



# Modelos digitales del terreno, variables hidrológicas y movimientos en masa, estado Vargas, Venezuela

*Digital terrain model, hydrological variables and mass movements, Vargas state, Venezuela*

Henry Antonio Pacheco Gil\*

*Universidad Pedagógica Experimental Libertador.*

*Instituto Pedagógico de Caracas. Departamento de Ciencias de la Tierra.*

*Centro de Investigaciones "Estudios del Medio Físico Venezolano".*

Recibido: abril 2012 / Aceptado: junio 2012

## Resumen

La información hidrológica es de fundamental importancia al momento de analizar la amenaza por deslizamientos; en tal sentido el objetivo de este trabajo es generar información hidrológica desde un Modelo Digital del Terreno (MDT). La metodología desarrollada consistió en la rasterización, georreferenciación y vectorización de la información altitudinal a escala 1:25.000. Con la información vectorial se construyó el MDT, usando la aplicación de software para Sistemas de Información Geográfica y modelos hidrológicos, se produjo información como dirección y longitud del flujo y se generó el flujo acumulado, aplicando distintos algoritmos de cálculo que involucran tanto al flujo acumulado como la pendiente del terreno, se determinó variables hidrológicas como Índice Topográfico de Humedad, Índice de la Potencia del Flujo Superficial y el Índice de la Capacidad de Transporte de Sedimentos. Todos estos índices se convierten en capas raster que pueden ser reclasificadas y consideradas, conjuntamente con otras variables, en el algebra de mapas para la producción de cartografía de zonificación de amenazas por deslizamientos, lo cual muestra la utilidad práctica de las Tecnologías de la Información Geográfica en actividades relacionadas con la Gestión de Riesgos y el mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad.

**Palabras claves:** información hidrológica, MDT, estado Vargas, deslizamientos

\*. Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UCV (2011). Magíster en Geografía Mención Geografía Física, FI-UCV (2000). Profesor en Ciencias Naturales Mención Ciencias de la Tierra IPG, Universidad Pedagógica Experimental Libertador (1994). FONACIT PEI Nivel, B. Email: henrypacheco@gmail.com

## Abstract

Hydrological information is the relevant importance when landslides hazards are analyzed, in this sense the objective of this paper is to generate hydrological data from a Digital Terrain Model (DTM). The developed methodology consisted of rasterization, vectorization and georeferencing information altitudinal a scale 1: 25,000. DTM is constructed with vector information, using software applications for Geographical Information Systems and hydrological models, thus information such as address and length of the flow was produced, and also accumulated flow was generated, by applying different calculation algorithms involving both the accumulated flow as the slope of the terrain, hydrological variables was determined as Topographic Moisture Index, Index Water Surface Power and Capacity Index Sediment Transport. All these indices are converted to raster layers that can be reclassified and considered, together with other variables in the algebra of maps for the production of mapping landslide hazard zoning, which shows the practical use of Geographical Information Technology in activities related to risk management and improvement quality of life of society.

**Keywords:** hydrological information, DTM, Vargas state, landslides

## 1. Introducción

De acuerdo con San y Suzen (2005) los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son una herramienta muy valiosa en estudios ambientales con aplicaciones de los Sensores Remotos NASA (2006), excelentes ejemplos de algunas de estas utilidades se encuentran en los trabajos de Svoray y Ben-Said (2010), Scheidl, y Rickenmann (2010) y Wheaton, Brasington, Darby y Sears (2010) donde muestran resultados obtenidos de los MDE así como algunas relaciones empíricas para determinar el coeficiente de movilidad del flujo en función de los parámetros geomorfológicos y otros datos obtenidos por teledetección.

Por otro lado Martínez (1999) plantea que la topografía tiene una notable influencia sobre numerosas variables que intervienen en la formación y dinámica del suelo, en la hidrología, en la vegetación y, en general, en la

dinámica de los ecosistemas, siendo uno de los mayores determinantes de los procesos de erosión y transporte de agua (tanto flujo superficial como subsuperficial) y de materiales, por tanto la mayoría de los modelos que simulan los procesos de movimiento de agua en el suelo, y los derivados de erosión y deposición de materiales, incluyen datos relativos al grado, la forma y la longitud de la pendiente.

La aparición y extensión de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha hecho posible y necesario la aplicación de un proceso, concebido ya a finales de la década de los 1950 (Miller y Laflamme, 1958) para modelizar, analizar y visualizar los fenómenos relacionados con la topografía, o con variables de distribución continua, de una forma numérica y procesable por computadores: los Modelos Digitales de Terreno (MDT), los cuales puede definirse como una representación estadística del terreno, en forma de números digitales, por medio de un conjunto de puntos con coordenadas  $x,y,z$  respecto a un sistema de georeferenciación conocido.

Como es evidente en Singer, Rojas y Lugo (1983) una de las amenazas de mayor incidencia en el territorio venezolano lo representan los procesos de remoción en masa, constituyendo un riesgo geológico de origen natural o inducido, que debe ser ampliamente considerado al momento de la planificación del territorio. Para el estudio de estos procesos existe actualmente una gran variedad de enfoques, representando el análisis espacial de la susceptibilidad un soporte cartográfico de mucha utilidad, de tal manera que la elaboración de mapas y modelos necesarios, y la gestión de estos desde un Sistema de Información Geográfica (SIG) es parte fundamental y previa al análisis espacial propiamente dicho (Van Westen, Rengers y Terelien, 1997). En este trabajo se desarrolla el método heurístico a través del análisis estadístico multivariado, combinando ponderadamente los factores que determinan la inestabilidad de las vertientes; así como los agentes detonantes de los procesos de remoción en masa, para ello se destaca el uso de tecnologías de la información geográfica, o como recientemente se le denomina Geomática.

En este trabajo se genera información topográfica e hidrológica correspondiente a la inclinación y orientación de la pendiente, curvatura del terreno, índice topográfico de humedad, índice de la capacidad de transporte de sedimentos e índice de la potencia del flujo superficial, a través de la un Modelo Digital del Terreno (MDT) generado por interpolación de las curvas de nivel, rasterizadas y vectorizadas a partir del mapa topográfico a escala 1:25.000. Para obtener las variables hidrológicas se proceso el MDT con las aplicaciones de distintos software, obteniendo la dirección y longitud de flujo, el flujo acumulado y el área de aporte específica como los elementos necesarios para aplicar las ecuaciones definidas en cada caso.

## 2. Metodología

### 2.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)

El MDT (figura 1) fue elaborado por interpolación del mapa topográfico nacional de Venezuela a escala 1:25.000, que data de 1979. Este mapa está configurado en hojas rectangulares de 7,5'x5' de arco, con curvas de nivel separadas cada 20 m, generadas por restitución fotogramétrica, el sector de las hojas correspondiente al área de estudio se escaneó, creando una imagen raster que luego fue vectorizada a través de la digitalización directamente en pantalla, creando una capa vectorial de líneas con las curvas de nivel digitalizadas, a partir de las cuales se interpoló el MDT, con la herramienta Topo to raster de ArcGis.

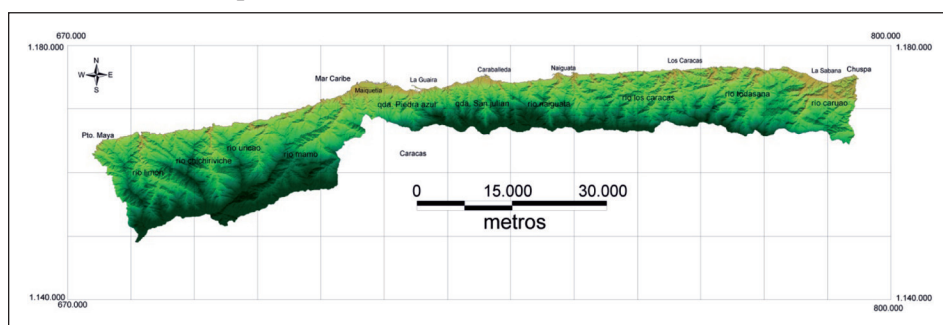


Fig. 1. Modelo digital del terreno, estado Vargas Venezuela

### 2.2. Morfometría local

Para este aspecto se determinaron otras variables relacionadas con el relieve tales como: la orientación de la pendiente, la curvatura vertical (en la dirección de la máxima pendiente), la curvatura horizontal (la perpendicular a la máxima pendiente) y la curvatura general (un valor promedio), a partir del MDT. El método utilizado fue el de ajuste de un polinomio de grado 3 (Olaya, 2006; Abarca y Bernabe, 2008). Las últimas tres (3) capas permiten conocer la concavidad y convexidad del terreno y dan una idea de los procesos de acumulación y denudación, así como el patrón de erosión predominante.

### 2.3. Inclinación de la Pendiente

El mapa se construyó a partir del modelo digital de elevaciones, para la definición de las clases de pendiente se usó el criterio propuesto por la Gobernación del estado Vargas (2005), donde se establecen los diferentes rangos basándose en un análisis morfológico del área de estudio a través de perfiles topográficos. Mediante estos perfiles y considerando

las roturas de pendientes se elaboran histogramas de frecuencia, observándose los rangos más comunes de estas y relacionándolo con el ángulo de fricción interna de la litología que aflora en el sector, para este estudio se definieron los valores y el mapa fue reclasificado en cinco rangos de pendiente.

#### **2.4. Orientación de las Pendientes**

La orientación del terreno se calculó como el ángulo medido en la dirección horaria desde el norte (acimut) donde se produce la máxima pendiente. Calculada a partir del MDT es la dirección donde se produce el máximo grado de cambio en la altitud en cada celda con respecto a sus 8 vecinos. Los valores obtenidos en el mapa de orientaciones resultante fueron reclasificados para asignarle un índice.

#### **2.5. Curvatura del terreno.**

Para este trabajo la curvatura se determinó usando las aplicaciones del software ARCGIS, este programa determina el grado de cambio de la pendiente en el espacio, usando un algoritmo que representa la segunda derivada de la altitud. Una vez obtenida la curvatura, se reclasificaron los valores para obtener el índice.

#### **2.6. Dirección del flujo.**

En este caso se usó la potencialidad del software para determinar la dirección del flujo en cada celda del MDT, para ello se consideró que la dirección que toma el flujo de agua en una superficie es, para cada celda, aquella en la que se produce la máxima pendiente descendente en cada entorno de 3 x 3 celdas. El resultado final es una matriz de direcciones o ángulos respecto al norte, similar a un mapa de orientaciones, que apunta en cada celda a la vecina en la cual se produce la máxima pendiente.

#### **2.7. Flujo Acumulado**

Para el presente estudio, el método que dio mejores resultados fue el *Kinematic Routing Algorithm (KRA)*, que es un modelo unidimensional con flujo libre del agua por todo el MDT. Esta capa se generó, a partir del MDT, para el área total de estudio, empleando la matriz de dirección de flujo, para obtener el número de celdas vecinas, aguas arriba, que fluyen a cada celda.

## 2.8. Área de drenaje específica.

Esta se calculó con las opciones de raster calculator del modulo Spatial Analyst de ARCGIS, usando como fuente de información el MDT en función de la matriz de flujo acumulado, que representa, para cada celda, el número de celdas que drenan allí, y por lo tanto el área de drenaje específica se calculó como:

$$As = \frac{Ac \cdot L^2}{L} \quad \text{ó} \quad As = \frac{Ac \cdot L^2}{\left[ (2L^2)^{\frac{1}{2}} \right]}$$

Siendo:  
 As = Área de drenaje específica  
 Ac = Flujo acumulado (número de celdas)  
 L = Resolución del MDT [m]  
 (Se empleará L ó  $(2L^2)^{1/2}$  dependiendo de si la dirección del flujo es ó no diagonal)

## 2.9. Índice topográfico de humedad

Este índice se calculó como un atributo secundario del MDT y para este estudio se consideró como una adaptación del modelo TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1997). Este modelo calcula la evolución de la zona saturada, como fuente de escorrentía, en base a la topografía de la cuenca y la transmisividad del suelo, para lo cual calcula un índice topográfico o índice de humedad, de acuerdo a la expresión:

$$W = \ln\left(\frac{As}{\tan b}\right)$$

Siendo:  
 W = Índice de humedad  
 As = Área de drenaje específica  
 b = Ángulo de la pendiente local

## 2.10. Índice de la potencia del flujo superficial (*Stream power index*)

Para este caso el índice se expresa como:

$$O = As \cdot \tan b$$

Siendo:  
 O = Índice de la potencia del flujo superficial  
 As = Área de drenaje específica  
 b = Ángulo de la pendiente local

## 2.11. Índice de la capacidad de transporte de sedimentos (*Sediment transport capacity index*)

Se calculó con la expresión:

$$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{\text{Sen } b}{0.0896}\right)^{1.3}$$

Siendo:  
 LS = Índice de la capacidad de transporte de sedimentos  
 As = Área de drenaje específica  
 b = Ángulo de la pendiente local

### 3. Análisis y discusión de resultados

#### 3.1. Índice de pendiente

La distribución de los valores de pendiente según la Tabla I y la Figura 2 muestran que el mayor porcentaje de superficie (cerca del 50%) se corresponde con pendientes moderadas, entre 15° y 25° de inclinación, las cuales se distribuyen mayoritariamente hacia los extremos este y centro occidente del estado Vargas, siendo altamente representativo en las cuencas de los ríos Mamo, Oricao, Picure, La Zorra, Tacagua, Curucutí y Piedra azul en el oeste; así como en las cuencas de los ríos Naiguatá, Camurí Grande, Anare, Los Caracas, Osma, Todasana y Caruao en el extremo oriental del estado. Después continúa la categoría de pendientes bajas, entre 5 y 15 grados, con una cobertura de 24 % con una distribución muy similar a la anteriormente descrita para las pendientes moderadas, evidenciando escasa presencia en la parte central del estado, lo que corresponde a las cuencas ubicadas entre el Aeropuerto de Maiquetía y Naiguata.

En lo que respecta al rango de las pendientes altas, entre 25° y 35° ocupan el 21% de superficie del área estudiada, concentradas en las cuencas de los ríos Piedra Azul, Osorio, Guanape, San José de Galipán, Camurí Chico, San Julián, Cerro Grande, Uría y Naiguatá, justamente donde ocurrieron los movimientos en masa en diciembre de 1999. Adicionalmente, se observa en el mapa la presencia abundante de pendientes altas al oeste del estado, particularmente en las cuencas de los ríos Limón, Chichiriviche y Maya; así como existencia difusa hacia el este.

Por su parte el rango de pendientes bajas, menor a 5° cubre apenas una superficie cercana al 3 %, ubicadas justamente en los terrenos planos, constituidos por los abanicos aluviales que forman los cursos de agua en su llegada al mar, y en algunos fondos de valle sobretudo en la cuenca del río Mamo.

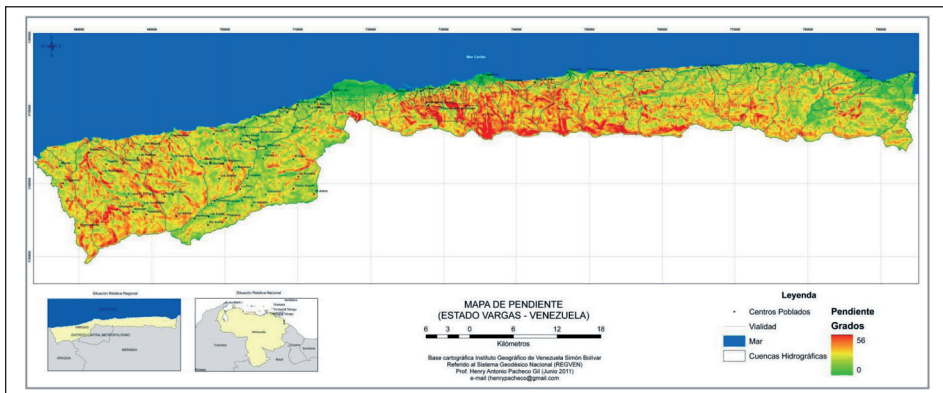


Fig. 2. Distribución espacial de la pendiente del terreno

Tabla I. Superficies según rangos de distribución de pendientes

Índice	Descripción	Rango (°)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)	Superficie Deslizada (Km <sup>2</sup> ) 1999	Superficie Deslizada (%) 1999
1	Muy Bajo	< 5	32,95	2,80	0	0,0
2	Bajo	5 -15	282,9	24,02	2,63	11,8
3	Moderado	15 - 25	583,6	49,54	8,61	38,8
4	Alto	25 - 35	247,6	21,02	9,82	44,2
5	Muy Alto	> 35	30,93	2,63	1,15	5,2
<b>Totales</b>			<b>1177,98</b>	<b>100</b>	<b>21,31</b>	<b>100</b>

Finalmente el rango de pendientes muy alta, mayores a 35°, ocupa una pequeña porción de área que apenas supera el 2% y se encuentran localizadas puntualmente en las vertientes de los ríos como el Limón y Chichriviche, disminuyendo considerablemente su presencia en la cuenca del río Mamo, para reaparecer en la parte alta de la quebrada Tacagua, incrementando significativamente su presencia en las cuencas de los ríos Piedra Azul, Osorio, Guanape, San José de Galipán, Camurí Chico, San Julián, Cerro Grande, Uría y Naiguatá, encontrándose no solo en las vertientes sino también en las cercanías de fila divisoria de aguas entre la vertiente norte y sur del macizo Ávila. Es importante destacar que esta distribución de pendientes explica bastante claro la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, lo cual se evidencia con el evento flujo torrencial de 1999 cuando el 44 % de los movimientos en masa ocurrió sobre el área con pendientes altas y el 38% en sectores con pendientes moderadas, mientras que las zonas con pendientes bajas recibieron el 11% de los fenómenos de remoción en masa; este porcentaje puede explicarse por la remoción de materiales que seguramente se presentó en los lechos de los ríos.

Derivado de esta condición geomorfológica específica, los procesos morfodinámicos dominantes se encuentran asociados a fenómenos de denudación, tanto por efectos de erosión laminar y concentrada, como por efectos de movimientos en masa, correspondientes principalmente a los deslizamientos laminares, deslizamientos rotacionales, desprendimientos, reptación y solifluxión.

Por su parte, pero en menor proporción superficial, se encuentran dentro del área de estudio unidades correspondientes a paisajes de piedemonte y valles, donde las características fundamentales son las relativas bajas pendientes y la predominancia de procesos de acumulación sedimenta-

ria, que se encuentra restringida a posiciones intramontanas de poca amplitud, circundadas por laderas montañosas de alta inclinación.

Desde el punto de vista morfodinámico, tanto las unidades de piedemonte como de valle, a pesar de que no están expuestas a intensos flujos de erosión concentrada y laminar o a movimientos en masa de gran magnitud, se encuentran sometidas a frecuentes procesos de inundaciones, caracterizados por flujos torrenciales, que eventualmente han afectado y pueden afectar la estabilidad de las estructuras antrópicas ubicadas al margen de los cursos fluviales.

### **3.2. Índice topográfico de humedad**

Conocer la distribución espacial de la humedad del suelo es de gran importancia para los estudios de hidrología, especialmente para los trabajos centrados en la zona no saturada y en la superficie del terreno. La mayor parte de los investigadores coinciden en considerar el relieve como un factor de gran valor explicativo para determinar los patrones de humedad del suelo, dando lugar al desarrollo de índices o métodos que ponen en relación las formas del terreno con propiedades del suelo. Las zonas tendentes a acumular mayor cantidad de agua con menor energía serán zonas con mayor probabilidad de tener altos contenidos de humedad. Similarmente, las zonas donde el agua diverge y el terreno le imprime aceleración serán zonas con menor probabilidad de acumular humedad. Tal como reporta Cereceda (2006), el índice topográfico de humedad, es una función del área de contribución y refleja por tanto la cantidad de agua que convergerá en un punto determinado y la pendiente del terreno que sería expresión de la cantidad de movimiento del agua en ese punto.

Para la vertiente norte del macizo Ávila, los resultados de la Figura 3, y la Tabla II muestran consistencia con los planteamientos teóricos, por cuanto el contenido de humedad del suelo varía de acuerdo a la topografía de la zona, la vegetación y el clima; así, cuanto más grande es el área expuesta a las lluvias y menor su inclinación, la humedad incrementa; en este caso particular los máximos valores del Índice topográfico de humedad se corresponden con las áreas de menor pendiente que se distribuyen espacialmente en las adyacencias del fondo de los valles fluviales y en los abanicos aluviales, así se observa claramente estos máximos valores con una distribución mayoritaria hacia el Oeste del puerto de la Guaira, específicamente las cuencas de las quebradas Tacagua y Mamo, donde la coloración azul, indicativa de alta humedad, prácticamente sigue el recorrido de los cursos mencionados.

Tabla II. Distribución del Índice Topográfico de Humedad

Índice	Descripción	Rango (adimensional)	Superficie (Ha)	Superficie (%)
1	Muy bajo	5 - 8	530,65	91,63
2	Bajo	8 - 11	38,43	6,64
3	Moderado	11 - 14	8,47	1,46
4	Alto	14 - 17	1,6	0,28
5	Muy Alto	> 17	0,24	0,04
<b>Total</b>				<b>100</b>

Esta circunstancia se explica por la mayor cantidad de flujo acumulado en estas cuencas, determinado por la mayor magnitud del área específica aportante, ya que estas cuencas cubren una superficie mucho mayor que las cuencas ubicadas al este del estado.

Por otra parte los valores más bajos del índice topográfico de humedad se distribuyen en la fila divisoria de aguas de la vertiente norte y sur del Wuaraira Repano, así como las divisorias intercuenas y las vertientes inclinadas adyacentes a los cursos de agua.

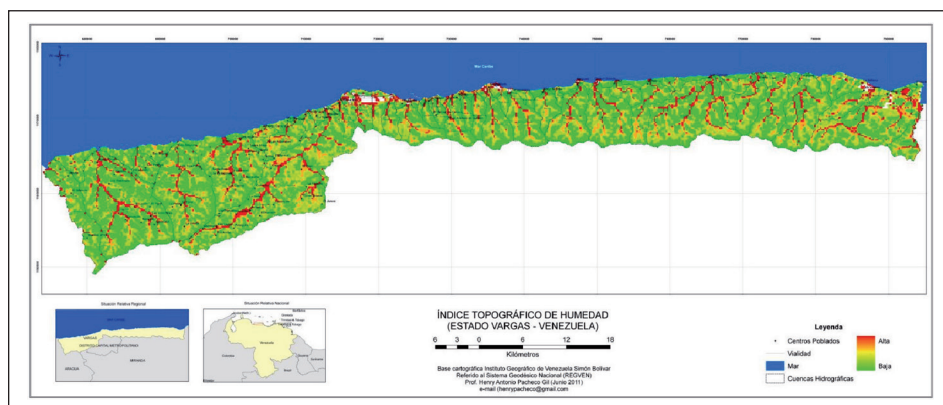


Fig. 3. Distribución espacial del Índice topográfico de humedad

### 3.3. Índice de la potencia del flujo superficial

Precisamente la potencia del flujo es la que produce la capacidad para mover las partículas, o sea, para erosionar. Esta potencia es constante en el tiempo, es decir, no se pierde, aunque la erosión si se detiene. Lo que sucede es que, a pesar de que la potencia es la misma, la cantidad de masa

que tiene que movilizar en cada momento va aumentando con el paso del tiempo debido al aumento de la erosión y por lo tanto del volumen. Esto es lo que provoca la disminución de la velocidad de erosión hasta llegar a cero. Así Morgan (1996) expresa que la efectividad del flujo superficial como agente erosivo depende de su extensión espacial y de su distribución sobre la ladera. Cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del suelo se produce un flujo mínimo en la parte superior de la ladera donde no es posible la presencia de procesos erosivos, cuando se acumula suficiente agua para que comience el flujo, moviéndose pendiente abajo, la profundidad del flujo aumenta con la distancia a la cima hasta concentrarse en los cauces ocupando menor espacio en la cuenca, en principio la erosión se focaliza para después mostrar un patrón alternativo de arrastre y dispersión de sedimentos.

Existe una relación entre la potencia del flujo superficial con las zonas desprovistas de vegetación o áreas de cultivo: en las zonas bien provistas de vegetación los valores muestran baja potencia de flujo superficial mientras que en suelos desnudos se incrementan considerablemente los valores. Lo anterior se explica claramente al considerar que en los bosque tropicales, donde son frecuentes intensidades altas de precipitación, la conductividad del suelo se torna baja desarrollando una lamina de agua que se convierte en flujo superficial que al combinarse con la acción erosiva de las gotas de lluvia genera este tipo de erosión dominante en la parte alta y media de las cuencas, donde se producen los materiales que serán depositados en las partes bajas conformando los abanicos aluviales y coluviales.

La Figura 4 muestra claramente como los más altos valores de la Potencia del flujo superficial se concentran casi exclusivamente en los fondos de valle de los cursos de agua, lo cual es perfectamente consistente con la teoría, por cuanto los fondos de valle representan donde se acumula mayor cantidad de agua y por lo tanto incrementa su potencial. La Tabla III refleja el escasísimo porcentaje de superficie con muy baja potencia del flujo superficial, y un 23 % del área de estudio aproximadamente reflejan un índice bajo, por su parte el 47 % de superficie presenta una moderada potencia del flujo.

También agrupa en esta categoría de moderada la mayor cantidad de área, lo cual puede explicarse por la heterogeneidad del paisaje, el cual está constituido por vertientes concavas, convexas y onduladas, así como fondos de valle y filas montañosas que se comportan diferencialmente ante los procesos erosivos y sedimentarios.

Es importante combinar esta capa con la cobertura vegetal, atendiendo al criterio de Dussailant (2006), quien afirma que la vegetación reduce la

potencia del flujo efectiva, al minimizar la velocidad por la rugosidad y proteger la capa depositada.

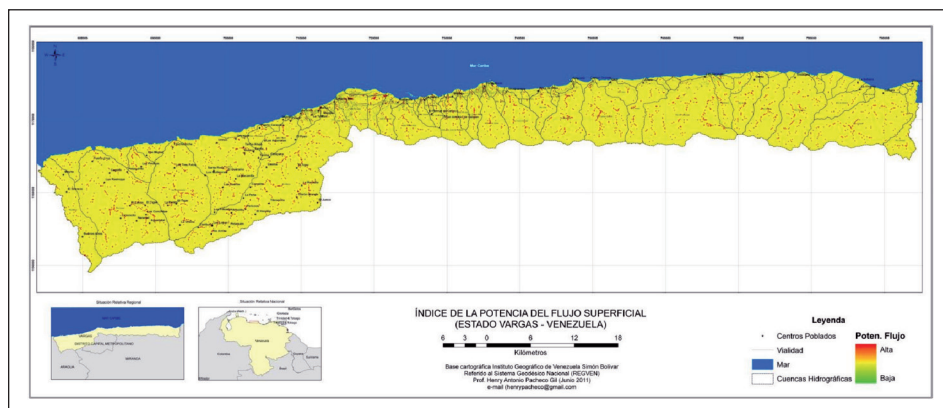


Fig. 4. Distribución Espacial del índice de la potencia del flujo superficial

Tabla III. Rangos de distribución del índice de la potencia del flujo superficial

Índice	Descripción	Rango	Superficie (Ha)	Superficie (%)
1	Muy bajo	-6,56 – -4,59	0,04	0,003
2	Bajo	-4,59 – -0,64	291,29	24,85
3	Moderado	-0,64 – 0,5	557,47	47,56
4	Alto	0,5 – 3,30	27,89	2,38
5	Muy Alto	3,30 – 3,55	295,56	25,21
<b>Totales</b>			<b>1.172,25</b>	<b>100,00</b>

### 3.4. Índice de la capacidad de transporte de sedimentos

Es un índice utilizado para estimar el potencial topográfico para la erosión o deposición por medio de una expresión que representa el cambio en la capacidad de transporte de sedimentos en la dirección del flujo.

La Figura 5 muestra la distribución de los valores más altos del índice, coincidiendo en forma bastante aproximada al área de influencia de los cursos de agua, lo cual se ajusta bastante bien a la teoría por cuanto según, Montoya y Montoya (2005), los ríos constituyen el principal agente de transporte de sedimentos. El agua, además de ser agente activo en la erosión de los suelos, constituye un factor importante en el transporte de sedimentos, pues son los ríos componentes importantes en la conformación del paisaje, ya que desencadenan la erosión en los lechos y en algunos

casos en los valles, comportándose como un excelente medio de transporte, pudiendo desplazar grandes cantidades de materiales por distancias considerables.

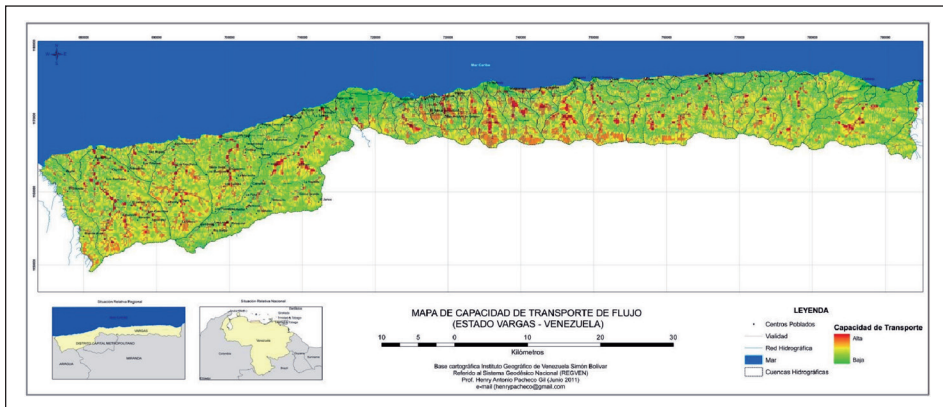


Fig. 5. Distribución espacial del índice de capacidad de transporte de sedimentos

De acuerdo a la Tabla IV, podemos observar que más del 98% del área de estudio se reporta con una muy baja capacidad de transporte, lo cual coincide espacialmente con las regiones de vertientes y filas montañosas, en donde la concavidad del perfil topográfico condiciona la presencia de un mayor potencial para la deposición y por tanto poca capacidad de transporte, el resto del área que ocupa menos del 2%, presenta una capacidad de transporte entre moderada y muy alta y coincide espacialmente con los fondos de valle por donde obviamente fluyen las aguas de escorrentía, incrementando su capacidad de transporte, según lo indicado.

De tal manera, que la capacidad de una corriente para el transporte de sedimentos refleja información sobre las características hidráulicas, geomorfológicas y granulométricas del cauce. La pendiente juega un papel muy importante para los caudales de magnitud catastrófica o para crecidas de baja frecuencia que superan ampliamente la condición crítica de inicio de movimiento de las partículas.

Este Índice representa la capacidad potencial de transporte de sedimentos en los distintos sectores de las cuencas, por consiguiente si no hay sedimentos disponibles para el flujo el transporte real será inferior a la capacidad obtenida. Los sedimentos formados a partir de la erosión laminar y movimientos de masas, son conducidos a los cursos de agua, donde tiene lugar la escorrentía en un medio físico en forma de canal, responsable de la segunda fase del proceso de transporte de sedimentos. En este sector, el escurrimiento se desarrolla de manera concentrada, con

capacidad suficiente para la conducción de los sedimentos. Dependiendo de las condiciones geotécnicas de los suelos, principalmente de su capacidad de resistencia a las tensiones de corte, los pequeños canales naturales se profundizarán gradualmente.

**Tabla IV.** Rangos de distribución del índice de capacidad de transporte de sedimentos

Índice	Descripción	Rango	Superficie (Ha)	Superficie (%)
1	Muy bajo	0 - 595,21	530,65	91,63
2	Bajo	595,21- 2380,86	38,43	6,64
3	Moderado	2380,86 – 5555,36	8,47	1,46
4	Alto	5555,36 -10713,91	1,6	0,28
5	Muy Alto	10713,91 -25395,94	0,24	0,04
<b>Totales</b>			<b>579,15</b>	<b>100,04</b>

En estos cursos naturales, incluidas las cárcavas, quebradas y torrentes, el flujo adquiere capacidad suficiente para transportar hacia aguas abajo los sedimentos y fuerzas de corte que en muchos casos superan las fuerzas resistentes de los taludes, presentándose la erosión por acción del escurrimiento. Durante este proceso se debilita la base de los taludes, que dará lugar al desmoronamiento de las riberas; incrementado la carga de sedimentos sobre los cursos de agua, tal como ocurrió en algunos ríos de Vargas en diciembre de 1999 donde los procesos de erosión vertical y lateral, en los canales, afectaron gran parte de la infraestructura ubicada en las llanuras de inundación y los abanicos aluviales, siendo el caso de Carmen de Uría uno de los más representativos.

Adicionalmente, es importante considerar que los procesos de transporte de sedimentos suelen no ser continuos en el tiempo y en el espacio, usualmente se intercalan periodos de transporte o arrastre y de sedimentación-almacenamiento a intervalos irregulares.

Considerando los datos suministrados por el algoritmo de cálculo, puede observarse que los valores son un tanto superiores a los reportados por Moore y Wilson, (1993), lo cual puede ser justificado por corresponder, las cuencas estudiadas, a regiones montañosas tropicales de alta pendiente y pluviosidad con grandes variaciones topográficas, indicando que el clima y el relieve influyen fuertemente en el proceso de erosión. Para el caso contrario donde los cálculos muestran los valores más bajos del Índice de transporte de sedimentos, coinciden con las zonas bajas de menores montos pluviométricos anuales y pendientes poco inclinadas lo cual obvia-

mente favorece los procesos de sedimentación. Es importante aclarar que son varios los factores que intervienen en la producción de sedimentos, tales como: el uso del suelo, la geología, el relieve y eventos meteorológicos extraordinarios, (Montoya y Montoya, Ob. Cit.)

Atendiendo a los planteamientos de Castillo y otros (2009), al conjugar la capacidad de transporte de sedimentos con zonas potencialmente erosionables, puede explicarse la existencia de flujos hiperconcentrados, como los que afectaron algunas cuencas del Estado Vargas en diciembre de 1999, con capacidad para movilizar grandes bloques de roca de más de 50 toneladas de peso, con un gran poder destructivo, donde la presencia de grandes cantidades de partículas de sedimentos es de tal magnitud que influye notablemente en la mezcla, cambiando las propiedades del fluido y el comportamiento del flujo.

Considerando los flujos hiperconcentrados reportados para Vargas en 1999, pueden clasificarse en tres tipos: inundaciones o crecidas de barro (mud floods), flujos de barro (mudflows) y flujos de detritos (debris flows). Se diferencian entre sí en los procesos físicos involucrados en cada uno de ellos, que son función de la reología de la mezcla agua-sedimento. El volumen y las propiedades de la matriz del fluido (mezcla agua-sedimento) gobiernan la hidráulica del flujo, su desplazamiento y la deposición de los sedimentos. Las propiedades dependen de la concentración de sedimentos, de la distribución granulométrica y del contenido de arcillas (Brea y Spalletti, 2003).

Las inundaciones o crecidas de barro son típicamente hiperconcentraciones de partículas no cohesivas, que presentan un comportamiento muy fluido para un rango de concentraciones de sedimento.

Los flujos de barro, por su parte, se caracterizan por una concentración de limos y arcillas, lo suficientemente alta como para cambiar las propiedades de la matriz del fluido, favoreciendo el transporte de grandes tamaños de material. De este modo, los flujos de barro se comportan como una masa fluida muy viscosa, que a altas concentraciones es capaz de transportar en superficie rocas de gran tamaño. Los flujos de barro presentan altas viscosidades, pudiendo viajar grandes distancias en pendientes moderadas a bajas velocidades, para depositarse en forma lobular en los abanicos aluviales.

Los flujos de detritos se componen de una mezcla de materiales clásticos, incluyendo grandes piedras, troncos, etc., donde la colisión lubricada entre las partículas es el mecanismo dominante de disipación de energía.

Debe destacarse la importancia del estudio de este tipo de flujos, ya que a criterio de Genatios y Lafuente (2003) La noche del 15 al 16 de diciembre de 1999, las lluvias originaron la transformación de pequeños riachuelos

de verano en ríos inmensos que bajaron de las montañas. El efecto de pendientes mayores a 30°, una vez saturados los suelos por la acumulación de las precipitaciones, generaron numerosos movimientos de masa y progresivamente produjeron erosión, desprendimiento de la capa vegetal, arrastre de sedimentos y formación de flujos de lodo, materiales vegetales y troncos en un flujo que fue aumentando en densidad por la mezcla con material fino, hasta ser capaz de levantar rocas de gran magnitud, desplazándolas grandes distancias. Los flujos fueron de densidades y características muy variadas, desde flujos de agua, de ocurrencia anual, hasta flujos hiperconcentrados y de detritos. Este proceso destruyó edificaciones y todo tipo de infraestructura, produjo pérdida de la capa vegetal en zonas montañosas, alteró historias locales, cambió la geografía, desapareció playas y modificó el frente costero y produjo severos daños en asentamientos urbanos, generó muerte y desolación en el Estado Vargas y un profundo pesar en el pueblo venezolano, ensombreciendo la celebración de la navidad del año 1999 y la llegada del nuevo milenio.

#### 4. Conclusiones

La gran proliferación de sensores espaciales y aéreos de teledetección, así como de softwares especializados para Sistemas de Información Geográfica, unido a la constante mejora en sus aplicaciones y al progreso de las técnicas de análisis, hace que la geomática se esté convirtiendo progresivamente en un importante complemento de las técnicas geotécnicas, geodésicas, geofísicas y de fotointerpretación en el análisis hidrológico de áreas extensas. Así se desprende de esta investigación al generar capas temáticas de gran influencia en la génesis de fenómenos de remoción en masa, donde destacan elementos topográficos e hidrológicos.

La distribución de los valores de pendiente muestra que el mayor porcentaje de superficie (cerca del 50%) se corresponde con pendientes moderadas, entre 15 y 25 grados de inclinación, las cuales se distribuyen mayoritariamente hacia los extremos este y centro occidente del estado Vargas. Después continúa la categoría de pendientes bajas, entre 5 y 15 grados, con una cobertura de 24 %, mientras que el rango de las pendientes altas, entre 25 y 35 grados, ocupan el 21% de superficie del área estudiada. Finalmente se presentan los rangos de pendientes muy bajas y muy altas con 3 y 2 % respectivamente de cobertura para el área de estudio.

Finalmente cabe indicar que la amplia difusión actual de los SIG ha mejorado muy profundamente las técnicas de análisis y las capacidades de los mapas, de manera que ahora como nunca hay todo un abanico de opciones contrastadas disponibles. Al mismo tiempo los SIG también han permitido una progresiva sofisticación de los métodos y, en cierto modo,

los cada vez más complejos requerimientos del tratamiento de los datos en el SIG y el software complementario, podrían postergar prioridades básicas de la investigación, como son los conocimientos básicos de geología, geomorfología, hidrología e hidrogeología, mecánica de suelos y mecánica de rocas, para afrontar correctamente la investigación de las zonas inestables y trasladar al computador datos rigurosos y fiables. Todo ello en un campo de investigación que requiere grandes dosis de experiencia práctica acumulada, para minimizar las posibles causas de error en las cartografías resultantes.

Es altamente recomendable el uso de la información generada en este trabajo por parte de entes gubernamentales y no gubernamentales relacionados con la ordenación y uso del territorio, para la planificación y ejecución de actividades orientadas a la reducción de riesgos y el consiguiente mejoramiento de la calidad de vida de la población.

Igualmente se recomienda continuar desarrollando investigaciones relacionadas con la aplicación de las tecnologías de la información geográfica en los estudios hidrológicos, con el objeto de validar metodologías aplicables a todo el territorio Venezolano, a los fines de generar cartografía actualizada y detallada, útil en la toma de decisiones relacionadas con el aprovechamiento de los recursos y la ordenación del territorio, para el desarrollo de actividades cónsonas con las características geoambientales de los ecosistemas.

### **Referencias Bibliográficas**

- ABARCA, O. Y BERNABÉ M. (2008) Desarrollo metodológico para la simulación hidrológica de caudales de estiaje con el SIG SEXTANTE. MAPPING INTERACTIVO. Revista Internacional de Ciencias de La Tierra.
- BEVEN, K.; KIRKBY, M. (1979) TOPMODEL User Notes. Windows Version 97.01 [en línea]. [Citado 8 de noviembre de 2007]. Lancaster University, UK. Disponible en: <[http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg\\_freeware\\_top.htm](http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_top.htm)>.
- BREA, J. Y SPALLETTI, P. (2003) Flujos densos e hidráulica de ríos. Primer Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos. Instituto Nacional del Agua. Argentina
- CASTILLO, L., MARTÍN., MARÍN, D. (2009) Coeficiente de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas. I Jornadas de Ingeniería del Agua. Capítulo Español Asocia-

- ción Internacional Ingeniería e Investigación Hidraulica – CEDX. Madrid
- CERECEDA, I. (2006) Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos. Compendio de Trabajos de Investigación CNDG – Biblioteca. Instituto Geofísico del Perú. V. 7 (2006) p. 191 – 202
- DUSSAILLANT, A. (2006) Submodelo de erosión en laderas para modelo precipitación escorrentía en SIG. Climate Variabilidad y Change – Hydrological Impacts. Proceedings of the fifth FRIEND World Conference. La Habana, Cuba.
- GENATIOS, C. Y LAFUENTE, M. (2003) Lluvias torrenciales en Vargas, Venezuela, en diciembre de 1999: Protección ambiental y recuperación urbana. *IMME*. [online]. nov. 2003, vol.41, no.2-3 Disponible. [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0376-723X2003000200004&lng](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2003000200004&lng)
- GOBERNACIÓN DEL ESTADO VARGAS (2005) Plan de ordenación del territorio del estado Vargas. Documento técnico.
- MARTÍNEZ, J. (1999) Modelos digitales de terreno: Estructuras de datos y aplicaciones en análisis de formas del terreno y en edafología. Universitat de Lleida. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Quaderns dmacs núm. 25.
- MILLER, L. Y LAFRAMME, A. (1958) The digital terrain model – theory and application. *Photogrammetric Engineering*, 24: 433-442.
- MONTOYA, L. Y MONTOYA R. (2005) Transporte de sedimentos en las corrientes del Departamento de Antioquia. *Revista de Ingenierías*. Universidad de Medellín. Año/vol. 4, número 007. Pp. 101-109
- MOORE, I. Y WILSON, J. (1993) Length-Slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47: 423-428.
- MORGAN, R. (1996) *Erosión y Conservación del Suelo*. Ediciones Mundiprensa. Madrid.
- NASA (2006) The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Información en Línea: Disponible: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Consulta Abril, 2009.
- OLAYA, V. (2006): Fundamentos de Análisis Geográfico con SEXTANTE [en línea]. [Citado 9 de mayo de 2007]. Disponible en: <http://campusvirtual.unex.es/cal/cal/course/view.php?id=146>

- SAN, B. Y SUZEN, M. (2005) Digital elevation model (DEM) generation and accuracy assessment from ASTER stereo data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol, 26, N°. 22, November. 5013-5027.
- SCHEIDL, CH. Y RICKENMANN D. (2010) Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Earth Surface Processes and Landforms*. Volume 35 Issue 2, Pages 157 - 173
- SINGER, A., ROJAS, C. Y LUGO M. (1983) Inventario nacional de riesgos geológicos: Estado preliminar, mapa, Glosario y comentarios. Caracas, Venezuela: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Departamento de Ciencias de La Tierra.
- SVORAY, T. Y BEN-SAID S. (2010) Soil loss, water ponding and sediment deposition variations as a consequence of rainfall intensity and land use: a multi-criteria analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*. Volume 35 Issue 2, Pages 202 - 216
- VAN WESTEN, C.J., RENGERS, N. & TERELIEN, J. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geol. Rundschau*, 86, 404-414.
- WHEATON, J., BRASINGTON, J., DARBY, S. Y SEAR, D. (2010) Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*. Volume 35 Issue 2, Pages 136 - 156



Universidad de Los Andes-Táchira, Venezuela  
 Coordinación de Estudios de Postgrado  
 Maestría en Educación, Mención Enseñanza de la Geografía  
 Consejo de Desarrollo, Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT)

**Volumen 15 2010 (1)**  
**enero - junio**

## Contenido / Contents

### Editorial

- |   |       |
|---|-------|
| <b>Investigación y proceso de enseñanza en geografía</b><br><i>Research and teaching process in geography</i> | 3 - 4 |
| Heriberto Gómez   |       |

### Artículos

- |   |         |
|---|---------|
| <b>Implicancias de la violencia escolar en el proceso enseñanza-aprendizaje</b><br><i>Implications of school violence in the process of teaching-learning</i>   | 5 - 20  |
| Ortiz Duarte, Emilio Fernando, Silva Escares y Francisco Javier   |         |
| <b>Opciones y trayectoria de la investigación en geografía y en enseñanza geográfica sobre la ciudad</b><br><i>Options and developments of researching in geography and geographic teaching about the city</i>  | 21 - 33 |
| Luis Alberto Paradas Pérez  |         |
| <b>Contribución al estudio de las Sabanas de Venezuela</b><br><i>Contribution to the study of savannas in Venezuela</i>   | 35 - 48 |
| Argenis Montilla Pacheco  |         |
| <b>Modelos de desarrollo y organización del espacio en Venezuela</b><br><i>Model development and organization of space in Venezuela</i>   | 49 - 63 |
| José Armando Santiago Garnica   |         |
| <b>La educación ambiental, la malaria y la acción medico-sanitaria de</b><br><b>Arnoldo Gabaldón.</b><br><i>Environmental education, malaria and medical-health action of Arnoldo Gabaldón.</i>                 | 65 - 74 |
| Héctor Augusto Maldonado Delgado  |         |
| <b>Reducción de Bosques. Caso: Margen Derecha de la Cuenca del Río Torbes. Edo. Táchira. Venezuela.</b><br><i>Reduction of forest case: the right margin of Torbes river basin. State of Táchira. Venezuela</i> | 75 - 96 |
| Zahylis Zambrano, Julio González, Fernando Guerra y Heriberto Gómez   |         |

### Notas y documentos

- |  |          |
|--|----------|
| <b>Teoría, praxis e ideología en el docente de geografía.</b><br><i>Theory, praxis and ideology in the teaching of geography</i> | 97 - 102 |
| Bernardina Zapata Rodríguez  |          |

### Reseñas

- |  |           |
|--|-----------|
| <b>Consejos Comunales</b><br><i>Community Councils</i> | 103 - 106 |
| Guido Bertí  |           |