

Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Programa de Docencia e Investigación en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad Nacional de Luján, Argentina. <http://www.gesig-proeg.com.ar> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 6, Número 6, 2014, Sección I: Artículos. pp. 19-36

CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL RELIEVE DE URUGUAYO BASADA EN MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN Y TÉCNICAS GEOMORFOMÉTRICAS

Ricardo Michael Pinheiro Silveira

Universidade Federal do Paraná (Curitiba, Brasil)

Departamento de Geografia / LAGEO

E-mail: ricardomichael@ufpr.br

Claudinei Taborda da Silveira

Universidade Federal do Paraná (Curitiba, Brasil)

Departamento de Geografia / LAGEO

E-mail: claudineits@ufpr.br

Resumen

Bajo la perspectiva del Análisis Digital del Terreno y del empleo de técnicas geomorfométricas en ambiente de Sistemas de Información Geográfica, el presente trabajo tiene como objetivo aplicar una propuesta de clasificación morfológica basada en el Índice de Posición Topográfica (IPT), que mensura la diferencia de elevación en relación a su vecindad, para todo el territorio del Uruguay. Fueron testados tres Modelos Digitales de Elevación (MDEs): MDE Topogrid, MDE SRTM y Aster GDEM, con el cálculo de dos atributos topográficos adicionales: pendiente y acumulación de flujo. La clasificación resultante, pautada en combinación de atributos y parámetros cuantitativos, identificó siete unidades morfológicas que representan niveles de disecación y sectores de vertiente. Los resultados destacan la potencialidad de aplicación del modelaje para levantamientos preliminares y mapeo morfológico automatizado, con bajo costo y aplicación para diversas finalidades, y también la importancia del rigor metodológico y evaluación de los errores y limitaciones de los modelos y de los parámetros adoptados en productos derivados.

Palabras-clave: Geomorfometría; Análisis Digital del Terreno; MDE; Formas de relieve; Mapa geomorfológico.

MORPHOLOGICAL CLASSIFICATION OF TERRAIN OF URUGUAY BASED ON DIGITAL ELEVATION MODELS AND GEOMORPHOMETRIC TECHNIQUES

Abstract

From the perspective of Digital Terrain Analysis and employment of geomorphometric techniques in Geographic Information Systems environment, this paper aims to apply a proposed morphological classification based on Topographic Position Index (TPI), which measures the difference in elevation between a central point in relation to its neighborhood, for the whole territory of Uruguay. Three digital elevation models (DEMs) were tested: DEM Topogrid, DEM SRTM and Aster GDEM, with calculation of two additional topographic attributes: slope and flow accumulation. The resulting classification, based on the combination of attributes and quantitative parameters, identified seven morphological units that represent levels of dissection and slope sectors. The results highlight the potential application of modeling for preliminary surveys y automated morphological mapping, with low cost and application for various purposes, and also the importance of methodological rigor and assessment of errors and limitations of models and parameters adopted in derivatives products.

Keywords: Geomorphometry; Digital Terrain Analysis; DEM; Landform; Geomorphological mapping.

INTRODUCCIÓN

Análisis digital del terreno

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) en las últimas décadas, asociado al incremento de la informática e y de la capacidad cada vez mayor de procesamiento de datos en *softwares* de geoprocésamiento, subsidia la aplicación de modelos cuantitativos a los estudios geomorfológicos que posibilitan la inclusión de inúmeras variables simultáneamente con reducción del tiempo de procesamiento y visan la reducción de la subjetividad en los procesos de clasificación y delimitación cartográfica de unidades homogéneas de relieve.

La geomorfometría — cuyo término fue presentado primeramente en 1849 por Alexander von Humboldt (DIKAU, 1990) —, es definida como la ciencia del análisis cuantitativo de la superficie terrestre (PIKE, 2000), un abordaje moderno analítico-cartográfico para representar la topografía de la Tierra (TOBLER, 2000) y también un campo interdisciplinar que contempla la matemática, las geociencias y, más recientemente, la ciencia de la computación (PIKE *et al.*, 2009).

Dese modo, el análisis digital del terreno tiene como enfoque la extracción de medidas descriptivas (parámetros) y formas de superficie (objetos) (MARK y SMITH, 2004; WILSON, 2012; PIKE *et al.*, 2009). Evans (1972) define la primera, que trata la superficie de modo continuo, como geomorfometría general, y la segunda, que contempla la discretización de la superficie, como geomorfometría específica.

La geomorfometría específica es aplicada para describir formas de relieve discretas, como volcanes, dunas, montañas y abarca decisiones arbitrarias y subjetivas en la etapa de cuantificación de esos conceptos. La geomorfometría general, por su vez, es aplicada para describir la superficie continua y proporciona la base para una comparación cuantitativa de paisajes distintos desde un punto de vista cualitativo

(MACMILLAN y SHARY, 2009). Conforme Minar y Evans (2008), el análisis digital del terreno tiene como gran desafío suplir la falta de precisión y objetividad de los mapas geomorfológicos tradicionales.

Para Dehn *et al.* (2001) las formas de relieve son descriptas fundamentalmente por dos perspectivas: basado únicamente en su geometría o basado en las semánticas utilizadas para expresar y capturar modelos conceptuales mentales subjetivos. Para este segundo caso, relacionado a la problemática de atribuciones cualitativas (característica de la geomorfometría específica), se destacan trabajos de Mark y Smith (2004), Smith y Mark (2006) y Evans (2012).

Es esta perspectiva, se destaca que las operaciones fundamentales en geomorfometría consisten en la extracción de parámetros y objetos a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDEs) (Pike *et al.*, 2009). La aplicación de los modelos y sus subproductos derivados (atributos topográficos, también denominados variables geomorfométricas) es creciente en los últimos años, principalmente debido a la disponibilidad cada vez mayor de bases de datos en formato digital y también de softwares de SIG que contemplan herramientas de análisis digital del terreno.

Referente a las aplicaciones, Hengl y Macmillan (2009) destacan que el principal argumento para utilización de MDEs para cartografía y modelaje de paisajes naturales es la variedad de medidas, mensuraciones y objetos que pueden ser derivados por el análisis automatizado de datos de elevación. Ese análisis puede extraer, de modo rápido y consistente, muchos parámetros o objetos que pueden ser considerados como análogos directos de los criterios utilizados por el intérprete manual para identificar y delinear objetos aplicados a la pedología, ecología, geomorfología y geología.

Los MDEs también son muy utilizados por proveer coberturas continuas para áreas extensas y con relativo bajo costo operacional en función de la computación digital automatizada (HENGL e MACMILLAN, 2009).

Con esas premisas, el presente trabajo se propone aplicar una clasificación morfológica, adecuada hasta la escala 1:100.000, a partir de Modelos Digitales de Elevación y atributos topográficos derivados en ambiente de Sistemas de Informaciones Geográficas, destacando las limitaciones y potencialidades de la propuesta y también del empleo de técnicas paramétricas aplicadas a estudios geomorfológicos.

Geomorfología del Uruguay

El relieve uruguayo se caracteriza por el predominio de formas bajas de relieve ondulado, como planicies, lomadas y colinas, cuya altitud media es de 117 metros y el punto más elevado del territorio es el Cerro Catedral, con 513 metros. Según Antón (2011), la geomorfología del territorio uruguayo está modelada en el extremo meridional del cratón denominando Escudo Brasileiro, y, más particularmente, sobre los bloques de la Isla Cristalina o Escudo Uruguayo-Riograndense.

Panario (1998) ha definido diez principales regiones geomorfológicas, desarrolladas a partir de asociaciones de materiales parentales geológicos (figura 1).

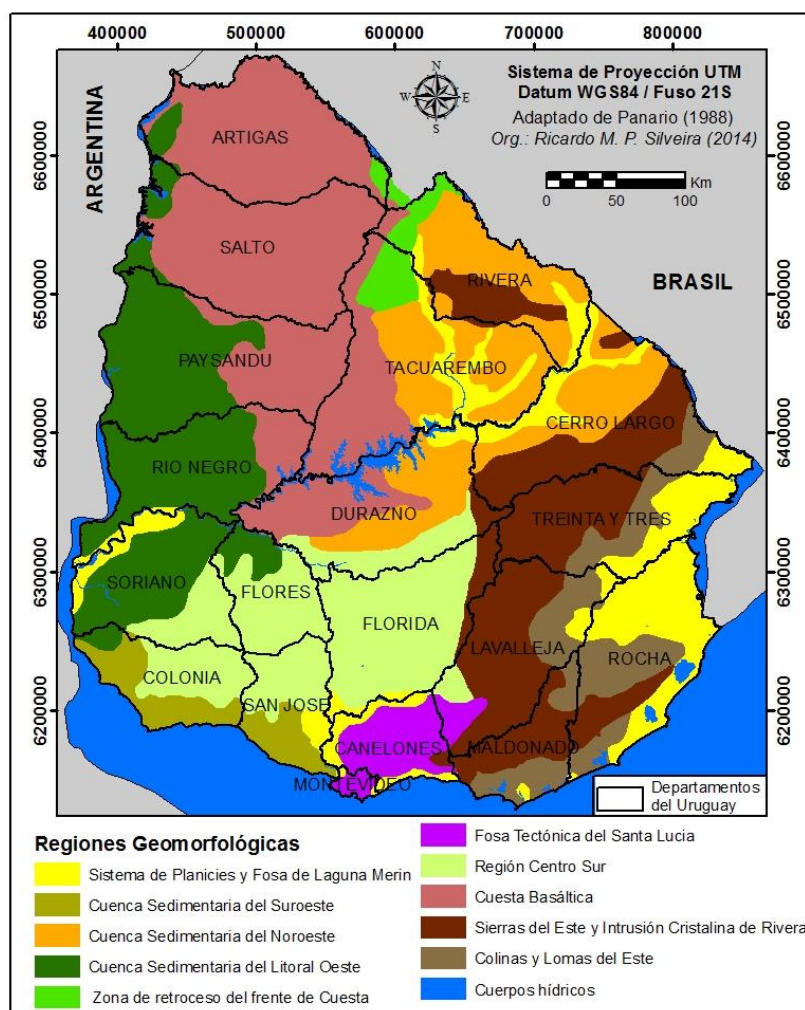


Figura 1 - Regiones Geomorfológicas del Uruguay.

Antón (2011) elaboró un mapa geomorfológico basado en aspectos genéticos y crono-morfoestratigráfica. Según el autor, "los mapas existentes incluyen más bien reproducciones de unidades estructurales o geológicas reconocidas en trabajos pre-existentes".

Panario *et al.* (2011), con el trabajo "Mapa de Ambientes de Uruguay y Distribución potencial de especies", desarrollaron una clasificación jerárquica de ambientes cuya cartografía fue implementada en un SIG. La propuesta se apoyó en 4 taxones, según la escala de análisis, de mayor a menor extensión: a) Provincia o Eco-región; b) Ecozona; c) Distrito; d) Sitio o complejo de sitios. Para los sitios, al cual están conformados por las unidades elementales del paisaje con representación a escalas entre 1:50.000 y mayores, fueron empleadas variables como pendiente, profundidad, textura, drenaje, hidromorfismo, pedregosidad y rocosidad.

Más recientemente, otro trabajo sistemático de destaque fue presentado por Brazeiro *et al.* (2012) que, a los efectos de la eco-regionalización de Uruguay, consideraron la propuesta de unidades morfoestructurales (ecozonas) de Panario *et al.* (2011) como esquema de regionalización ambiental fuertemente amparada por características de relieve. Los trazos generales de esta propuesta de regionalización ambiental guarda relación con el esquema previo de Panario (1988). El esquema de

regionalización contempló siete grandes eco-regiones, que dan cuenta de la variabilidad geomorfológica y biótica del Uruguay.

De modo general, se destaca que muchos mapas geomorfológicos elaborados en Uruguay tienen como enfoque la morfogénesis y la cronología, característicos de escalas geomorfológicas pequeñas (unidades homogéneas más generalizadas), mientras para el presente trabajo ha sido destacado aspectos morfométricos y morfográficos. Ante las características del relieve ondulado y con baja variación altimétrica del Uruguay, la aplicación de modelos digitales para identificación semiautomatizada de unidades geomorfológicas elementares en escala más detallada emerge como desafío metodológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelos Digitales de Elevación

A fin de evaluar los efectos del proceso de clasificación en distintos Modelos Digitales de Elevación, con características de adquisición y/o resolución igualmente distintas, fueron testados tres modelos: MDE SRTM, Aster GDEM y MDE Topogrid. Todos los procedimientos fueron realizados por el *software* ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012).

El MDE derivado de los datos SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), con resolución de 3 arco-segundos para el territorio uruguayo (aproximadamente 76 metros), resulta de una misión a bordo del transbordador espacial *Endeavour*, a partir de una cooperación entre las agencias espaciales de los Estados Unidos de América, Alemania y Italia, que tuvo como objetivo coleccionar medidas tridimensionales de la superficie terrestre por el proceso de interferometría.

Otro MDE global y de distribución gratuita aplicado fue el Aster GDEM, cuyos valores de elevación fueron obtenidos a partir del par estereoscópico de imágenes del infrarrojo cercano en el subsistema VNIR por medio de dos sensores a bordo del satélite *Terra*. La resolución espacial del Aster GDEM es de 30 metros.

El tercer modelo utilizado fue el MDE ofrecido por la Dirección General de Recursos Naturales (RENARE) del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) del Uruguay. El MDE fue generado por el método denominado *Topogrid* (HUTCHINSON, 1988) cuyo proceso de interpolación contempla datos vectoriales planialtimétricos (curvas de nivel, puntos cotejados y hidrografía dibujados) extraídos de cartas topográficas, en este caso, a escala 1:50.000, del Servicio Geográfico Militar. Totalizan un grilla de 302 cuadrículas de aproximadamente 660 km² (22x30 km). El método *Topogrid* tiene como enfoque generar MDEs hidrológicamente correctos y con grade regular. Este MDE fue elaborado con resolución espacial de 30 metros.

Inicialmente, para ilustrar las diferencias inherentes entre los tres modelos, fueron realizados testes estadísticos comparativos entre ellos, tanto para los valores de elevación (el propio MDE) cuanto para los valores de pendiente (atributo topográfico derivado). Las matrices de elevación y pendiente fueron sobrepuestas y las diferencias de valores calculadas por la ecuación:

$$\text{Superposición} = \sqrt{(MDE_1 - MDE_2)^2} \quad (\text{ecuación 1})$$

La pendiente (atributo topográfico primario), entendida como la medida de inclinación de la superficie, fue calculada a partir de una ventana móvil 3x3 *pixels* (figura 2), cuyo algoritmo contempla el análisis de vecindad.

Z_1	Z_2	Z_3
Z_4	Z_5	Z_6
Z_7	Z_8	Z_9

Figura 2 – Ventana de vecindad 3x3.

El algoritmo contempla el análisis de vecindad y fue computado conforme las variables direccionales de Horn (1981), según ecuaciones 2 y 3:

$$fx = \frac{[(Z_3 + 2Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_7)]}{8L} \quad (\text{ecuación 2})$$

$$fy = \frac{[(Z_1 + 2Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2Z_8 + Z_9)]}{8L} \quad (\text{ecuación 3})$$

donde fx es el gradiente este-oeste de la ventana 3x3, fy es el gradiente norte-sur y L es el espaciamiento de la grilla regular, en este caso, la resolución de los MDEs.

A partir de estos valores, la pendiente en porcentaje es calculada por la ecuación:

$$\text{Pendiente en porcentaje} = \sqrt{fx^2 + fy^2} \quad (\text{ecuación 4})$$

Clasificación morfológica

El método aplicado para clasificación de formas de relieve en territorio uruguayo se apoya en la propuesta de Weiss (2001), con el Índice de Posición Topográfica (IPT). El IPT es derivado de un algoritmo que mensura la diferencia de elevación de un punto central (Z_0) y la media de elevación ($\bar{Z}$) a su alrededor con un rayo predeterminado (R). Wilson y Gallant (2000, p. 74), presentando la misma ecuación, definen el cálculo como "Diferencia de la Elevación Media":

$$IPT = Z_0 - \bar{Z} \quad (\text{ecuación 2})$$

Dónde la media de elevación es calculada por:

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum i \in R^Z i \quad (\text{ecuación 3})$$

El análisis de vecindad puede ser hecha por una ventana circular (adoptada en el presente trabajo), anular (propuesta original), rectangular o irregular.

Los valores positivos obtenidos por el IPT representan locales que son más elevados que la media de su entorno, caracterizando, por ejemplo, las crestas. Los valores negativos, por su vez, representan los locales más rebajados en relación a su vecindad, caracterizando vales o depresiones. Y los valores próximos a cero obtenidos por el IPT representan superficies de declive constante, destacado en áreas planas (figura 3).

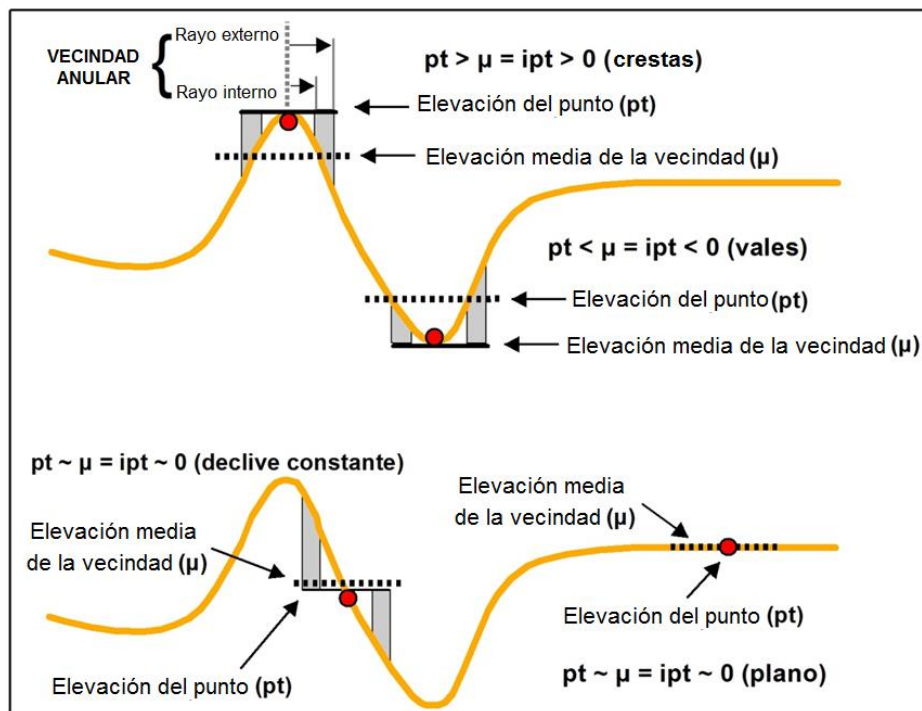


Figura 3 – Índice de Posición Topográfica.
Adaptado de Weiss (2001).

Las clases son definidas por la discretización del IPT, considerando el desvío medio de los valores. Originalmente Weiss (2001) presenta dos propuestas de discretización de los valores continuos del IPT para la determinación de clases morfológicas, ambas considerando los valores de desvío medio (DM). La primera considera el particionamiento de una única matriz resultante con valores de IPT y resulta en 6 clases posibles: Crestas (>1DM), Vertientes elevadas (>0,5 y ≤1DM), Vertientes intermedias (≥ -0,5 y ≤ 0,5DM; Pendiente ≥ 5 grados), Áreas planas ((> -0,5 y < 0,5DP; Pendiente < 5 grados), Vertientes rebajadas (≥ -1 y < 0,5DM) y Valles (< -1DM).

La segunda propuesta, por su vez, es clasificada a partir de dos matrices con variación en el tamaño del rayo de análisis de vecindad, una de más detalle y otra más generalizada, resultando en hasta 10 clases.

Para el presente trabajo fue empleada apenas la clasificación de una matriz de IPT, con 6 clases. Debido a la baja variación morfométrica del relieve uruguayo, los valores de desvío medio para definición de las clases fue modificada (ampliación de los intervalos): Crestas ($>3DM$), Vertientes elevadas ($>0,5$ y $\leq 3DM$), Vertientes intermediarias ($\geq -0,5$ y $\leq 0,5DM$; Pendiente ≥ 6 por ciento), Áreas planas ($> -0,5$ y $< 0,5DP$; Pendiente < 6 por ciento), Vertientes rebajadas (≥ -2 y $< 0,5DM$) y Valles ($< -2DM$).

La elección de la ventana de análisis de vecindad (rayo) para el cálculo del IPT fue establecida basada en la jerarquía taxonómica geomorfológica de Dikau (1990), que atribuye parámetros cuantitativos en relación a las órdenes de grandeza de compartimentos geomorfológicos (figura 4).

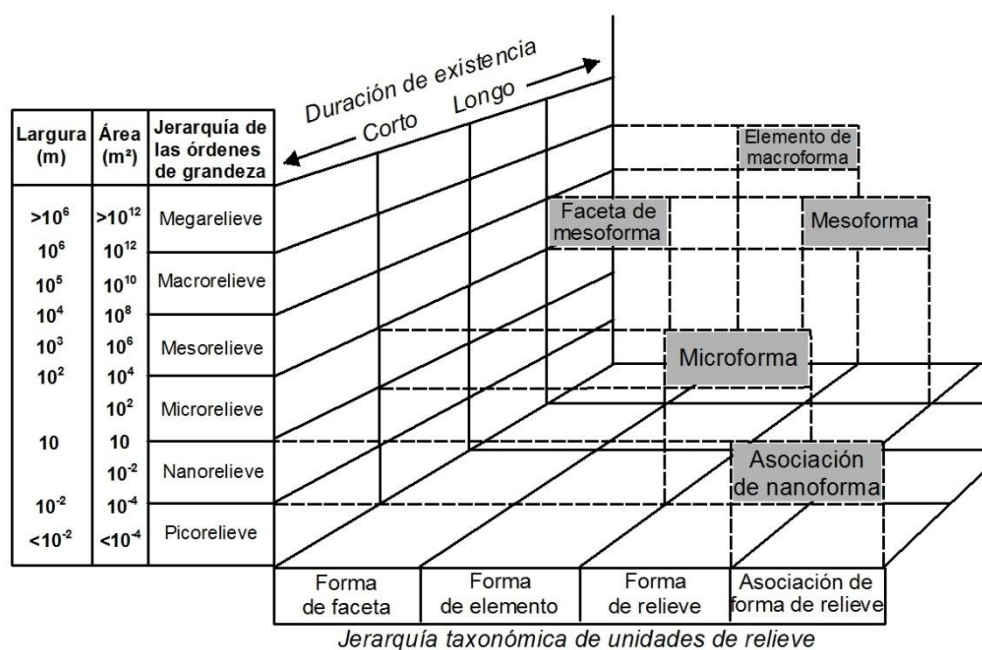


Figura 4 – Jerarquía taxonómica geomorfológica.
Adaptado de Dikau (1990).

De acuerdo con los objetivos de la clasificación final, que visa identificar formas de relieve en escala regional (1:100.000), se optó por la categoría de "mesorelieve". Así, el rayo de análisis fue definido en 1800 metros, cuya área es de 10^7 metros cuadrados. Para el MDE SRTM, ese valor equivale a un rayo de análisis de 23 *pixels*, mientras para el Aster GDEM y MDE Topogrid equivale a un rayo de 60 *pixels*.

Adicionalmente fue incluida una clase para representación de los principales segmentos de drenaje, basada en el atributo topográfico acumulación de flujo (también denominado área de contribución). Esa variable fue calculada por el método D-infinito, algoritmo propuesto por Tarboton (1997), y con auxilio de la extensión *TauDEM* versión 5.1. En este método, el ángulo de dirección de flujo es determinado como la

dirección más abrupta considerando las ocho facetas triangulares formadas en una ventana 3x3 *pixeles* (figura 5). La acumulación de flujo es obtenida por la contribución de cada pixel sumado a las contribuciones del entorno más elevado, conforme ángulo de dirección de flujo. Así, el flujo de cada uno de las células drena para alguno de sus vecinos, siendo ese valor sumado a su propio. Representa, por lo tanto, la generación de flujo superficial.

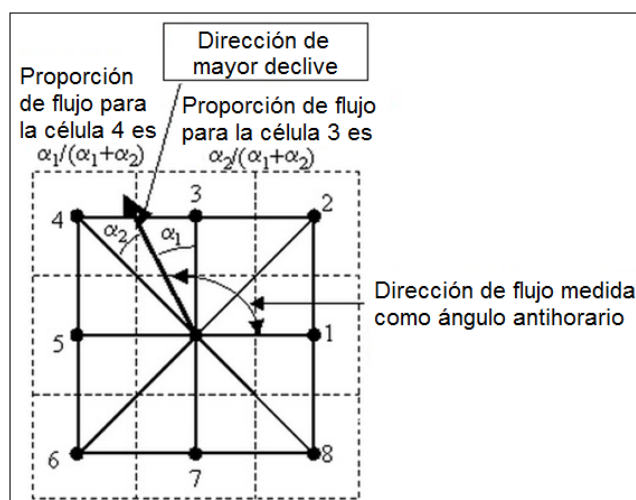


Figura 5 – Método D-infinito para cálculo de dirección de flujo.

La clase "fondo de valle" fue definida por los valores mayores que la media de acumulación de flujo, para cada uno de los modelos. Esa clase no tuvo relación con los valores obtenidos por el IPT.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Análisis de los Modelos Digitales de Elevación

Los resultados obtenidos por la comparación entre los tres MDEs utilizados como referencia demostraron que los errores más significativos de elevación entre ellos ocurren en cuerpos hídricos, en áreas de relieve más rugoso con amplitud altimétrica y también en fajas características que evidencian el pasaje del sensor del Aster GDEM. La altitud media, para todo el Uruguay, de acuerdo con cada modelo fue: Topogrid: 106m; SRTM: 153m; Aster GDEM: 160m. La literatura comúnmente apunta el valor de 117 metros como altitud media.

La tabla 1 ilustra cuantitativamente los valores obtenidos por la superposición de las matrices de elevación (el propio MDE) y de pendiente (variable geomorfológica) — ambas utilizadas para la clasificación morfológica —, con el cálculo de la diferencia máxima, diferencia media y desvío medio considerando todo el territorio uruguayo.

Tabla 1 – Resultados del análisis cuantitativo comparativo entre MDEs.

Comparación entre MDEs	Valores de elevación (m)			Valores de pendiente (%)		
	Diferencia máxima	Diferencia media	Desvío medio	Diferencia máxima	Diferencia media	Desvío medio
Topogrid x SRTM	144,7	3	3,3	127,3	1,4	1,9
Topogrid x Aster GDEM	154,7	6,9	5,9	221,3	6,8	6,1
SRTM x Aster GDEM	125	6,3	5,2	195,4	6,7	6

Para la elevación, destácase la pequeña diferencia media (3 metros) entre el Topogrid y el SRTM, mismo con las resoluciones distintas entre ambos. Para cada *pixel* del MDE SRTM, con un único valor de altimetría, hay nueve *pixeles* del MDT Topogrid. Así, la alta correlación entre los modelos evidencia que los datos SRTM, de alcance global, presentan características semejantes al MDE elaborado a partir de base cartográfica a escala 1:50.000, cuyo método de procesamiento considera una gama mayor de informaciones topográficas específicas. Entretanto, el análisis puramente cuantitativo de los valores de elevación omite discrepancias que afectan directamente los subproductos derivados. La figura 6 representa los resultados de la superposición para los valores de elevación.

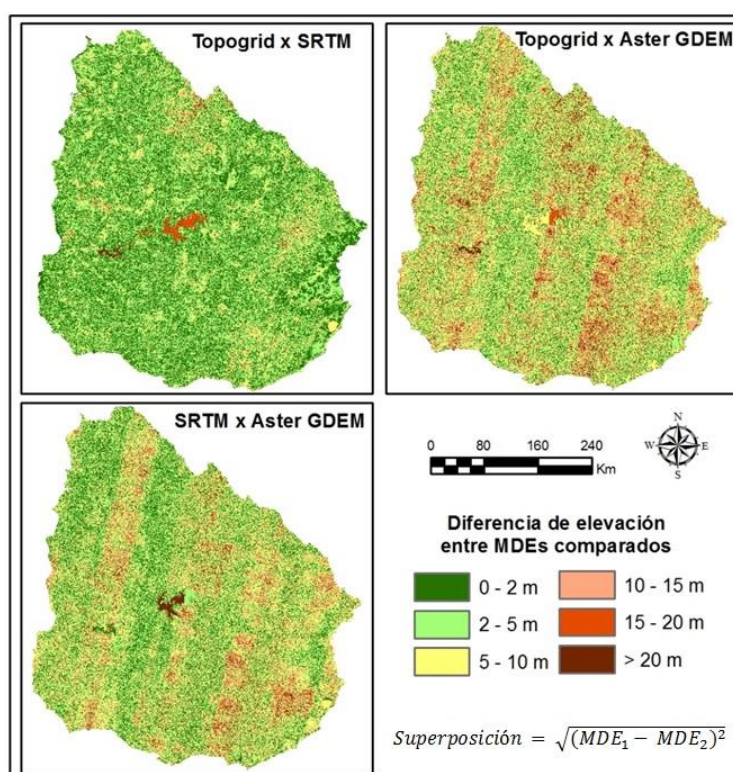


Figura 6 – Diferencias de elevación calculada por la superposición de los MDEs.

También destácase la elevada diferencia máxima computada para todas las comparaciones. Aunque sean en locales puntuales, principalmente en cuerpos hídricos debido a las características de adquisición y refracción de los sensores del SRTM y Aster, ese resultado denota que estudios en recortes específicos y/o en escalas más detalladas demanda cuidados con errores espurios locales que, en un análisis contextual, pueden ocasionar errores generalizados.

La comparación entre matrices de pendiente fue proporcional a los resultados de elevación. Conforme el MDE Topogrid, la declividad media del Uruguay es 3,1%; conforme el MDE SRTM, es de 1,88%; y para el Aster GDEM, casi cinco veces más: 8,8%. Al considerar este último, se podría decir que el relieve uruguayo es predominantemente “plano ondulado fuerte” (conforme rango de pendiente presentado por Panario *et al.* (2011, p. 14)), lo que no condice con la realidad. Resaltase, también, que cuanto menor la resolución horizontal del MDE, mayores tienden a ser los valores de pendiente. Dese modo, el factor de escala debe ser considerado en las estimativas y discusiones posteriores.

En la superposición, representada por la figura 7, la menor diferencia media calculada fue nuevamente entre el Topogrid y SRTM y la mayor entre Topogrid y Aster GDEM (que poseen la misma resolución de 30 metros). Visualmente las diferencias se acentúan, y como el Aster GDEM presenta mucha variación de elevación, los errores de declive son más evidentes por el cálculo de vecindad. La diferencia media superior a 6% significa decir que una vertiente o sector puede ser clasificada como área “plana”, por un MDE, o como “plano ondulado fuerte”, por otro, en un mismo punto analizado.

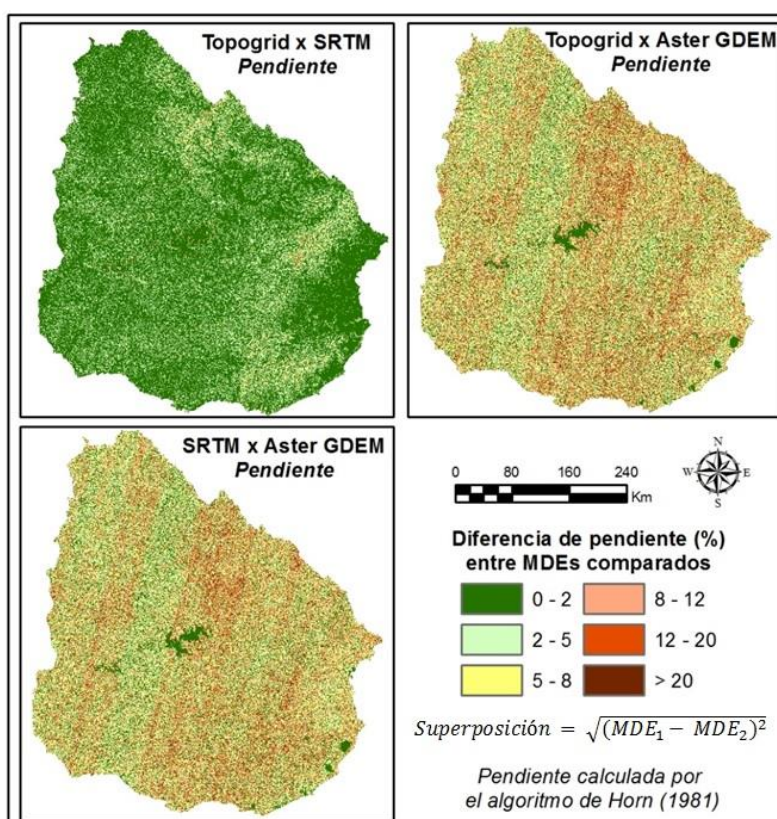


Figura 7 – Diferencias de pendiente calculadas por la superposición de los MDEs.

Siendo el relieve uruguayo caracterizado por la baja variación altimétrica y, consecuentemente, baja variación de declividad, ese es un resultado que denota cautela, pues la diferencia media de incompatibilidad entre los modelos es superior o muy cerca de la propia declividad media calculada para todo el Uruguay.

De modo general, a pesar de los errores indicaren atención, los modelos se mostraran adecuados a los objetivos de clasificación a escala 1:100.000. Entretanto, si

los resultados entre comparaciones “modelo x modelo” presentaran significativas diferencias inherentes, al añadir la comparación “modelo x realidad”, con validación y control de campo, la complejidad del análisis aumenta proporcionalmente a los errores. Para estudios de detalle, por lo tanto, esa etapa es fundamental e imprescindible, tanto para control de los modelos cuanto de los productos obtenidos en fase posterior.

Análisis de las clasificaciones morfológicas resultantes

Las tres clasificaciones obtenidas (figuras 8, 9 y 10), una para cada MDE empleado, siguiendo las mismas reglas de clasificación, representarían segmentos elementales de relieve compartimentados en niveles de disecación a partir de análisis de vecindad. Los dos recortes ilustrativos de las figuras fueron definidos en función de la variedad de clases morfológicas observadas en esas áreas. El recorte a norte se inserta en el contexto del contacto de la Zona de retroceso del frente de cuesta con la Cuesta basáltica, mientras la porción a sur se sitúa en el contacto de las Sierras del Este con la Fosa tectónica de Santa Lucía. Conforme características morfológicas locales, las áreas planas tuvieron predominio contemplando todo el territorio.

Resaltase que las clases derivadas del IPT demostraron menor variancia espacial que la clase “fondo de valle”, mapeada por el atributo acumulación de flujo. Así, como el MDE Topogrid fue elaborado considerando la hidrografía como parámetro de entrada (además del método de interpolación contener un algoritmo de extracción de drenaje), esa clase se mostró más detallada debido a las informaciones morfométricas adicionales características del modelo. El nivel de detalle, entretanto, omite la identificación del padrón central de los fondos de valle, pues muchos segmentos no presentan continuidad. En las clasificaciones derivadas del SRTM y Aster GDEM, esa clase fue mapeada de modo más amplio y generalizado, lo que favorece la comprensión del comportamiento de la red de drenaje en escalas menores. El flujo acumulado es una importante variable del terreno que indica muchos procesos geomorfológicos recientes actuantes.

La principal ventaja del detalle resultante de la acumulación de flujo para el MDT Topogrid es evidenciada por las clases “valles” y “vertientes rebajadas”, cuyos contornos fueron mapeados de modo fidedigno a la morfología característica local. En áreas de mayor variación altimétrica, los valles ocuparon áreas más allá de los límites cercanos mapeados por los fondos de valle. Así, en muchas porciones del territorio fue constatada la extrapolación de esa clase, como demuestran las figuras en áreas cercanas a elevaciones acentuadas.

Debido al alto valor de pendiente definido como limítrofe ($> 6\%$), la clase denominada “vertientes intermediarias” fue la que presentó menor representatividad, siendo, en su mayoría, clasificada como una línea de contacto entre las “vertientes elevadas” y las “áreas planas” (para los MDEs Topogrid y SRTM), mientras para el Aster GDEM los errores se debían a la inconsistencia de los valores de pendiente obtenidos por ese MDE, que resultó en casi 23% de toda la cobertura del territorio como perteneciente a esta clase.

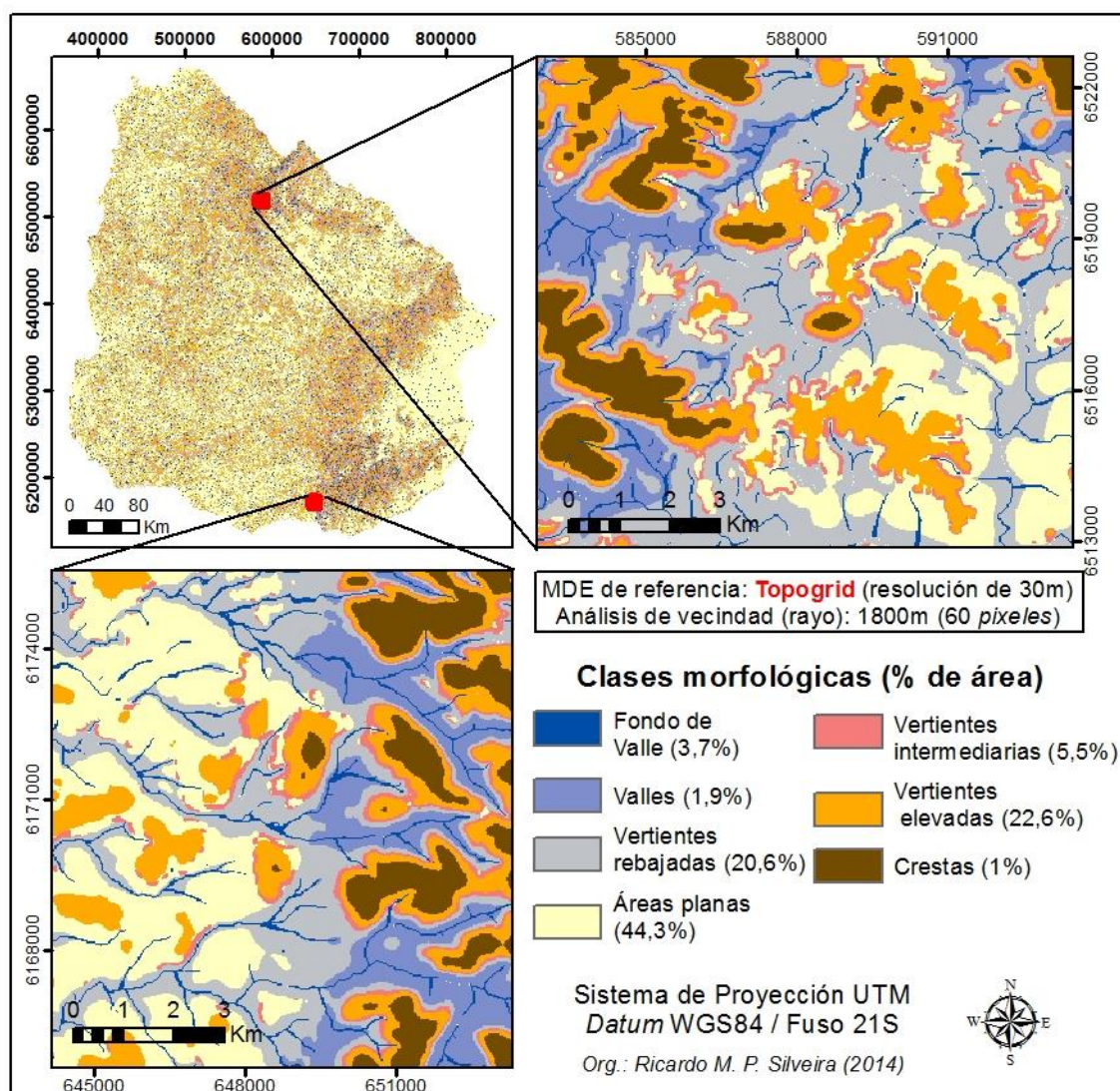


Figura 8 – Clasificación basada en el MDE Topogrid.

Las "vertientes elevadas", por su vez, fueron mapeadas de modo semejante entre las clasificaciones, aunque los contornos tengan significativas diferencias. Esa clase representa los divisores de agua en las áreas predominantemente planas y sectores superiores que circundan las crestas en relieve disecado.

Las crestas, a pesar de ser la clase con menor área ocupada en todas las clasificaciones, fue la que obtuve mayor correlación entre los tres tests. Conforme evidencian las figuras, asimismo los límites imprecisos en algunos sectores, la representación tiene gran similitud en todos los casos. La opción por triplicar el desvío medio para determinación de esta clase, en relación a la propuesta original, se mostró satisfactoria: las crestas se restringen a las porciones más disecadas del relieve uruguayo, a norte y a este, bajo la influencia de la intrusión cristalina que confieren mayores amplitudes.

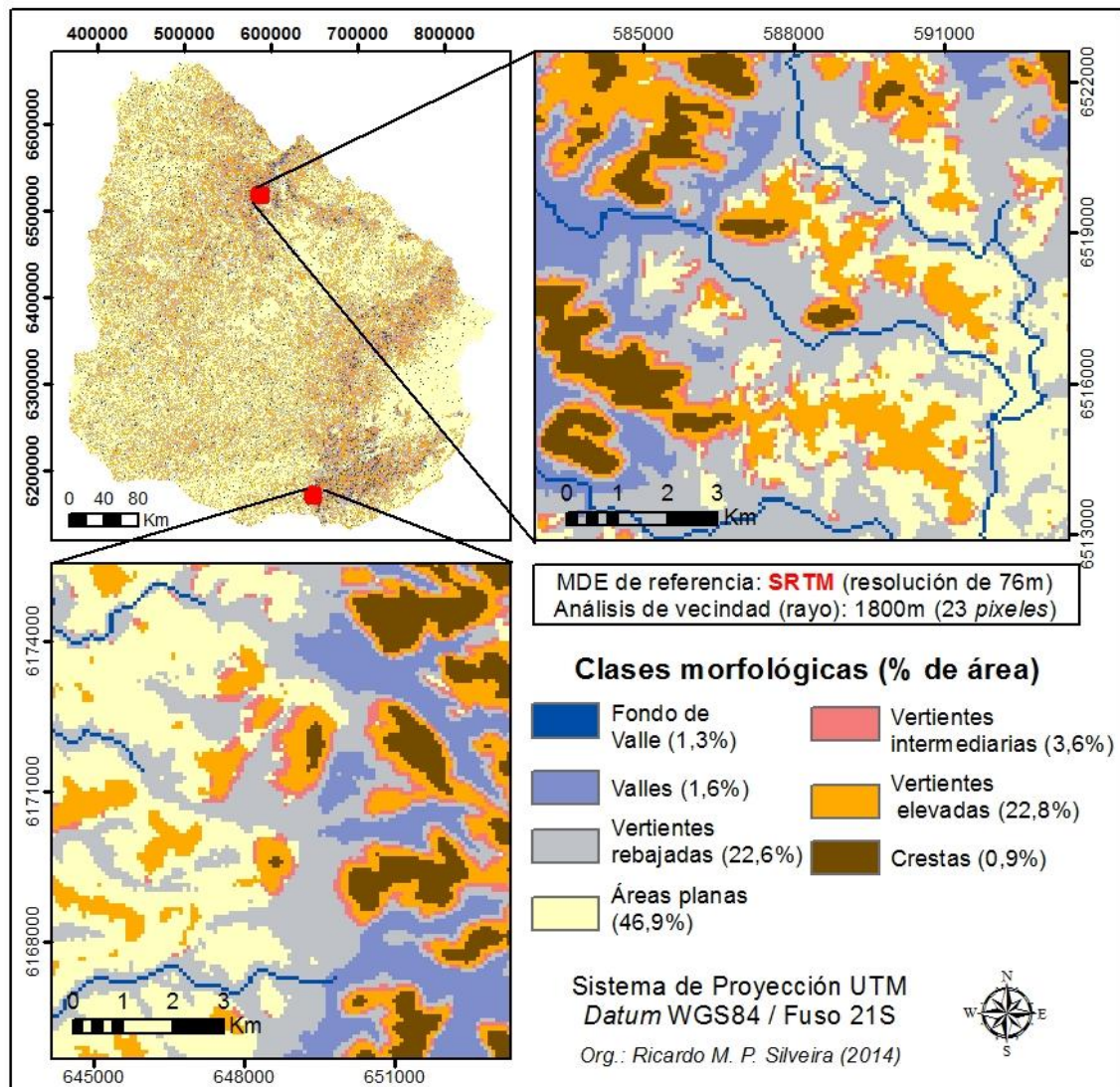


Figura 9 – Clasificación basada en el MDE SRTM.

Individualmente, la clasificación derivada del MDE Topogrid (figura 8), que es considerado el modelo de mejor calidad debido a su proceso de construcción y escala de base de datos, fue la que presentó menores ruidos y también mayor detalle de clases morfológicas, aunque los fondos de valle en muchos puntos no tengan presentado continuidad de segmentos. Por otro lado, la clasificación resultante del Aster GDEM (figura 9), como ya demostraba en análisis inicial, obtuve muchos errores con clases espurias en contextos geomorfológicos distintos. Para el MDE SRTM (figura 10), que entre todos los MDEs es lo que presenta resolución más grosera, los resultados se mostraron satisfactorios debido a la representatividad fuertemente correlacionada a la clasificación del MDE Topogrid. De modo ilustrativo, la figura 11 representa una perspectiva en tres dimensiones con exagero vertical del recorte al sur de los mapas obtenidos.

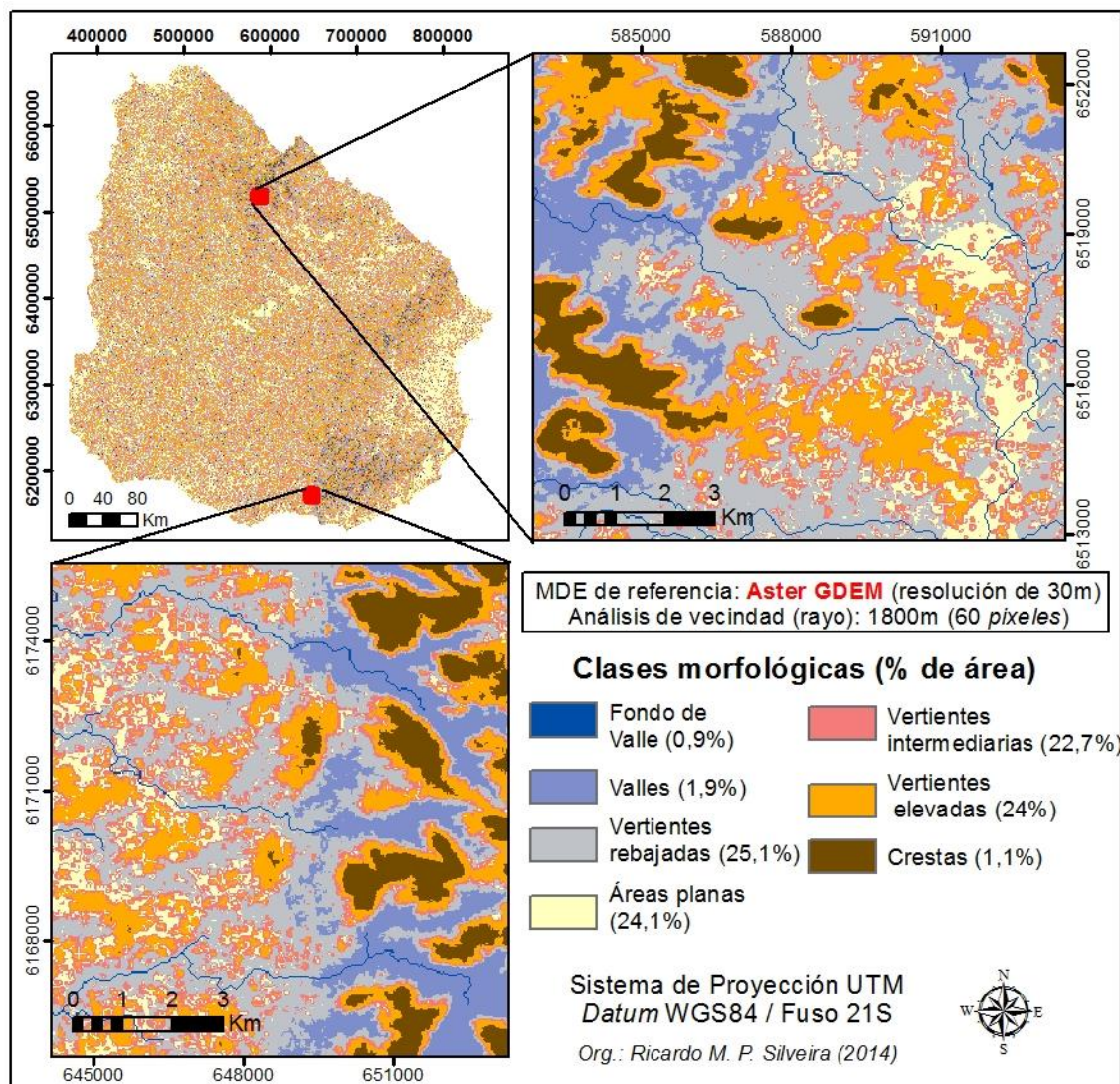


Figura 10 – Clasificación basada en el MDE Topogrid.

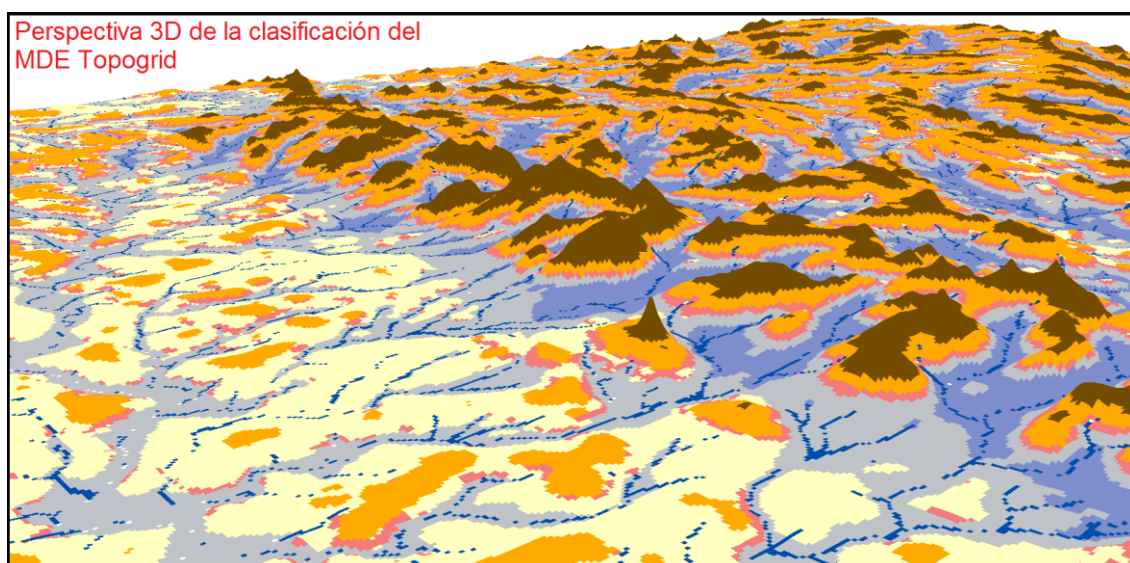


Figura 11 – Perspectiva ilustrativa en 3D de la clasificación basada en el MDE Topogrid, con exageración vertical.

También cabe resaltar que la utilización del mismo rayo de análisis de vecindad denotó que el factor de escala y parámetros de entrada pueden ser más decisivos para las clasificaciones que la propia resolución espacial o calidad de los MDEs. De modo complementario, se evidencia los buenos resultados de la discretización de los atributos (tanto el IPT cuanto la acumulación de flujo) por criterios estadísticos: desvío medio y valor medio, respectivamente, cuyos valores se aplican a distintos contextos en distintas áreas de estudio.

Sobre las definiciones cualitativas de las clases resultantes, aunque hayan sido adoptadas nomenclaturas subjetivas debido a la generalización de las grandes unidades, es importante mencionar que la inclusión de variables adicionales (atributos topográficos que permitan mapear formas específicas) es una posibilidad para adecuación de las atribuciones en formas de relieve más particulares, aunque el problema de interpretación persista. Las dificultades en este proceso de extraer valores morfométricos para definir clases morfológicas es evidenciado por Evans (2012, p. 97), que cita como ejemplo: “algunas formas tienen múltiples identidades: todos los grandes volcanes son montañas, y algunos volcanes son islas, pero muchas islas y montañas no son volcanes”. Así, muchas clases pueden tener características morfométricas que no corresponden a los mismos modelos mentales conceptuales, o sea, aspectos paramétricos aún permanecen dependientes de la construcción subjetiva por parte de los intérpretes.

Por fin, destacase que no fueron utilizados filtros para remoción de errores o entonces cualquier etapa de procesamiento posterior de los datos originales y de las clasificaciones obtenidas. El trabajo tuvo como objetivo evaluar la aplicación con valores sin modificaciones, siendo la mejora de los modelos y parámetros un desafío para futuros trabajos.

CONCLUSIONES

De modo general, se destacan dos puntos principales del trabajo: a) la potencialidad de la propuesta de mapeo automatizado (que puede auxiliar la aplicación de representaciones del relieve para diversas finalidades, sean en el campo de la geomorfología, geología, pedología, ecología etc.) para todo el territorio uruguayo, diferenciando los principales segmentos de relieve, con bajo costo operacional y con parámetros predeterminados que favorecen la posibilidad de repetitividad del método; b) la importancia del rigor metodológico para determinación de clasificaciones eficaces que atiendan los objetivos iniciales.

En esta perspectiva, debido a las diferencias observadas en función de la escala elegida, donde la resolución espacial presenta influencia directa sobre el nivel de detalle y en la representación de las características de superficie, o por la posibilidad de efectuar los cálculos de atributos topográficos por distintos algoritmos, los mapas obtenidos a partir de MDEs no pueden ser entendidos como de carácter definitivo, pero sí un instrumento de soporte que facilite la integración de datos y variables, formulación de modelos preliminares para control de campo que carecen de validación *in situ*.

El empleo de modelos de más detalle, para áreas individualizadas y con aplicaciones específicas, emerge como perspectiva para trabajos posteriores en la temática del análisis digital del terreno en ambiente SIG como herramienta complementaria para levantamientos introductorios que consideren la topografía como base de los estudios.

Bibliografía

ANTÓN, D. Carta Geomorfológica del Uruguay: una metodología genética y cronomorfoestratigráfica. *Anales del 12º Encuentro de Geógrafos de América Latina*, Montevideo, Uruguay. 2009.

BRAZEIRO, A.; PANARIO, D.; SOUTULLO, A.; GUTIERREZ, O.; SEGURA, A.; MAI, P. *Clasificación y delimitación de las eco-regiones de Uruguay*. Informe Técnico. Convenio MGAP/PPR – Facultad de Ciencias/Vida Silvestre/ Sociedad Zoológica del Uruguay/CIEDUR. 40p. 2012.

DEHN, M.; GÄRTNER, H.; DIKAU, R. Principals of semantic modeling of landform structures. *Computers & Geosciences* 27, 1011–1013, 2001.

DIKAU, R. Geomorphic landform modeling based on hierarchy theory. In: BRASSEL, K.; KISHIMOTO, H. (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling*. Department of Geography, University of Zürich, Zürich, Switzerland, pp. 230–239, 1990.

ESRI. *ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst*. Versão 10.1. Environmental Systems Research Institute, 2012.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). *Spatial analysis in geomorphology*. London: Harper & Row, Publishers, 1972.

EVANS, I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology* 137 (2012) 94–106, 2012.

HENGL, T.; MACMILLAN, R. A. Geomorphometry - A Key to Landscape Mapping and Modelling. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 433-460, 2009.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, n. 69, v.01, p. 14-47, 1981.

HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney*, Australia, 1988.

MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landform and landform elements in geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 227-254, 2009.

MARK, D. M., SMITH, B. A science of topography: from qualitative ontology to digital representations. In: Bishop, M.P., Shroder, J.F. (Eds.), *Geographic Information*

Science and Mountain Geomorphology. Springer–Praxis, Chichester, England, pp. 75–97, 2004.

MINÁR, J.; EVANS, I. S. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology** 95 (3–4), 236–259, 2008.

PANARIO, D. **Geomorfología del Uruguay: Propuesta de un marco estructural y un esquema de evolución del modelado del relieve uruguayo**. Departamento Publicaciones - Facultad de Humanidades y Ciencias, UdelaR, Montevideo. 32 p. (Avances de Investigación). 1988.

PANARIO, D.; GUTIÉRREZ, O.; ACHKAR, M.; BARTESAGHI, L.; CERONI, M. **Mapa de Ambientes de Uruguay y Distribución potencial de especies**. Informe Técnico. Convenio MGAP/PPR – CIEDUR. 145p. 2009.

PIKE, R. J. Geomorphometry — diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography** 24 (1), 1–20, 2000.

PIKE, R. J.; EVANS, I., HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3–30, 2009.

SMITH, B.; MARK, D. M. Do mountains exist? Towards an ontology of landforms. **Environment and Planning B: Planning and Design** 30 (3), 411–427, 2006.

TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, 33(2): 309–319, 1997.

TOBLER, W. R. The development of analytical cartography — a personal note. **Cartography and Geographic Information Science** 27 (3), 189–194, 2000.

WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis**. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 2001.

WILSON, J. P. Digital terrain modelling. **Geomorphology**, 137, p.107–121, 2012.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1–27, 2000.

© Ricardo Michael Pinheiro Silveira y Claudinei Taborda da Silveira

Silveira, R.M.P.; Silveira, C.T. 2014. Clasificación morfológica del relieve uruguayo basada em modelos digitales de elevación y técnicas morfométricas. **Geografía y Sistemas de Información Geográfica**. (GESIG-UNLU, Luján). Año 6, N° 6, Sección I: 19–36.

On-line: www.gesig-proeg.com.ar

Recibido: 10 de agosto de 2014 /Aprobado: 5 de setiembre de 2014