

El índice de erosión potencial en la vertiente norte del Waraira Repano, estado Vargas, Venezuela

O índice de potencial de erosão na vertente norte do Waraira Repano, estado Vargas (Venezuela)

The Index of Potential Erosion in the Northern Slope of Waraira Repano, State of Vargas (Venezuela)

Henry Antonio Pacheco Gil*

Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Venezuela

Resumen

Se obtuvo el índice de erosión potencial a través del tratamiento de datos edáficos, pluviométricos y térmicos, generando imágenes en formato *raster*, con una resolución espacial de 100 metros, por medio del método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighted). También se usaron los postulados de Fournier-Arnoldus (FI), Bagnouls-Gaussen (BGI) y la MUSLE. El índice calificó la zona como de muy alta y alta erosividad. El bajo contenido de materia orgánica y la ubicación altitudinal parecen ser los factores determinantes; la formación abundante de nubes y el incremento en los montos de precipitación, por el efecto orográfico, generan muy alta erosividad.

Palabras clave: Bagnouls-Gaussen, erosión potencial, Fournier, MUSLE, SIG, Waraira Repano.

Resumo

Obteve-se o índice de potencial de erosão por meio do tratamento de dados edáficos, pluviométricos e térmicos, gerando imagens no formato *raster*, com uma resolução espacial de 100 metros, mediante o método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighted). Também se usaram os postulados Fournier-Arnoldus (FI), Bagnouls-Gaussen (BGI) e a MUSLE. O índice qualificou a zona como de muito alta e alta erosividade. O baixo conteúdo de matéria orgânica e a localização altitudinal parecem ser os fatores determinantes; a formação abundante de nuvens e o aumento na quantidade de precipitação, por efeito orográfico, geram muito alta erosividade.

Palavras-chave: Bagnouls-Gaussen, potencial de erosão, Fournier, MUSLE, GIS, Waraira Repano.

Abstract

The potential erosion index was obtained through the processing of rainfall, soil, and temperature data. Raster images with a spatial resolution of 100 meters were generated using the IDW interpolation method (Inverse Distance Weighted), as well as the Fournier-Arnoldus (FI), Bagnouls-Gaussen (BGI) and MUSLE principles. The erosivity index of the area ranks between very high and high. The low organic matter content and altitudinal location appear to be the determinant factors. The abundant formation of clouds and the increase in the amount of precipitation due to orographic effects generates a very high erosivity.

Keywords: Bagnouls-Gaussen, potential erosion, Fournier, MUSLE, GIS, Waraira Repano.

RECIBIDO: 15 DE FEBRERO DEL 2012. ACEPTADO: 18 DE MAYO DEL 2012.

Artículo de investigación que trata sobre el análisis de datos edáficos, pluviométricos y térmicos con herramientas de las tecnologías de la información geográfica, para generar el mapa de distribución espacial del Índice de Erosión Potencial en el estado Vargas, Venezuela.

* Dirección postal: Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas. Departamento de Ciencias de la Tierra. Av. Páez, entre calles Arismendi y Carabobo, urbanización El Paraíso, Caracas, Venezuela. 1020. Correo electrónico: henrypacheco@gmail.com

Introducción

La erosión potencial se determinó por la acción combinada de factores climáticos y edáficos en atención a índices propuestos en algunos postulados teóricos. Así, el efecto erosivo de las precipitaciones, expresado a través de un índice, representa un problema que ha sido abordado por distintos autores durante varios años, siendo los clásicos Wischmeier y Smith (1978) y Fournier (1960) quienes presentaron un índice de erosividad de la lluvia para ser utilizado por la ecuación universal de pérdida de suelo —en adelante, USLE, por sus siglas en inglés—, el cual fue identificado como factor R. Las indicaciones muestran este índice como el producto de la energía cinética liberada por la lluvia (E), y la máxima intensidad de precipitación, durante un intervalo de 30 minutos (I_{30}) de la tormenta.

Sucesivamente se han venido realizando modificaciones a los planteamientos iniciales, y en la actualidad existen modelos tecnológicos que mejoran los métodos de registro y el procesamiento de datos, tal como reportan Nel y Sumner (2007; 2008) y Nel, Reynhardt y Sumner (2010), encontrando contrastes con modelos previos en Sudáfrica, donde la intensidad erosiva disminuye con la altitud.

Por su parte, Soares et ál. (2012) reportan una tecnología de simulación de precipitaciones para evaluar la erosión del suelo en Portugal. Esta simulación permite localizar áreas donde es posible remover, parcial o totalmente, la biomasa vegetal sin generar problemas de erosión; la remoción de la biomasa es necesaria para disminuir la propagación de incendios forestales, los cuales han causado serias afectaciones en algunos municipios de este país.

Como puede entenderse, la intensidad de la lluvia y el problema de los procesos erosivos han sido estudiados extensamente, con resultados óptimos, en varios países del mundo. Sin embargo, para el área de estudio, y para muchas otras regiones de Venezuela, no existe una base de datos pluviográfica suficientemente densa o antigua como para calcular el valor de R a escala de detalle. En tal sentido, Chiverrell, Foster, Thomas y Marshall (2010) han apuntado la dificultad de la extrapolación de los valores registrados debido a la alta variabilidad espacial y temporal de la agresividad pluvial.

Adicionalmente, se han llevado a cabo varios intentos de relacionar el factor R con parámetros más fáciles de obtener y calcular, considerando la dificultad que representa el cálculo del factor R de la USLE, ya que debe

calcularse la energía cinética y la intensidad de las tormentas de forma aislada y durante un número elevado de años. Con la intención de minimizar estas limitantes, Fournier (1960) estableció el índice de agresividad climática o índice de Fournier —en adelante, IF—, el cual presenta una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía; así Quinton et ál. (1998), al estudiar la relación entre el drenaje y el clima en Malasia, concluyen que el IF puede considerarse como un buen indicador del riesgo de erosión. El cálculo del IF se realiza a partir de los datos pluviométricos de estaciones meteorológicas.

Es importante destacar la necesidad de considerar algunas restricciones en el momento de emplear el IF como indicador de la erosividad pluvial. Así, entre otros aspectos, es necesario considerar la existencia de distintos regímenes pluviales en una misma zona: de acuerdo a los picos mensuales de precipitación o, donde los valores pluviométricos son en general elevados, el IF solo considera el mes de mayor precipitación, despreciando los valores del resto de los meses. De acuerdo con Rafaelli (2003), para solventar esta dificultad, Arnoldus (1977) propuso una corrección del IF en la que se consideran no solo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto de los meses; este es el índice modificado de Fournier —en adelante, IMF—, comprobado por Arnoldus, quien determinó que el IMF se correlaciona mucho mejor con el valor de EI_{30} . Este índice ha sido comprobado en varias partes del mundo, por lo cual se considera válido para nuestro país. Adicionalmente, con el objetivo de estimar la agresividad de las lluvias, a partir de la variabilidad temporal de las precipitaciones mensuales, se propuso el índice de concentración de las precipitaciones —en adelante, ICP—.

De acuerdo con el autor, el rango posible de variación del índice va desde 8,33% (si la precipitación es idéntica en todos los meses) hasta 100% (si toda la lluvia se concentra en un solo mes). El valor del ICP reviste un gran interés si se tiene en cuenta la incidencia de la precipitación sobre la erosión del suelo, que genera una dinámica más activa cuanto mayor es la concentración en el tiempo de las lluvias.

Por su parte, la erodabilidad del suelo es definida por Pérez (2001) como la mayor o menor susceptibilidad del material edáfico de ser disgregado y transportado por los agentes erosivos. Esta susceptibilidad de degradación es lo que se puede entender como el índice de erodabilidad, y puede ser determinado numéricamente

empleando la metodología propuesta para la USLE (Wischmeier y Smith, 1978), en la que el factor K se calcula en función de cuatro componentes: la textura, la estructura, el contenido de materia orgánica y la permeabilidad. Otros componentes, que también se han utilizado para otros estudios, son: la estabilidad de los agregados o la capacidad de infiltración. El índice de erodabilidad, en el presente modelo, se calculó a partir del componente textural, la profundidad y la materia orgánica.

Marco conceptual

Factor textural de las unidades de suelos

Pérez (2001) reporta que la textura en el suelo es un factor importante para la regulación del agua y del aire en el mismo y, por tanto, en el grado de permeabilidad, el cual influye, en mayor o menor grado, en el proceso erosivo. Las texturas que corresponden a la categoría de muy finas a finas son impermeables, tanto al aire como al agua; por lo tanto, son las menos adecuadas en la regulación de estos dos factores externos, constituyéndose en unidades de suelos impermeables con predominancia del escurrimiento superficial. Las texturas gruesas y muy gruesas actúan en forma contraria, y son totalmente permeables; el agua penetra en forma exagerada y su movilización no se puede controlar. Las texturas más adecuadas contra los efectos erosivos son las medias, pues permiten ejercer un mayor control en la regulación del agua y del aire (Iriarte et ál. 2000).

Calificación textural

Se llama *textura* a la composición elemental de una muestra de suelo, definida por las proporciones relativas de sus separados individuales en base a masa (arena, limo y arcilla). Para determinar la textura se utilizan los triángulos texturales, siendo diseñado el de mayor uso a nivel mundial por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos —en adelante, USDA, por sus siglas en inglés—. La textura de los suelos puede considerarse como uno de los factores que determinan el índice de erodabilidad, por consiguiente existen clases texturales, las cuales dependen relativamente de la cantidad de partículas minerales presentes en el suelo, y se califican en atención a la posibilidad de desagregarse y contribuir con la erosión. Con base en lo anterior, las clases texturales se agruparon en intervalos de clase, en los que los índices superiores ejercen menor resistencia a los procesos

erosivos; estos índices se homologaron con la clasificación empleada por Ortiz Villanueva y Ortiz-Solorio (1984) en la República de México para determinar su aplicación en el modelo.

Por otro lado, la escorrentía y la infiltración del suelo están determinadas por la cantidad y tipo de poros del material edáfico. Definiéndose la tasa de infiltración por la cantidad de agua que penetra en el suelo por unidad de área y tiempo (Richard 1952). Generalmente, en los momentos iniciales esta tasa es significativamente alta, máximo cuando el suelo presenta bajos niveles de humedad, y decrece progresivamente, tendiendo asintóticamente a un valor constante que se conoce como tasa de infiltración final (Dunin 1976).

La distribución espacial de los índices mencionados anteriormente es un factor determinante en el análisis y zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa; por lo tanto, es necesaria la interpolación de los datos de las diferentes estaciones meteorológicas sobre toda el área de interés para cada estudio. Actualmente esta interpolación puede efectuarse, de manera muy práctica y precisa, a través de las aplicaciones de programas informáticos que forman parte de los Sistemas de Información Geográfica —en adelante, SIG—, proporcionando una cartografía óptima de la distribución del riesgo de erosión hídrica en la zona estudiada.

Metodología

La información analógica, correspondiente a las coordenadas de las estaciones, fue georreferenciada con las aplicaciones de software diseñados para el trabajo con SIG, usando como *datum* de origen a La Canoa, por ser este el oficial para Venezuela en el momento de instalar las estaciones climatológicas. Una vez georreferenciada toda la información según su *datum* de origen, se ejecutó una reproyección usando las aplicaciones y los parámetros de transformación disponible en software comerciales, como ARCGIS, ERDAS y MapInfo (figura 1). Esta reproyección fue necesaria para poder realizar apropiadamente las operaciones de análisis espacial, y, en este caso particular, se atendió a las exigencias del artículo 11 de la Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional del 2000, al definir que todo levantamiento geodésico o topográfico debe referirse al Sistema Geodésico Nacional, de acuerdo con las normas técnicas establecidas por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar —en adelante, IGBSB—.

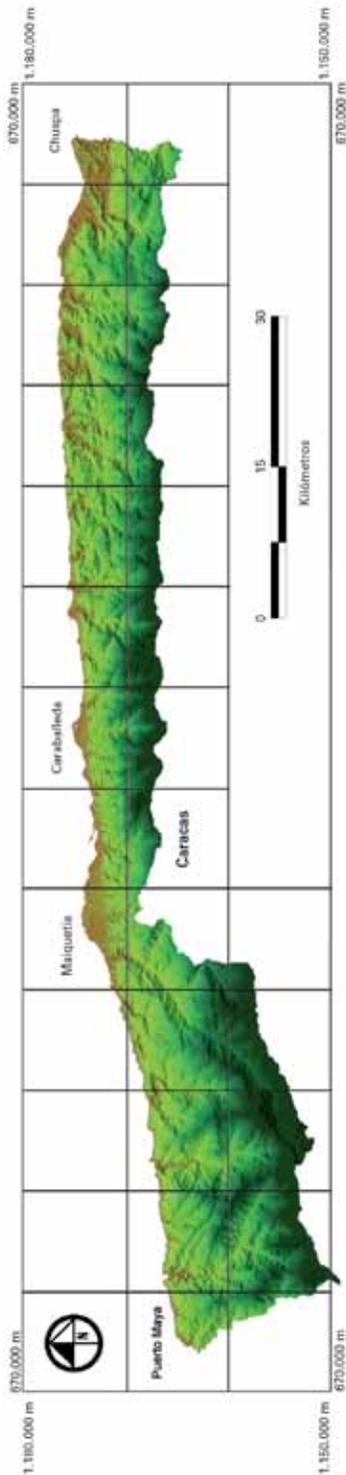


Figura 1. Modelo digital de elevaciones que muestra la distribución espacial de las estaciones climáticas. Datos: Base topográfica del IGBSB 2002. Escala 1:25.000.

De acuerdo con Hernández (2002; 2005) y con Camargo Ribera y Valero (2008), el control geodésico nacional está representado por la Red Geocéntrica Venezolana —en adelante, REGVEN—, establecida por técnicas modernas de medición geodésica satelital —en adelante, GPS—, lo que produjo un cambio en el sistema de referencia, desde el *datum* local convencional La Canoa PSAD 56 a REGVEN, a partir del 1 de abril de 1999. Este cambio se produjo debido a la necesidad, por parte de los usuarios de la tecnología satelital GPS, de disponer de un marco o sistema de referencia moderno, acorde con las exactitudes generadas por el uso continuo y creciente de esta técnica en Venezuela.

De esta forma, el mapa de erosividad climática se obtuvo a través del tratamiento de datos pluviométricos y de temperatura. En tal sentido, para obtener información lo más completa posible sobre la distribución de la precipitación y la agresividad de la lluvia en el macizo Ávila, se llevó a cabo una interpolación superficial de los valores pluviométricos mensuales, y de varias estaciones distribuidas en toda el área de estudio. De este modo se generaron imágenes en formato *raster*, con una resolución espacial de 30 metros. El método de interpolación usado fue *inverse distance weighted* - IDW, según el cual el “peso” de cada estación en un punto determinado disminuye con la distancia frente a los demás. Para obtener el índice de erosividad climática —en adelante, IEC—, se usaron datos de precipitación y evaporación potencial de las estaciones, de acuerdo a los postulados de Fournier-Arnoldus —en adelante, FI— y del índice ombrotérmico de Bagnouls-Gaussen —en adelante, BGI—.

Índice Fournier - FI

El FI, índice Fournier, modificado por Arnoldus, representa la agresividad climática; se obtuvo por la expresión:

$$FI = \sum (pi^2/p); \text{ sumatoria desde } i = 1 \text{ hasta } i = 12;$$

donde,

FI = Índice de Fournier-Arnoldus

pi = Precipitación del mes i (mm)

p = Precipitación anual (mm)

El FI se reclasificó en 5 clases, según la tabla 1.

Índice Bagnouls-Gaussen - BGI

El BGI se calculó a partir del balance de humedad mes a mes, estimando la evapotranspiración a partir de

la temperatura, por lo que constituye una estimación de la aridez climática; se obtuvo aplicando la formulación:

$$BGI = \sum (2ti - pi) ki, \text{ sumatoria desde } i = 1 \text{ hasta } i = 12;$$

donde,

BGI = Índice ombrotérmico de Bagnouls-Gausson

ti = temperatura del mes i (°C)

pi = precipitación del mes i (mm)

ki = porción donde $(2ti - pi) > 0$

El valor de BGI se reclasificó en cuatro clases, según la tabla 2.

Erosividad climática – IEC

Por su parte, el IEC se obtuvo como el producto de FI y BGI, de acuerdo a la expresión:

$$IEC = FI * BGI;$$

donde,

IEC = Índice de erosividad climática

FI = Índice de Fournier-Arnoldus

BGI = Índice ombrotérmico de Bagnouls-Gausson

Este IEC se reclasificó según la tabla 3.

Tabla 1. Reclasificación según el índice modificado de Fournier-Arnoldus.

Índice	Descripción	Valor
1	Muy bajo	< 60
2	Bajo	60-80
3	Moderado	80-100
4	Alto	100-120
5	Muy alto	> 120

Datos: Pacheco 2012.

Tabla 2. Reclasificación según el BGI.

Índice	Descripción	Valor
1	Muy seco	> 130
2	Seco	50-130
3	Moderadamente húmedo	0-50
4	Húmedo	≤ 0

Datos: Pacheco 2012.

Tabla 3. Reclasificación según el IEC.

Índice	Descripción	Valor
1	Bajo	< 4
2	Moderado	4-8
3	Alto	> 8

Datos: Pacheco 2012.

Erosividad del suelo

Se utilizó la metodología propuesta por Almorox (1993), modificada por Rafaelli (2003): el índice de erosividad del suelo —en adelante, IES—; se evalúa considerando la granulometría, profundidad y pedregosidad superficial, que en este caso fue reemplazada por la materia orgánica.

Textura

Para el caso de la textura, esta se determinó por medio del método de Bouyoucos, sobre muestras tomadas en cada una de las unidades litodémicas, obteniendo su clasificación textural a partir del diagrama de textura del USDA; se definieron tres valores de erosionabilidad, según se muestra en la tabla 4.

Profundidad

La profundidad del suelo se establece como la distancia entre la superficie y la base del perfil; fue tomada de los trabajos de Marrero (2008) y Moreno (2008), los cuales la obtuvieron directamente en campo por mediciones sobre los perfiles. Se clasificaron según la tabla 5.

Contenido de materia orgánica del suelo

El método propuesto por Almorox et ál. (1994) plantea la evaluación de la pedregosidad; sin embargo, sobre la base del estudio realizado por Lineros Luenigo (1999), este dato se reemplazará por el contenido de materia orgánica, debido a que la pedregosidad es importante en zonas secas y áridas. Además, la medi-

ción de este parámetro involucra una mayor intensidad de muestreo, elevándose, por tanto, los costos del estudio. Por lo anterior, y de acuerdo a lo señalado en Aguilo et ál. (1992) con respecto a parámetros condicionantes de erosionabilidad del suelo, se determinó incluir el contenido de material orgánico, dado que la materia orgánica fresca está formada por restos de vegetales y de animales de toda naturaleza que se superponen al suelo mineral (sistemas forestales) o que se incorporan a él (tierras de cultivo). Además, la incorporación de materia orgánica mejora la estructura del suelo y, con ello, su permeabilidad y su resistencia a la acción de las gotas de lluvia y al transporte (Camacho López 1994).

El valor del material orgánico se determinó en muestras de terreno tomadas, por unidad litodémica, en los primeros 20 cm de superficie, estas muestras fueron tratadas en el laboratorio, extrayendo su contenido de materia orgánica, y, finalmente, se establecieron rangos de valores, que se presentan en la tabla 6.

El IES se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$IES = CT * CPro * CMO$$

donde,

IES = Índice de erosividad del suelo

CT = Clase textural

CPro = Clase de profundidad

CMO = Clase de materia orgánica

Después de realizado el cálculo, se reclasificó el índice según la tabla 7.

Tabla 4. Reclasificación de la erosionabilidad según textura.

Índice	Descripción	Textura	Donde
1	Ligeramente erosionable	C, SC, ZC	C: Arcillosa SC: Arcilloarenosa ZC: Arcillolimoso SCL: Franco-arcilloarenosa CL: Francoarcillosa ZCL: Francoarcillo-limoso LS: Arenosafranca S: Arenosa L: Franca
2	Moderadamente erosionable	SCL, CL, ZCL, LS, S	ZL: Francolimoso Z: Limosa
3	Altamente erosionable	L, ZL, Z, SL	SL: Franco-arenosa

Datos: Pacheco 2012.

Tabla 5. Reclasificación de la erosionabilidad según la profundidad del suelo.

Índice	Descripción	Profundidad (cm)
1	Ligeramente erosionable	> 75
2	Moderadamente erosionable	25-75
3	Altamente erosionable	< 25

Datos: Pacheco 2012.

Tabla 6. Reclasificación de la erosionabilidad según el contenido de materia orgánica.

Índice	Descripción	Contenido de M. O. (%)
1	Ligeramente erosionable	> 20
2	Moderadamente erosionable	10-20
3	Altamente erosionable	< 10

Datos: Pacheco 2012.

Tabla 7. Reclasificación según el IES.

Índice	Descripción	Valor
1	Bajo	0-3
2	Moderado	3-6
3	Alto	> 6

Datos: Pacheco 2012.

Discusión de resultados

Índice ombrotérmico – BGI

El BGI considera importante la cantidad total y la distribución temporal de la lluvia, así como la influencia de la temperatura —por cuanto, con su aumento, se elevan también las pérdidas de humedad por evapotranspiración, dependiendo la efectividad del índice— para la activación de procesos de remoción masa, de mayor o menor torrencialidad y las características del suelo.

Índice modificado de Fournier – IMF

El IMF calificó las lluvias como de muy alta erosividad porque superaron el valor de 120 —establecido como el límite inferior para este tipo de erosividad— en la estación Colonia Tovar —considerada como representativa en la parte occidental del estado, mientras que, al centro de la entidad, cumplen con esta condición las estaciones de Manzanares, San José, San Francisco, San Isidro, Humboldt y Fila Maestra—. La ubicación altitudinal de estas estaciones parece ser el factor que mejor explica la clasificación de las lluvias como de muy alta erosividad, encontrando que todas ellas presentan altitudes superiores a los 1.000 msnm, en las que el efecto orográfico

de la montaña condiciona la formación abundante de nubes y el incremento en los montos de precipitación.

Por otra parte se encuentran las estaciones de La Sabana y Chuspa, en el sector oriental de Vargas, con un muy alto poder erosivo, por superar el IMF (el valor de 120). Esta condición seguramente es determinada por los elevados montos de precipitación en esta región, influenciada por la situación de Barlovento.

Un factor general que condiciona el comportamiento de estas estaciones, en relación con el IMF, quizás pueda ser explicado debido a la tendencia bimodal que presentan todas las estaciones, siendo originada tal tendencia por el doble paso durante el año de la zona de convergencia intertropical —en adelante, ZCIT—. La activación de la ZCIT genera condiciones de abundante nubosidad y precipitaciones intensas, particularmente de mayo a octubre, produciendo una dinámica muy activa de las lluvias sobre los suelos debido a su alta concentración, la cual le genera un elevado poder erosivo.

El IEC (figura 2), muestra una distribución espacial con los máximos valores concentrados hacia los extremos y al centro del estado Vargas; al oeste se destacan las cuencas de los ríos Chichiriviche, Limón y Maya, influenciadas quizás por el predominio de los altos montos pluviométricos en las estaciones de Petaquire

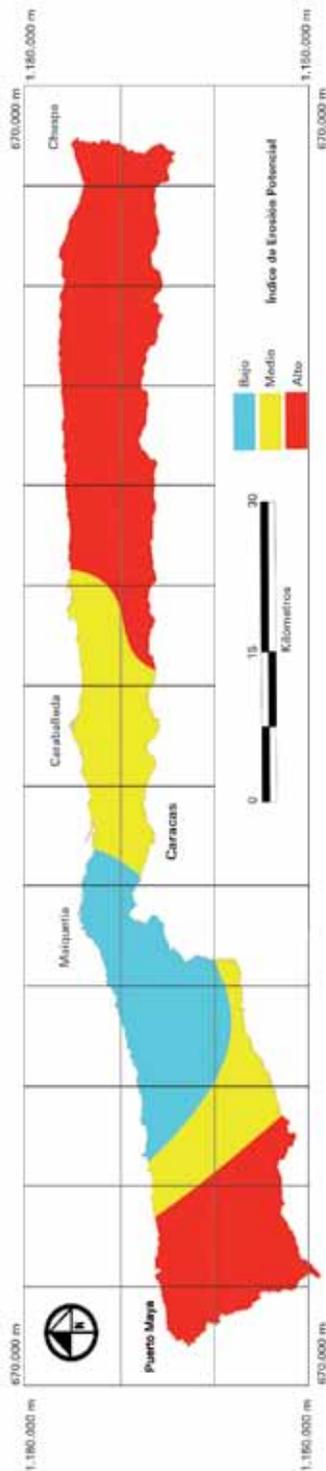


Figura 2. Distribución espacial del índice de erosión potencial en la vertiente norte del Waraiara Repano, estado Vargas, Venezuela. Datos: Tratamiento e interpolación de datos térmicos y pluviométricos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMETH, así como información edáfica tomada de Marrero 2008, y Moreno 2008.

y la Colonia Tovar, consideradas como representativas para esta parte del estado. Por su parte, el alto potencial erosivo de las precipitaciones mostrado en la parte central del estado incluye las cuencas de los ríos Osoorio, Guanape, Cariaco, San José de Galipán, El Cojo, Camurí Chico y San Julián, lo que se explica al observar los elevados montos pluviométricos en las estaciones experimentales ubicadas en la cuenca de San José de Galipán, administradas por el Departamento de Ingeniería Hidrometeorológica de la Universidad Central de Venezuela —en adelante, UCV—.

Óptimo pluviométrico

La variabilidad espacial de las precipitaciones está principalmente determinada por su configuración fisiográfica, constituida por: el tramo central de la cordillera de la costa, orientada casi perpendicularmente con los vientos alisios del noreste, conformando así una barrera que produce el ascenso forzado de las masas de aire, y provocando la existencia de un óptimo pluviográfico, el cual debe ser uno de los rasgos más importantes para la distribución de la precipitación con relación a la altitud. Tal óptimo corresponde a una elevación para la cual la precipitación es máxima entre el nivel base y la cima de la cordillera. La ubicación altitudinal de tal óptimo es muy variable, teniendo en cuenta la variabilidad de la humedad absoluta, del nivel de base del valle y de las circulaciones locales. Un factor principal en la explicación del óptimo pluviométrico es el carácter predominantemente convectivo de las lluvias tropicales (Hastenrath 1991), las zonas bajas reciben menos lluvia porque se benefician en menor medida del ascenso orográfico y porque están afectadas por la evaporación de la lluvia que cae desde la base de las nubes.

Por encima del óptimo pluviográfico, la disminución de la humedad del aire con la altura, a escala global, y de la cantidad de agua precipitable en las nubes convectivas, a escala local, son los dos factores que explican la disminución de la precipitación con la altura en las montañas más altas. La evidencia contundente de este comportamiento en el área de estudio puede observarse en la tabla 5, en la que se presentan los datos de la estación Maiquetía de la Fuerza Aérea Venezolana - FAV, y varias estaciones a distinta altitud, sobre la cuenca de Galipán, instrumentadas y operadas por el departamento de Ingeniería Hidrometeorológica de la UCV.

Tabla 8. Datos de precipitación y altitud para determinar la ubicación del óptimo pluviométrico en la vertiente norte de la cordillera de la costa.

Estación	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)	Pp. (mm)	Gradiente (mm/100m)
Maiquetía	66° 59' 0" W	10° 36' 0" N	43	514	+75,34
Macuto	66° 53' 55" W	10° 35' 47" N	116	818	
San José	66° 54' 04,4" W	10° 34' 34,1" N	908	1.243	
Manzanares	66° 53' 23,7" W	10° 33' 31,9" N	1.495	1.608	-49,85
San Francisco	66° 52' 33,7" W	10° 33' 08,9" N	1.728	1.457	
San Isidro	66° 53' 32,8" W	10° 33' 01,1" N	1.860	1.325	
Humboldt	66° 52' 40,5" W	10° 32' 29,4" N	2.194	1.262	

Datos: Pacheco 2012.

La tabla 8 muestra el incremento de las precipitaciones con la altitud, presentando un máximo de 1.608 mm para la estación Manzanares, a 1.495 msnm, para luego registrar una disminución de los montos de precipitación a medida que se eleva la altura sobre el nivel del mar, con lo cual se puede obtener una aproximación a un gradiente positivo de 75,34 mm de precipitación por cada 100 metros de altura y a uno negativo de -49,85 mm de precipitación por cada 100 metros de altura a partir de los 1.500 metros de altitud. Estos datos permiten afirmar que las precipitaciones registradas en la estación Maiquetía durante diciembre de 1999 deben haber sufrido un incremento progresivo hasta lograr el óptimo pluviométrico, que puede establecerse alrededor de los 1.500 msnm; por consiguiente, los 912 mm reportados en Maiquetía para los días 14, 15 y 16 de diciembre de 1999 pueden convertirse fácilmente en unos 2.000 mm en las altitudes indicadas para el óptimo pluviométrico.

Contenido de materia orgánica

Los bajos valores en el contenido de materia orgánica en el macizo Ávila, reportados por Marrero (2008) y Moreno (2008), están estrechamente relacionados con el tipo de cobertura vegetal presente en el área; así, existe vegetación xerofítica en la parte baja de las cuencas, en el bosque húmedo y muy húmedo tropical y en las partes medias y altas, ubicándose la mayoría de las especies en la categoría siempre verde, y, por tanto, el aporte de materia orgánica vegetal, por efecto de la pérdida estacional de las hojas, es muy pobre en comparación con la gran

cantidad de hojas que pasan a formar parte del suelo anualmente en áreas en donde predomina la cobertura vegetal caducifolia.

El matorral espinoso xerofítico, distribuido fundamentalmente a lo largo de la franja costera comprendida entre Catia La Mar y Punta Colorado, está conformado por especies arbustivas y herbáceas, principalmente espinares, las cuales generalmente exponen una baja altura y una baja densidad de cobertura.

Por su parte, la presencia de bosque siempre verde y de selva nublada en algunos sectores responde a requerimientos bioecológicos particulares, en los que las formaciones vegetales propias de estos ambientes se ubican hacia los tramos montañosos altos del sector este y hacia los tramos montañosos medios y altos del sector oeste, debido a la presencia de mayores niveles de precipitación y de menores niveles de temperatura, que permiten la existencia de un balance hídrico más favorable para el desarrollo de individuos arbóreos y arbustivos de mayor desarrollo.

Textura del suelo

En atención a la textura, el 96% del área se ubica en las categorías de moderada y altamente erosionable (tabla 9); ello se explica revisando los aportes del material parental, ya que los suelos desarrollados a expensas de la litología gnéisica son de textura arenosa, con gran capacidad de infiltración de agua y alta fragilidad mecánica debido a sus elevados contenidos de arena y a la factibilidad de inducir movimientos en masa por saturación de agua.

Tabla 9. Índice de textura del suelo.

Índice	Descripción	Textura	Superficie (km ²)	Superficie (%)
1	Ligeramente erosionable	Arcillo limosa	60,28	5,12
2	Moderadamente erosionable	Franco-arcilloarenosa	1.080	91,76
3	Altamente erosionable	SL: Francoarenosa	36,70	3,12
Total			1.176,98	100,00

Datos: Pacheco 2012.

Tabla 10. Índice de erosividad del suelo.

Índice	Descripción	Rango	Superficie (km ²)	Superficie (%)
1	Bajo	0-3	0	0
2	Moderado	3-6	60,28	5,12
3	Alto	> 6	1.117	94,88
Total			1.177,28	100

Datos: Pacheco 2012.

Erosividad del suelo

Como puede observarse en la tabla 10, el área de estudio presenta un IES con 0% ubicado en la categoría de bajo y un 5% en la categoría moderado; mientras que, más del 94% de la superficie se ubica en la categoría de erosividad alta, lo cual indica la altísima susceptibilidad a la remoción de sedimentos no solo por situaciones extremas, sino que también, en condiciones ambientales perfectamente normales, los cursos de agua transportan una cantidad considerable de material, que en algunas porciones llega al mar para ser redistribuido por el oleaje y las corrientes marinas, mientras que otra cantidad se deposita gradualmente en las partes bajas de la cuenca, formando las geoformas típicas de los piedemontes, como son los abanicos aluviales, que actualmente están en su mayoría ocupados por los desarrollos urbanos e industriales del estado Vargas. Posiblemente uno de los factores que más influyen para condicionar la existencia de estos altos valores de erosionabilidad lo representa el bajo contenido de materia orgánica presente en los suelos, dado que no existen suficientes restos vegetales y animales de variada naturaleza que se su-

perpongan al suelo mineral o se incorporen a él para que pudieran mejorar su estructura; ya que las sustancias húmicas tienen un poder aglomerante, las cuales se unen a la fracción mineral y dan buenos flóculos en el suelo, originando una estructura grumosa estable de elevada porosidad, lo que implica que la permeabilidad del suelo sea mayor, así como su resistencia a la acción de las gotas de lluvia y al transporte —debido a la gran capacidad de retención de agua, lo que facilitaría el asentamiento de la vegetación—, dificultando la acción de los agentes erosivos (Camacho López 1994).

En conclusión, el índice de erosión potencial se muestra en la figura 1, donde destaca el alto valor del índice, distribuido prácticamente en toda el área de estudio. Sin embargo, sobresale la presencia de bajos valores del la erosión potencial en la parte centro occidental del estado, posiblemente condicionado por los bajos montos de precipitación y los altos registros térmicos reportados en la estación Maiquetía, lo cual influye directamente en el IMF y el BGI, generando bajos valores de estos, y por lo tanto, de su influencia combinada para mostrar finalmente una erosión potencial baja en las cuencas de Tacagua y Piedra azul.

Conclusiones

La configuración fisiográfica del área de estudio provoca la existencia de un óptimo pluviométrico alrededor de los 1.500 metros de altitud, tal como se observa en los datos de las siguientes estaciones ubicadas en la cuenca de San José de Galipán: Macuto (altitud 116 msnm, precipitación anual 818 mm), San José (altitud 908 msnm, precipitación anual 1.243 mm), Manzanares (altitud 1.495 msnm, precipitación anual 1.608 mm), San Francisco (altitud 1.728 msnm, precipitación anual 1.457 mm), San Isidro (altitud 1.860 msnm,

precipitación anual 1.325 mm), y Humboldt (altitud 2.194 msnm, precipitación anual 1.262 mm). Los datos muestran la ubicación del óptimo pluviométrico alrededor de los 1.500 msnm, con lo cual puede obtenerse una aproximación a un gradiente altométrico de 75 mm de precipitación por cada 100 metros de altura.

El índice de erosión potencial resultó muy alto en la mayoría del área de estudio, lo cual responde al bajo contenido de materia orgánica y a la ubicación altitudinal, ya que la formación abundante de nubes y el incremento en los montos de precipitación —por el efecto orográfico— generan muy alta erosividad.

Henry Antonio Pacheco Gil

Profesor en Ciencias Naturales. Mención Ciencias de la Tierra del Instituto Pedagógico de Caracas, Universidad Pedagógica Experimental Libertador - UPEL (Venezuela). Magíster en Geografía de la misma universidad. Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. Miembro del programa de Promoción a la Investigación (PEI nivel B) del Fondo Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación - FONACIT. Profesor agregado, adscrito a la Cátedra de Geodesia del Departamento de Ciencias de la Tierra de la UPEL. Tutor de trabajos de grado de pre y posgrado, organizador y ponente en eventos científicos nacionales e internacionales, y autor de diversos trabajos publicados en revistas de circulación nacional e internacional.

Referencias

- Aguilo, Alfonso Miguel, María Paz Aramburu Maqua y Rafael Escibano Bombín. 1992. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. España: Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente - MOPT.
- Almorox Alonso, Javier. 1993. *La erosión hídrica en un ambiente mediterráneo: discusión metodológica y aplicación al término municipal de Alcalá del Valle*. Doctorado ETSI, Escuela de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Almorox Alonso, Javier, Roberto de Antonio García, Antonio Saa Requejo, María Cruz Díaz y José María Gascó Montes. 1994. *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Madrid: Agrícola Española, S. A.
- Arnoldus, H. M. J. 1977. Predicting Soil Losses Due to Sheet and Rill Erosion. En *Guidelines for watershed management: FAO Conservation Guide* n.º 1, 99-123. Italia: FAO Rome; Forest Resources Div.
- Camacho López, Natalio. 1994. Acciones de restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de erosión. Madrid: Mundi-Prensa.
- Camargo, Santana de Jesús, Carmen Femenia Ribera y José Luis Valero. 2008. Situación actual de la red geodésica Venezolana. *Mapping Interactivo: Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*, 124:24-32. ISSN 1131-9100.
- Chiverrell, Richard, G. C. Foster, G. S. P. Thomas y P. Marshall. 2010. Sediment Transmission and Storage: The Implications for Reconstructing Landform Development. *Earth Surface Processes and Landforms* 35 (1): 4-15
- Dunin, Frank X. 1976. Infiltration: Its Simulation for Fields Conditions. *Facets of Hydrology*, ed. J. C. Rodda, 199-227. New York: Willey-Interscience.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1977. *Guía para la descripción de perfiles de suelos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fournier, Frederic. 1960. *Climat et Erosion*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Hastenrath, Stefan. 1991. *Climate Dynamics of the Tropics*. USA: Atmospheric Sciences, Kluwer Academic Publishers.
- Hernández H., José Napoleón. 2002. *Evolución y estado actual del sistema de referencia geocéntrico de Venezuela*. Caracas: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales.
- Hernández H., José Napoleón. 2005. Establecimiento de la red de estaciones de monitoreo y observación satelital GPS (REMOS) en Venezuela. *Revista Análisis geográficos* 30, ed. Jonás Cirilo León Pérez. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar. 2002. *Sistema de referencia geocéntrico de Venezuela*. Caracas, Venezuela.
- Iriarte, A., M. Simón Torres, L. García, E. Barahona e I. Ortiz. 2000. Propiedades hídricas de los suelos de olivar mediante simulación de lluvia. *Edafología: Revista de la Sociedad Española de Ciencia del Suelo* 7 (2): 67-74.
- Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional. 2000. *Gaceta Oficial* n.º 37 (002), 28 de julio del 2000.
- Linerós Luengo, Cristian. 1999. *Evaluación de riesgos de erosión potencial y real a través del modelamiento en Sistemas de Información Geográficos en la cuenca del río Collins*. Pregrado en Ingeniería Forestal, Laboratorio de Planificación Territorial, Universidad Católica de Temuco, Chile.
- Marrero, J. 2008. *La influencia del material parental sobre las propiedades químicas de algunos suelos, originados en el sector de Galipán-Macuto (estado Vargas) Venezuela*. Venezuela: Universidad Pedagógica Experimental Libertador. (inédito)
- Moreno, M. 2008. *La influencia del material parental sobre las propiedades físicas de algunos suelos, originados en el sector de Galipán-Macuto (Estado Vargas) Venezuela*. Venezuela: Universidad Pedagógica Experimental Libertador. (inédito)
- Nel, Werner y Paul D. Sumner, P. 2007. Intensity, Energy and Erosivity Attributes of Rainstorms in the KwaZulu-Natal Drakensberg, South Africa. *South Africa Journal of Science* 103:398-402.
- Nel, Werner y Paul D. Sumner. 2008. Rainfall and Temperature Attributes on the Lesotho-Drakensberg. Escarpment Edge, Southern Africa. *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography* 90 (1) 97-108.
- Nel, Werner, D. Reynhardt y Paul D. Sumner. 2010. Effect of Altitude on Erosive Characteristics of Concurrent Rainfall Events in the Northern KwaZulu-Natal Drakensberg. *Water SA* 36 (4): 509-512.
- Ortiz Villanueva, B. y A. Ortiz-Solorio. 1984. *Edafología*. 4.ª ed. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Pérez, Sandra Janeth. 2001. *Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando Sistemas de Información Geográfica*. Especialización en Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Quinton, Jhon N., R. P. C. Morgan, R. E. Smith, G. Govers, J. W. A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci y D. Tori. 1998. The Eurosem Model: Modelling Soil Erosion by Water. *NATO ASI Series Global Environmental Change*, eds. John Boardman y David Favis-Mortlock, 373-382.

- Rafaelli, S. 2003. *Paisaje erosivo en cuencas de montaña. Modelación con extrapolación espacial ascendente*. Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Richard, L. A. 1952. Report of the Subcommittee on Permeability and Infiltration: Committee on terminology. *Soil Science Society of America* 16:85-88.
- Soares, J., C. Coelho, T. Carvalho, E. Oliveira y S. Valente. 2012. The Use of Rainfall Simulations to Assess Land Se- gradation and Soil Erosion Produced by an SLM Techno-logy, Portugal. *Geophysical Research Abstracts* 14 EGU: 885.
- Wischmeier, Waite H. y Dwight D. Smith. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning* n.º 537. U. S.: Department of agricultura, Agriculture Handbook.