelo y sedimentos superficiales y fragmentos de rocas que ocurre por procesos hidrológicos que ocurre en forma laminar, en surcos, en cárcavas y a través de movimientos en masa, axial como por la acción de viento. La erosión, tanto hídrica como cólica, es generalmente mayor en regiones áridas y semiáridas donde el suelo se desarrolla pobremente y la vegetación proporciona escasa protección.

Donde el uso de la tierra causa disturbación del suelo, la erosión puede aumentar muy por encima de las proporciones naturales. En las tierras de altas pendientes la remoción de partículas, generalmente conduce a la denudación, mientras que otras áreas de menor inclinación ocurre el almacenamiento del material erosionado, el cual puede alcanzar más fácilmente los lagos y otros reservorios de agua, lo que puede conllevar a que la tasa de producción de sedimentos sea mayor que la de denudación.

Cuando se produce escorrentía entra menor cantidad de agua en el suelo, por lo que se reduce la disponibilidad de agua para los cultivos. Asimismo, la erosión disminuye los niveles de los nutrientes esenciales para las plantas y decrece la diversidad y abundancia de organismos del suelo, además de proveer un importante medio de transporte de elementos químicos contaminantes que son fácilmente adsorbidos por la superficie de los sedimentos o pueden estar disueltos en el agua de escorrentía.

La erosión del suelo es un importante problema social y económico y es un factor esencial en las evaluaciones de la función y salud de los ecosistemas. La estimación de la erosión es esencial para los aspectos relacionados con manejo de suelos y agua, incluyendo transporte de sedimentos y deposición en terrenos bajos, reservorios de agua para consumo humano, industrial o riego, sistemas de producción de energía eléctrica, etc.

Relación erosión – Productividad

La erosión del suelo es ampliamente reconocida como una amenaza para la productividad de los suelos, la seguridad alimentaria y la integridad del ecosistema mundial (Pimentel, 1993; Lal, 1995; Pimentel et al., 1995), pero la amenaza es particularmente aguda en los trópicos debido a la convergencia circunstancial de mayor agresividad climática, niveles bajos y uso inadecuado de fertilizantes y actividades de conservación, suelos usualmente frágiles, y la dependencia fuerte en la calidad de la tierra para el sustento (Sanchez et al., 2003).

¹ Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, lobod@agr.ucv.ve

² Universidad de Gante, Departamento de Manejo de Suelo, Bélgica

³ Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), Venezuela

Las metodologías para evaluar el efecto de erosión sobre la productividad de los cultivos y uso de la tierra están caracterizadas por su no-direccionalidad: monitorear directamente el efecto de la erosión en los rendimientos es imposible ya que la erosión generalmente es un proceso gradual y debido a los largos plazos involucrados, su efecto en la productividad puede ser disimulado y confundido por otras tendencias en rendimientos que son principalmente causadas por innovaciones tecnológicas. Se han aplicado las técnicas del modelado para evaluar el efecto de erosión en los rendimientos, pero la falta de hechos observados dificulta la validación de estos modelos.

Las relaciones empíricamente derivadas involucran el peligro de una mala interpretación de la asociación observada, sobre todo cuando varias variables explicativas potenciales están envueltas. El riesgo de confundir el efecto de erosión sobre la productividad y o el cambio de uso de tierra con los efectos de otras variables sobre la productividad y o el cambio de uso de tierra es inevitable.

Indices climáticos

Las clasificaciones agroclimáticas y bioclimáticas proporcionan ilustraciones de los problemas básicos por analogía. Las clasificaciones multiuso son de utilidad limitada, el acoplamiento más directo de datos climáticos con la respuesta de los cultivos específicos ofrecería perspectivas de clasificación más pertinentes. Sin embargo, la bonificación agroclimática siempre ha sido de particular atractivo para los países en vías de desarrollo sin una red extensa de estaciones meteorológicas y agrícolas

Algunos de los índices climáticos más utilizados para delimitar áreas desde el punto de vista del clima se mencionan a continuación:

Índice de Aridez de De Martonne (I_M) (1923)

$$I_M = \frac{P}{t + 10}$$

Donde: P = Precipitación media anual (mm)

t = temperatura media anual (°C)

Cuya clasificación se presenta en el Cuadro 1

Cuadro1. Tipos climáticos con base al I_M .

Tipo Climático	I_M
Árido	0 – 10
Semiárido	10 – 20
Mediterráneo	20 – 24
Semihúmedo	24 – 28
Húmedo	28 – 35
Muy húmedo	35 – 55
Extremadamente húmedo	> 55

Índice de Aridez (UNEP, 1997), cuya clasificación se presenta en el cuadro 2.

$$I_a = \frac{P_m}{ET_0}$$

Donde: P_m : precipitación media del periodo
 ET_0 : Evapotranspiración de referencia

Cuadro 2. Clasificación del Índice P/ET₀.

Zonas	P/ET ₀
Hiperáridas	< 0.05
Áridas	0.05 a < 0.20
Semiáridas	0.20 a < 0.50
Subhúmedas secas	0.50 a < 0.65
Subhúmedas húmedas	0.65 a 1
Húmedas	> 1

Clasificación según Thornthwaite (1948)

Thornthwaite propone el Índice de Efectividad de la Precipitación (PE) para clasificar las regiones climáticas.

$$PE = \sum_1^{n=12} 1.65 * \left(\frac{P}{T + 12.2} \right)^{10/9}$$

Donde: P = precipitación mensual (mm)
 T = temperatura mensual (°C)
 n = meses = 12

La clasificación del clima con base al PE, se presenta en el cuadro 3

Cuadro 3. Clasificación del Clima con base al Índice PE.

Clima	PE
Árido	< 16
Semiárido	16 – 31
Subhúmedo	32 – 63
Húmedo	64 – 127
Hídrico	>128

Períodos con déficit y con exceso de humedad

Definiéndose como un mes seco en el cual la relación $P_m/ET_0 < 0.5$. La longitud del período seco corresponde al número de meses secos. El régimen hídrico se clasifica según los límites presentados en el cuadro 4.

Cuadro 4. Clasificación del Régimen Hídrico.

Régimen Hídrico	Condiciones
Xérico	12 meses secos e $I_a < 0.05$
Hiper árido	11 – 12 meses secos
Árido	9 – 10 meses secos
Semiárido	7 – 8 meses secos
Subhúmedo	5 – 6 meses secos
Húmedo	3 – 4 meses secos
Hiper húmedo	1 – 3 meses secos
Hídrico	0 meses secos y $P_a < 2500$ mm
Hiper hídrico	0 meses secos y $P_a > 2500$ mm

Erosividad de la lluvia

La causa fundamental de la erosión del suelo es la acción de la lluvia sobre el suelo, por lo tanto, la cantidad de suelo erosionado depende del efecto combinado del poder de la lluvia para causar erosión y la habilidad del suelo para resistir la acción de la lluvia. En términos matemáticos, la erosión es una función de la Erosividad (la capacidad potencial de la lluvia para causar erosión) y la Erosionabilidad (la vulnerabilidad del suelo a la erosión)

Se han desarrollado diferentes índices para relacionar las características físicas de la lluvia con parámetros comunes de la misma y con su erosividad.

Wischmeier y Smith (1958) encontraron que el producto de la energía cinética de las tormentas (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I_{30}) estaba linealmente relacionado con las pérdidas de suelo:

$$R = \sum_{i=1}^n (E * I_{30}) \text{ (MJ.mm.ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$$

$$E = \sum_{j=1}^m (11,89 + 8,73 \log I_i) * P_i 10^{-3}$$

Donde:

R: erosividad media anual

E: energía cinética

I_{30} : intensidad máxima de la tormenta en 30 minutos

I_i : intensidad para el intervalo de la tormenta i

P_i : volumen de lluvia durante el intervalo i

m: numero de intervalos de tormentas con igual intensidad

n: numero de tormentas erosivas por año

El factor R de Wischmeier y Smith (1958) ha sido apropiado para definir la erosividad de la lluvia para zonas templadas, por lo que otros investigadores han propuesto diferentes índices de erosividad para zonas tropicales

Hudson (1986) reportó que para el Sur de África solo precipitaciones con intensidades mayores de 25,4 mm/h causaban salpique significativo, por lo propuso el índice $KE > 1$, que considera solo la energía de las lluvias que caen con intensidades mayores de 25,4 mm/h

$$KE = 29,8 - \frac{127,5}{I} \left[\frac{J}{m^2 * mm} \right]$$

Donde I es la intensidad de la tormenta (mm/h)

Lal (1976), propuso utilizar intervalos más cortos para la máxima intensidad (I_{max}):

$$EI_{30i} = Pi * I_{max} \quad (mm^2/h)$$

Seleccionando la máxima intensidad en 7,5 minutos

Por otro lado, **Salako et al (1991)** correlacionaron la erosión del suelo, medida en parcelas de campo, con varios índices de erosividad: EI_{30} (Wischmeier y Smith, 1958), $KE > 1$ (Hudson, 1986) y el AI_m (Lal, 1976) y encontraron que para las condiciones del Sur de Nigeria el término energía calculado por la ecuación propuesta por Kowal y Kasam (1977) (citados por Salako et al, 1991) describió mejor las pérdidas de suelo que EI_{30}

$$E_i = 41,4P_i - 120 \left[\frac{J}{m^2} \right]$$

Donde P_i es el volumen de la tormenta

El factor de erosividad 'R' = EI_{30} es difícil de obtener debido a que la energía cinética 'E' y la máxima intensidad I_{30} de las tormentas individuales requieren ser analizados de registros de lluvias suficientemente de muchos años (Michiel y Gabriels, 1996). En muchos países, y particularmente en América Latina no se dispone de estos registros; por otra parte existen pocas redes meteorológicas y distribuidas irregularmente, alta variabilidad espacial y temporal de la agresividad de la lluvia, además de las limitaciones para calcular 'R'.

Estas limitaciones han llevado a relacionar la erosividad de la lluvia con otros parámetros que puedan ser determinados más fácilmente:

Fournier (1960) desarrolló un índice que se ha correlacionado con la carga de sedimentos en ríos: el Índice de Fournier

$$IF = p_{\max}^2 / P$$

Donde p_{\max} es la precipitación media mensual del mes más lluvioso y P, la precipitación media anual.

Sin embargo, este índice tiene deficiencias como estimador del factor de erosividad de la lluvia dentro de la USLE. Por lo tanto, **Arnoldus (1980)** modificó el índice IF, considerando las cantidades de lluvia de todos los meses del año: *índice de Fournier Modificado* (IFM) y no solo la del mes más húmedo

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} p^2 / P$$

Donde: p es la cantidad de lluvia mensual y P es la cantidad de lluvia anual

Este índice puede ser calculado por dos procedimientos: 1) utilizando los valores de precipitación mensual promedio para un periodo determinado, obteniéndose así el IFM₁, y 2) calcular el índice para cada uno de los años y promediando estos valores posteriormente, obteniendo el IFM₂. Los valores del IFM pueden ser clasificados, de la siguiente manera (Cuadro 5)

Cuadro 5. Clasificación del índice de Fournier Modificado (IFM).

(IFM) rango	Descripción
<60	Muy bajo
60 – 90	Bajo
90 – 120	Moderado
120 – 160	Alto
> 160	Muy alto

Se han encontrado numerosas relaciones entre el IFM y el factor 'R' de erosividad de la lluvia

Bollinne et al (1979) encontró, para cuatro estaciones en Bélgica, las siguientes ecuaciones exponenciales:

$$EI_{30} = 11,54 e^{0,00215(P)}$$
$$EI_{30} = 11,55 e^{0,254(IFM)}$$

Donde: P es la precipitación media anual
(IFM) es el Índice de Fournier Modificado

Los aspectos más importantes del clima, especialmente en zonas ecológicamente marginales son la variabilidad anual de la lluvia y la distribución de la misma que pone de manifiesto los periodos de exceso y déficit hídrico haciendo difícil el crecimiento y desarrollo de plantas y cultivos. Por lo tanto es necesario caracterizar la variabilidad de los patrones de lluvia anual y mensual. La concentración de la lluvia es también importante en la evaluación de la erosión hídrica, conservación de suelos y agua, desertificación y degradación de la tierra (Michiels y Gabriels, 1996).

Oliver (1980) propuso el Índice de concentración de la precipitación (ICP), expresado como %, para definir los aspectos temporales de la precipitación, llegando a la conclusión que el ICP es más apropiado que otros índices estadísticos para evaluar y comparar la concentración de la lluvia entre estaciones. La principal razón son sus límites (8,3 y 100 %) y el énfasis que pone en la distribución relativa independientemente de la cantidad total.

$$PCI = 100 \frac{\sum p_i^2}{P^2}$$

Donde: p_i es la lluvia mensual y P es la lluvia anual

Los límites teóricos del ICP son: cuando la lluvia de cada mes del año es la misma, $ICP = 8.3$, y cuando la lluvia del año ocurre en un solo mes, el $ICP = 100$. Un valor bajo del ICP indica que la lluvia tiene una distribución uniforme, mientras que valores mas altos indican una mayor concentración de la lluvia. (Cuadro 6)

El Índice de concentración de la precipitación también puede ser calculado usando dos procedimientos, reportándose como ICP_1 , al valor calculado tomando los valores promedios de lluvias para el período considerado, representando este el Índice de Concentración Estacional de la Precipitación; mientras que ICP_2 corresponde a los valores calculados cada año y promediados posteriormente, representando El Índice de Concentración Temporal de la Precipitación (Cuadro 6)

Cuadro 6. Clasificación del índice de concentración de la precipitación (ICP).

ICP (%)	concentración Estacional de la lluvia ICP_1	concentración Temporal de la lluvia ICP_2
8,3 – 10	Uniforme	Uniforme
10 – 15	Moderadamente estacional	Moderadamente estacional
16 – 20	Estacional	Concentrada
21 – 50	Fuertemente estacional	Fuertemente concentrada
50 – 100	Irregular	Irregular

Indices climáticos en zonas agrícolas de Venezuela

Con el propósito de evaluar la erosividad y la concentración de la precipitación en Venezuela, se seleccionaron 13 estaciones meteorológicas correspondientes a tres zonas

climáticas: semiárida, subhúmedas seca y húmeda, cuya localización y años de registro se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Estaciones meteorológicas.

Estación	Estado	Instituto	Latitud	Longitud	Elevación	Años
Carora Granja	Lara	MARN	10° 16'	70° 08'	413	1978 – 1998
Bobare	Lara	MARN	10° 29'	69° 46'	660	1978 – 1997
Barquisimeto	Lara	MARN	10° 07'	69° 32'	614	1970 – 1990
Quibor	Lara	MANR	9° 9'	69° 42'	500	1969 – 1989
Quisiro	Zulia	MARN	10 ° 88'	71° 29'	20	1970 – 1998
Maracaibo	Zulia	MARN	10 ° 57'	71° 73'	65	1970 – 1990
Valle de La Pascua	Guárico	MARN	9° 13'	66° 00'	168	1969 – 1990
Los Arbolitos	Guárico	MARN	9° 22'	66° 23'	161	1969 – 1986
San Antonio Tama	Guárico	MARN	9° 41'	66° 02'	175	1978 – 1998
Colonia Turén	Portuguesa	MAC	9° 15'	69° 06'	275	1960 – 1982
Santa Bárbara	Barinas	MARN	7° 50'	71° 09'	224	1970 – 1980
Mesa de Cavacas	Portuguesa	UNELLEZ	9° 04'	68° 48'	300	1980 – 1991
Banco de Los Cedros	Portuguesa	MARN	8° 57'	69° 43'	125	1980 - 1991

MARN: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales; MAC: Ministerio de Agricultura y Cría; UNELLEZ: Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora

Para los períodos señalados (Cuadro 7) para cada una de las estaciones se calcularon los siguientes índices: el Índice de Fournier Modificado (IFM), utilizando los valores de precipitación mensual promedio, IFM₁, y para cada uno de los años y promediando estos valores posteriormente, IFM₂ (Cuadro 8).

El Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) fue calculado utilizando los mismos procedimientos que para el IFM, reportándose como ICP₁, al valor calculado tomando los valores promedios de lluvias para el período considerado, representando este el Índice de Concentración Estacional de la Precipitación; mientras que ICP₂ corresponde a los valores calculados cada año y promediados posteriormente, representando El Índice de Concentración Temporal de la Precipitación.

El factor EI₃₀, fue calculado utilizando las siguientes ecuaciones, provenientes de estudios realizados por Páez, et al (1983) para Valle de La Pascua (Llanos Centrales) y Guanare (Llanos Occidentales), respectivamente (Cuadro 8):

$$EI_{30} = [-21.69 + 1.04 (p)] * 10 \text{ (Llanos Centrales)}$$

$$EI_{30} = [-15.82 + 0.93 (p)] * 10 \text{ (Llanos Occidentales)}$$

$$EI_{30} = [- 8.27 + 0.65(p)] * 10 \text{ (Zonas semiáridas)}$$

Donde: p es la precipitación media mensual (mm)

Se puede observar, en términos generales que en todas las estaciones el Índice de Concentración Temporal de la Precipitación (IPC_2) es mayor que el Índice de Concentración Estacional de la Precipitación (ICP_1). Los valores de (ICP_1) revelan una distribución moderadamente estacional, mientras que los valores de (IPC_2) evidencian una distribución de la precipitación moderadamente estacional en las estaciones de los Llanos Occidentales y una mayor concentración en los Llanos Centrales y zonas semiáridas.

Con respecto a la erosividad de la lluvia, estimada con el Índice de Fournier Modificado (IFM) se encontró que para las estaciones de las zonas semiáridas la agresividad climática es baja o muy baja, mientras que para los Llanos Centrales la agresividad climática es alta, y muy alta para los Llanos Occidentales. Esto coincide con los valores estimados del factor EI_{30} , los cuales pueden ser considerados como bajos para las zonas semiáridas, moderados para los Llanos Centrales y altos para los Llanos Occidentales.

Cuadro 8. Indices de variabilidad mensual de la precipitación.

Estación	Numero de años	Precipitación media anual (mm)	ICP_1 (%)	ICP_2 (%)	IFM_1 (mm)	IFM_2 (mm)	EI_{30} MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹
Carora Granja	21	458	12	21	55	89	2897
Barquisimeto	21	552	11	14	58	77	2596
Bobare	20	378	10	15	38	59	2375
Quibor	21	510	11	13	55	75	2322
Quisiro	29	448	14	19	64	84	1921
Maracaibo	21	589	14	18	80	105	2833
Valle de La Pascua	21	896	14	16	128	151	6762
Los Arbolitos	17	820	15	18	122	144	5922
San Antonio Tama	21	988	13	17	127	167	7700
Colonia Turén	23	1521	12	14	182	213	11.100
Santa Bárbara	11	2051	12	14	220	250	17606
Mesa de Cavacas	12	1830	13	15	198	224	13822
Banco de Los Cedros	12	1503	12	13	263	288	10939

Con el propósito de estimar la agresividad climática para una zona en particular, mediante índices que puedan ser calculados con métodos menos exigentes que aquellos que se requieren para el factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), se estableció una relación entre el Índice de Fournier Modificado anual (IFM_2), derivado de de la cantidad de lluvia mensual, y el factor EI_{30} .

En el Cuadro 9 se presentan las ecuaciones resultantes al establecer la relación entre el IFM_2 y el factor R de la USLE para cada una de las estaciones meteorológicas, seleccionando aquellas relaciones con el más alto valor de r^2

Cuadro 9. Relación entre el IFM y el EI₃₀.

Estación	Ecuación
Carora Granja	$y = 30,054x^{1,0049} (r^2 = 0,72)$
Bobare	$y = 20,165x + 652,56 (r^2 = 0,87)$
Quibor	$y = 32,195x - 81,033 (r^2 = 0,84)$
Barquisimeto	$y = 0,265x^2 + 74,631x - 1406,9 (r^2 = 0,68)$
Quisiro	$y = 5,6674x^{1,3013} (r^2 = 0,69)$
Maracaibo	$y = 0,1472x^2 + 5,311x + 1569,6 (r^2 = 0,84)$
Valle de La Pascua	$y = 605,1\ln(x) - 23367 (r^2 = 0,62)$
Los Arbolitos	$y = 65,76x - 3520 (r^2 = 0,72)$
Colonia Turén	$y = 40,66x^{1,0533} (r^2 = 0,66)$
Santa Bárbara	$y = 17423\ln(x) - 80182 (r^2 = 0,91)$
Mesa de Cavacas	$y = 57,516x + 141,97 (r^2 = 0,84)$
Banco de Los Cedros	$y = 63,57x - 1466,3 (r^2 = 0,76)$

y: EI₃₀

x: IFM

Efectos de la erosión sobre la productividad en suelos de los Llanos Centrales de Venezuela

Indices de Productividad

La erosión hídrica puede reducir la productividad tan suavemente que tal reducción no puede ser reconocida hasta que la producción de cultivos ya no es económicamente rentable.

El Índice de Productividad (PI) ha servido como una herramienta útil para estimar el potencial productivo relativo de diferentes suelos, los impactos de la erosión sobre la productividad y las pérdidas de suelo permisibles en los planes de conservación de suelos (El Swaify and Fownes, 1989)

Delgado (2003) propuso el Índice de Productividad (PI) como una función de los factores más relevantes para las condiciones de Venezuela:

$$PI = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot B_i \cdot C_i \cdot K_i) \quad \text{con } A_i \text{ a } K_i \text{ como factores}$$

Factor A: condiciones que regulan las relaciones aire-agua del horizonte *i*

- En climas secos ($P/ET_0 < 0.50$): Factor **A** = sub-factor A₁ (Capacidad de almacenamiento de agua disponible)
- En climas húmedos ($P/ET_0 > 2.00$): Factor **A** = sub-factor A₂ (Capacidad de aireación del suelo)
- En climas subhúmedos a secos ($0.50 \leq P/ET_0 \leq 2.00$): Factor **A** = valor mas limitante (el mas bajo valor numérico) entre los sub-factores A₁ y A₂

Factor B: condiciones que determinan la resistencia mecánica (impedancias) para la exploración de las raíces de los cultivos en el horizonte *i*

- Si el contenido volumétrico de fragmentos gruesos en el suelo es menor o igual a 30%, entonces el Factor **B** = sub-factor B₁ (Compactación del suelo)
- Si el contenido volumétrico de fragmentos gruesos en el suelos es mayor de 30%, entonces el Factor **B** = sub-factor B₂ (Fragmentos gruesos)

Factor C: condiciones que regulan la *fertilidad potencial* del horizonte *i*

- En climas húmedos ($P/ET_0 > 2.00$): Factor **C** = sub-factor C₁ (Reacción del suelo -pH)
- En climas secos ($P/ET_0 < 0.50$): Factor **C** = sub-factor C₂ (Contenido de Materia Orgánica del suelo)
- En climas subhúmedos a secos ($0.50 \leq P/ET_0 \leq 2.00$): Factor **C** = valor mas limitante (el mas bajo valor numérico) entre los sub-factores C₁ y C₂

Cada factor del Índice de Productividad (PI) es evaluado en términos del respectivo subfactor más relevante, tomando en consideración las condiciones climáticas locales.

Factor K: evalúa la importancia relativa del horizonte *i* en el perfil de suelo (factor de peso del horizonte respectivo). Este factor es el peso acumulado desde el limite superior al inferior del horizonte *i*, por lo tanto el valor de K de cada horizonte *i* debe ser calculado de la siguiente manera: $K_i = K_{cum}(i) - K_{cum}(i-1)$.

Los valores del Índice de Productividad (PI) pueden clasificarse de acuerdo a lo establecido en el cuadro 10

Cuadro 10. Clasificación del Índice de Productividad (IP).

IP	Descripción
≤ 0.10	Bajo
0.11- 0.30	Moderado
0.31-0.50	Alto
> 0.50	Muy alto

Lobo et al (2005) evaluaron el impacto de la erosión sobre la productividad de un Alfisol de los Llanos Centrales de Venezuela, usando el Índice de Productividad (PI) desarrollado por Pierce et al (1983) y adaptado por Delgado (2003) para las condiciones del país. Para ello seleccionaron cuatro localidades con el mismo tipo de suelo, con pendientes entre 3 y 6 % y con diferentes niveles de erosión: Chaguaramas I (ligeramente erosionado: sin remoción del suelo superficial), Chaguaramas II (moderadamente erosionado: 5 cm de remoción del suelo superficial), Chaguaramas III (moderadamente erosionado: pérdida de 8 cm de suelo) y Chaguaramas IV (severamente erosionado: 10 cm removidos).

La caracterización de los suelos se realizo mediante las siguientes determinaciones: distribución de tamaño de partículas, retención de humedad, densidad aparente, pH y contenido de materia orgánica.

En este caso los sub-factores seleccionados, tomando en cuenta las condiciones climáticas locales fueron:

A: condicionan que regulan las relaciones aire-agua del horizonte *i*, seleccionando el % de arcilla y el grado de desarrollo de la estructura como el subfactor A_2 más limitante. (Figura 1, en la cual A_2 esta en función del % de arcilla)

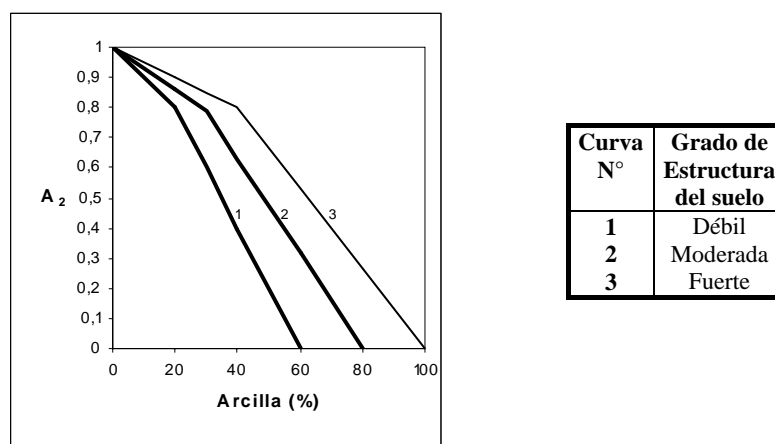


Figura 1. Sub-factor A_2 Capacidad de aireación del suelo

B: condiciones del horizonte *i* que determinan la resistencia mecánica a la exploración de las raíces de los cultivos, seleccionando la densidad aparente en función de la textura del suelo, sub-factor B_1 , debido a que el volumen de fragmentos gruesos en el suelo es menor de 30 % (Figure 2, en la cual B_1 esta en función de la densidad aparente)

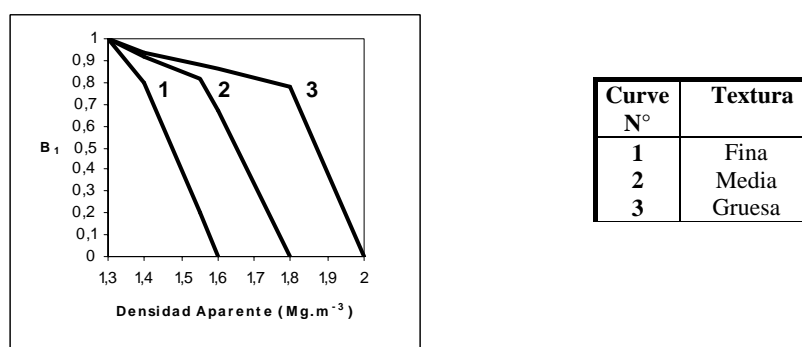


Figura 2. Sub-factor B_1 Compactación del suelo

C: condiciones que regulan la fertilidad potencial del horizonte *i*, seleccionando al pH como el sub-factor C_1 más limitante (Figura 3)

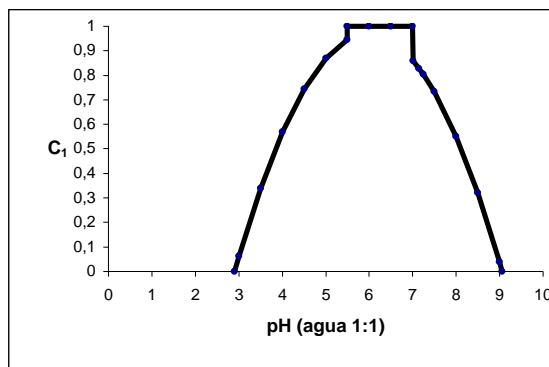


Figure 3. Sub-factor C₁ Reacción del suelo (pH)

K: importancia relativa de cada horizonte *i* (Figura 4 en la cual K esta en función de la profundidad del suelo).

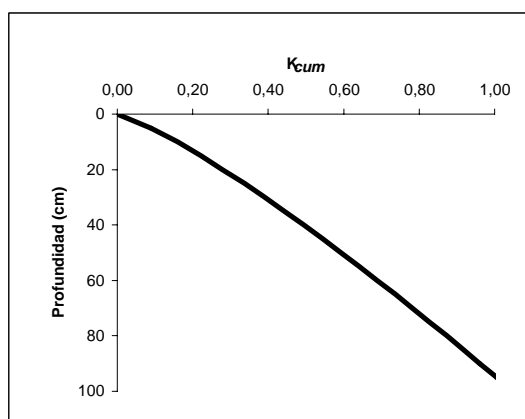


Figure 4. Factor K (factor de peso)

En el cuadro 11 se presentan las propiedades de los suelos con los diferentes niveles de erosión usados para calcular el Índice de Productividad (PI). Los resultados indican que el Índice de Productividad es mayor en el suelo ligeramente erosionado (PI = 0,55), mientras que el suelo severamente erosionado muestra el mas bajo valor del Índice (PI = 0,27)

El PI fue afectado principalmente por los cambios en la capacidad de almacenamiento de agua (subfactor A en función del % de arcilla), la densidad aparente (subfactor B) y el pH (subfactor C).

La vulnerabilidad del suelo a la erosión es la tasa de cambio en la productividad, medida a través de los cambios en los valores del Índice de Productividad por unidad de suelo removido por erosión.

En la figura 5 se muestra una fuerte relación entre la lámina de suelo erosionado y el Índice de Productividad

Cuadro 11. Propiedades del suelo e Índice de Productividad (PI*).

Nivel de erosión	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Sub-factor A	Densidad Aparente $Mg\ m^{-3}$	Sub-factor B	pH	Sub-factor C	Sub-factor K	PI*	
I	0 – 20	12.0	0.95	1.55	0.85	5.9	1.00	0.30	0.24	
	20 – 38	17.0	0.90	1.63	0.60	6.2	1.00	0.18	0.10	
	38 – 70	25.0	0.85	1.60	0.82	6.0	1.00	0.30	0.21	
									Muy alto	0.55
II	0 – 15	12.0	0.95	1.62	0.80	5.4	0.95	0.23	0.17	
	15 – 35	19.5	0.85	1.68	0.50	5.9	1.00	0.22	0.09	
	35 – 60	27.0	0.82	1.61	0.82	5.7	1.00	0.35	0.24	
									Alto	0.50
III	0 – 12	14.0	0.95	1.57	0.85	5.4	0.95	0.18	0.15	
	12 – 32	20.5	0.85	1.70	0.45	5.0	0.85	0.22	0.08	
	32 – 42	23.0	0.82	1.70	0.45	4.2	0.60	0.10	0.04	
	42 – 70	37.0	0.75	1.60	0.82	4.8	0.80	0.30	0.18	
									Alto	0.37
IV	0 – 10	10.0	0.9	1.58	0.82	5.3	0.90	0.15	0.09	
	10 – 18	14.0	0.87	1.63	0.64	5.1	0.88	0.10	0.05	
	18 – 35	17.0	0.85	1.63	0.64	5.2	0.92	0.20	0.10	
	35 – 45	24.0	0.75	1.75	0.20	5.8	1.00	0.10	0.015	
	45 – 70	20.0	0.80	1.83	0.10	5.0	0.85	0.25	0.017	
									Moderado	0.27

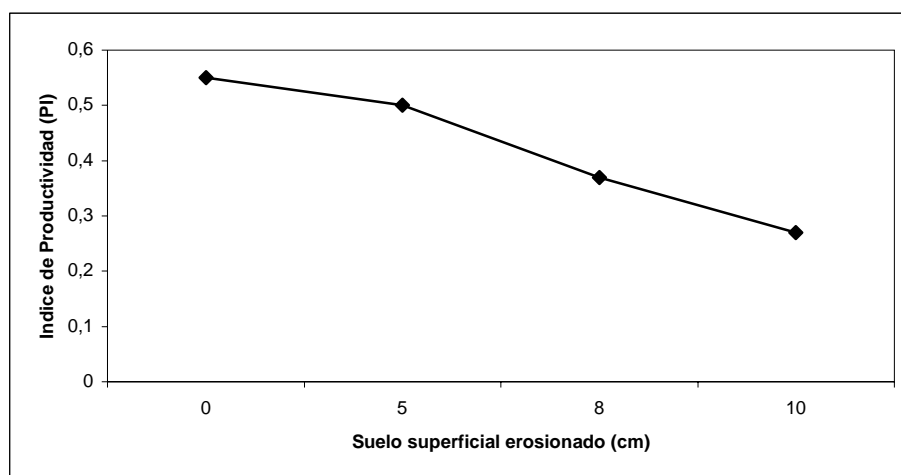


Figure 5. Vulnerabilidad del suelo a la erosión

BIBLIOGRAFIA

- Arnoldus, H.M.J. (1980): An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In: De Boodt, M. and Gabriels, D. (Eds) Assessment of Erosion. John Wiley and Sons, Chichester, 127-132.
- Bollinne, A.; Laurant, A.; Pauwels, J.M.; Gabriels D.; Aelterman J. and Rosseau P. (1980). Rain Erosivity Map of Belgium. In: De Boodt, M. and Gabriels, D. (Eds) Assessment of Erosion. John Wiley and Sons, Chichester, 111 – 120.
- Cipra B., (2000). Revealing uncertainties in computer models. *Science* 287 (5455): 960-961.
- Delgado F. (2003). Soil physical properties on Venezuelan steeplands: applications to conservation planning. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. College on Soil Physics. 11 p.
- De Martonne E. (1923): Aridité et indices d'aridité. Académie des Sciences. Comptes Rendus, 182 (23) : 1395-1398
- El-Swaify S. and J.H. Fownes. (1989). Erosion Processes and Models: Applications in the Tropics. Hurni H and K. Tato (Eds.)Erosion, Conservation, and Small-Scale Farming. p 135-149.
- Fournier, F. (1960): Climat et érosión. Presses Universitaires de France, Paris
- Hudson, N. W. (1986). Soil Conservation. Batsford Limited, London, UK. 324p.
- Lal, R. (1995). Erosion–crop productivity relationships for soils of Africa. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 661–667.
- Lal, R. (1976). Soil erosion in Alfisols in Western Nigeria, III. Effects of rainfall characteristics. *Geoderma* 16: 389-401.
- Lobo, D. and Gabriels D. (2005). Rain distribution and erosivity in Venezuela. Proceedings of the Workshop “Measuring and computing Techniques on Agricultural Issues”. AGRO ENVIRON 2004. Role of Multi-purpose Agriculture in Sustaining Global Environment Udine, Italy 20 - 24, October 2004. Z. Aslan (Ed) ITICU. Istanbul Commerce University (Turkey) *Special Report* 13: 11-18
- Lobo, D. and Gabriels D. (2005). Assessing the rain erosivity and rain distribution in different agro-climatological zones in Venezuela. *Sociedade & Natureza, Special Issue*: 16-29
- Lobo D., Lozano Z., and Delgado F. (2005). Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil. *Catena* 64:297-306.
- Michiels P. and D. Gabriels. (1996). Rain variability índices for the assessment of rainfall erosivity in the Mediterranean Region. In : Soil Degradation and Desertification in Mediterranean Environments. J.L. Rubio and A. Calvo (Eds) pp 49-70.
- Oliver, J.E. (1980): Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer*, 32, 300 - 309
- Pierce F. J.; Larson, W. E.; Dowdy R.H. and Graham, W. A. P. (1983). Productivity of soils: Assessing long-term changes due to erosion. *J. Soil Water Cons.*: 39-44
- Pimentel D. (1993). World Soil erosion and Conservation, Cambridge Univ. Press, New York, NY, USA. 349 p
- Pimentel D., Harvey C., Resosudarmo P., Sinclair K., Kurz D., McNair M., Crist S., Shpritz L., Fitton L., Saffouri R. and Blair R.. (1995) Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits, *Science* 267:1117–1123
- Salako, F. K.; Obi, M. E. and Lal, R. (1991). Comparative assessment of several rainfall erosivity índices in southern Nigeria. *Soil Technology* 4:93-97.
- Sanchez P.A., Palm C.A. and S.W. Buol (2003) Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics, *Geoderma* 1949:1–29.
- Thornthwaite, C.W.(1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94.
- UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME) (1997). World Atlas of Desertification. Second Edition. Middleton N. and Thomas D. (Eds). 182p.
- Wischmeier, W. H. and Smith D. D. (1958) Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions, American Geophysical Union* 39, 2: 285-291.