UNERG AGRO-Científica
2024; 5(2): 364-387
https://unerg.edu.ve/unerg-agro-cientifica/
ISSN: 2665-0061 (Online)

CARTOGRAFÍA DIGITAL GEOMORFOLÓGICA CON REDES NEURO-DIFUSAS EN LOS LLANOS CENTRALES ALTOS DE VENEZUELA

Ángel Rafael Valera[1, 2*], **Cándido Sumoza Agraz**[1, 2], **Jairo Ferrer Espy**[1, 2]

[1] Universidad Rómulo Gallegos, Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas (CIESA-UNERG), San Juan de los Morros, Estado Guárico, Venezuela, e-mail: angelvalera@unerg.edu.ve

[2] Universidad Rómulo Gallegos, Área de Ingeniería Agronómica, San Juan de los Morros, Estado Guárico, Venezuela, e-mail: sumagraz@hotmail.es, jairofe9@gmail.com

[*] Autor de correspondencia

Recibido: 10 - 08 - 2024; **Aceptado**: 15 - 10 - 2024; **Publicado**: 30 - 12 - 2024

RESUMEN

En este estudio se utilizó la técnica integral de clasificación no supervisada, basada en una red de agrupamiento difuso de Kohonen o *Fuzzy Kohonen Clustering Networks* (FKCN). Esta técnica consiste en la combinación del modelo de mapas autoorganizados o *Self Organizing Map* con lógica difusa. Este algoritmo neuro-difuso fue implementado en un sistema de clasificación del terreno. Como datos de entrada se utilizaron atributos derivados de un modelo digital de elevación de 20 m de resolución espacial, imágenes satelitales y mapa geológico de la cuenca del río Manapire, al Sur-oeste de Espino, municipio Infante del estado Guárico (Venezuela), con una cobertura espacial de 36.659,4 ha. El significado geomorfológico de las clases morfométricas de terreno se interpretó a partir de la distribución espacial de dichas clases, las descripciones de sus centros de clases y las matrices de membresías, conjuntamente con la información sobre geología y vegetación del área de estudio. Se determinó que el modelo óptimo de representación del terreno consta de diez clases geomorfométricas, obtenidas con un exponente difuso de 1,2, a partir de diversos parámetros morfométricos. Las clases geomorfométricas se subdividieron en función del sustrato geológico para producir clases de paisaje que tuvieran en cuenta la influencia del material parental del suelo. Estas clases se utilizaron como marco para el muestreo del suelo. La evaluación en los sitios de muestreo representativos reveló que las unidades geomorfológicas presentes corresponden a mesas planas conservadas, valles aluviales y coluvio-aluviales, planos inclinados y colinas bajas, correlacionadas con asociaciones de suelo de los subgrupos *Typic Dystrustepts, Typic Kandiustults, Typic Usthorthents, Plinthic Kandiustults, Lithic Usthorthents, Dystric Haplustepts, Aeric Epiaquepts, Oxic Dystrustepts, Aquic Dystrustepts y Aquic Ustipsamments*

Palabras clave: Geomorfometría, algoritmo FKCN, taxonomía de suelos, modelo digital de elevación.

DIGITAL GEOMORPHOLOGICAL MAPPING WITH NEURO-FUZZY NETWORKS IN THE CENTRAL HIGH PLAINS OF VENEZUELA

ABSTRACT

In this study we used the integral technique of unsupervised classification, based on a Fuzzy Kohonen Clustering Network (FKCN). This technique consists of combining the Self Organizing Map (SOM) model with fuzzy logic. This neuro-fuzzy algorithm was implemented in a terrain classification system. As input data, attributes derived from a 20 m spatial resolution digital elevation model, satellite images and geological map of the Manapire river basin, south-west of Espino, Infante municipality, Guárico state

(Venezuela), with a spatial coverage of 36,659.4 ha, were used. The geomorphological significance of the morphometric terrain classes was interpreted from the spatial distribution of these classes, descriptions of their class centers and membership matrices, together with information on the geology and vegetation of the study area. The optimal terrain representation model was determined to consist of ten geomorphometric classes, obtained with a fuzzy exponent of 1.2, from various morphometric parameters. The geomorphometric classes were subdivided according to geological substrate to produce landscape classes that take into account the influence of the soil parent material. These classes were used as a framework for soil sampling. The assessment at the representative sampling sites revealed that the geomorphological units present correspond to preserved flat mesas, alluvial and colluvial-alluvial valleys, sloping planes and low hills, correlated with soil associations of the subgroups *Typic Dystrustepts, Typic Kandiustults, Typic Usthorthents, Plinthic Kandiustults, Lithic Usthorthents, Dystric Haplustepts, Aeric Epiaquepts, Oxic Dystrustepts, Aquic Dystrustepts and Aquic Ustipsamments.*

Keywords: Geomorphometry, FKCN algorithm, soil taxonomy, digital elevation model.

INTRODUCCIÓN

La clasificación del paisaje es un proceso fundamental en la investigación y manejo de los recursos naturales, especialmente en áreas donde la heterogeneidad del geoespacial y las condiciones ambientales son complejas. En este contexto, el uso de técnicas avanzadas de análisis y clasificación, como la red de agrupamiento difuso de Kohonen (*Fuzzy Kohonen Clustering Networks*, FKCN), ha demostrado ser una herramienta eficaz para la identificación de patrones y la segmentación de unidades de suelos en función de características geomorfológicas y ambientales. Esta técnica, desarrollada por Lin y Lee (1996), combina el modelo de mapas autoorganizados (SOM) propuesto por Kohonen (1982) con la lógica difusa (Bezdek *et al*., 1992), permitiendo una clasificación flexible y adaptativa que considera la incertidumbre inherente a la naturaleza del suelo y las variaciones en el territorio.

La geomorfometría es una disciplina científica que se encuentra en la intersección de la geoinformática, la teledetección, la fotogrametría y las matemáticas computacionales, y que se ocupa del modelado matemático y el análisis de la topografía, así como de las relaciones entre la topografía y otros componentes de los geosistemas (Hengl y Reuter, 2009; Florinsky, 2021). La geomorfometría moderna cuenta con una teoría física y matemática desarrollada y un potente conjunto de herramientas de métodos computacionales. Los datos iniciales para el modelado son los modelos digitales de elevación (MDE) (Guth *et al*., 2021).

La geomorfometría y el análisis del terreno han proporcionado una gran cantidad de datos topográficos y las herramientas correspondientes, lo que ha permitido obtener conocimientos sobre geomorfología, hidrología, ciencia del suelo y sistemas de información geográfica (SIG) en general. El uso de datos geomorfológicos, como los derivados de un MDE de alta resolución espacial y de imágenes satelitales, proporciona una base robusta para la identificación de las características del terreno que influyen en la formación y distribución de los diferentes tipos de suelos (Xion *et al.,* 2022).

El análisis geomorfométrico ha sido empleado para caracterizar cuencas hidrográficas, y priorizarlas para la implementación de prácticas de conservación del agua utilizando técnicas de SIG y teledetección, donde el relieve corresponde a zonas montañosas (Bogale *et al.,* 2023). En general, estos análisis en áreas de alta

montaña se realizan utilizando MDE y técnicas de clasificación automatizada para estudiar la relación entre la morfología del terreno y la distribución de los suelos, destacando la importancia de los parámetros geomorfológicos (como índices topográficos de humedad, curvatura, grado y orientación de la pendiente del terreno, etc.) (Ehsani y Quiel 2008), lo cual contribuye a mejorar la clasificación de suelos.

En Venezuela, las redes neuronales difusas se han aplicado en el área de clasificación de paisajes y predicción de atributos del suelo en zonas de montaña (Viloria, 2007), en cartografía digital geomorfológica (Valera y Viloria, 2009; Valera et al., 2010; Viloria *et al.,* 2012, Valera, 2012; Sevilla, 2014; y Viloria *et al*., 2016), en la predicción de propiedades y clases locales de suelo (Valera, 2015; Valera, 2018), en el estudio de las relaciones suelo y rendimiento del cultivo de banano (Rey *et al.,* 2015) y en la delimitación de clases de fertilidad (Valera y Orta, 2018). Estos estudios brindan un contexto actualizado sobre el uso de herramientas geomorfológicas y su impacto en la clasificación de suelos, lo que podría complementar la investigación sobre el uso de redes difusas para el análisis geomorfológico en el área de estudio.

En este trabajo se emplea la red de agrupamiento difuso de Kohonen para realizar una evaluación geomorfométrica del paisaje en un sector de la cuenca media del río Manapire, ubicada al suroeste de Espino, en el municipio Infante del estado Guárico, Venezuela. La aplicación de este enfoque tiene como objetivo identificar las unidades geomorfológicas del área de estudio, que servirán como base para la clasificación taxonómica de los suelos a nivel de subgrupos, considerando tanto su variabilidad espacial como las relaciones entre los factores ambientales que los condicionan. La investigación se plantea como un paso hacia una caracterización más detallada y precisa de paisajes de altiplanicie y su relación con la taxonomía de suelos, en la cuenca del río Manapire (Guárico, Venezuela), con miras a su adecuada gestión y conservación *a posteriori.*

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La zona de estudio corresponde a un sector de la cuenca media del rio Manapire, en los Llanos Altos Centrales de la región Sur-oriental del estado Guárico (Venezuela). Ocupa una superficie de 36.659,4 ha y se encuentra ubicada entre las coordenadas UTM Norte: 933.985,1 m - 949.554,2 m, y Este: 825.576,1 m - 802.013,6 m (Figura 1). El área evaluada limita por el Norte con la Quebrada la Malena y la parte central de la Mesa La Malena, por el Este con las cercanías a la población de Espino y el río Espinito, por el Sur con el sector Rabanal y por el Oeste con el río Manapire en la parte Nor-oriental y en la parte Sur-oriental con las cercanías a la quebrada Santa Clara.

Desde el punto de vista geológico, en el sector convergen materiales sedimentarios del cuaternario antiguo (Pleistoceno) formando mesas muy recortadas por la erosión y de sedimentos heterométricos, y afloramientos de formaciones del Terciario (Oligoceno-Mioceno) (Vivas, 2007). En contacto con estas mesas se encuentran las amplias superficies de llanuras rellenadas por sedimentos aluviales recientes (Pleistoceno-Holoceno), provenientes de los cursos de agua que drenan desde la

serranía del Interior.

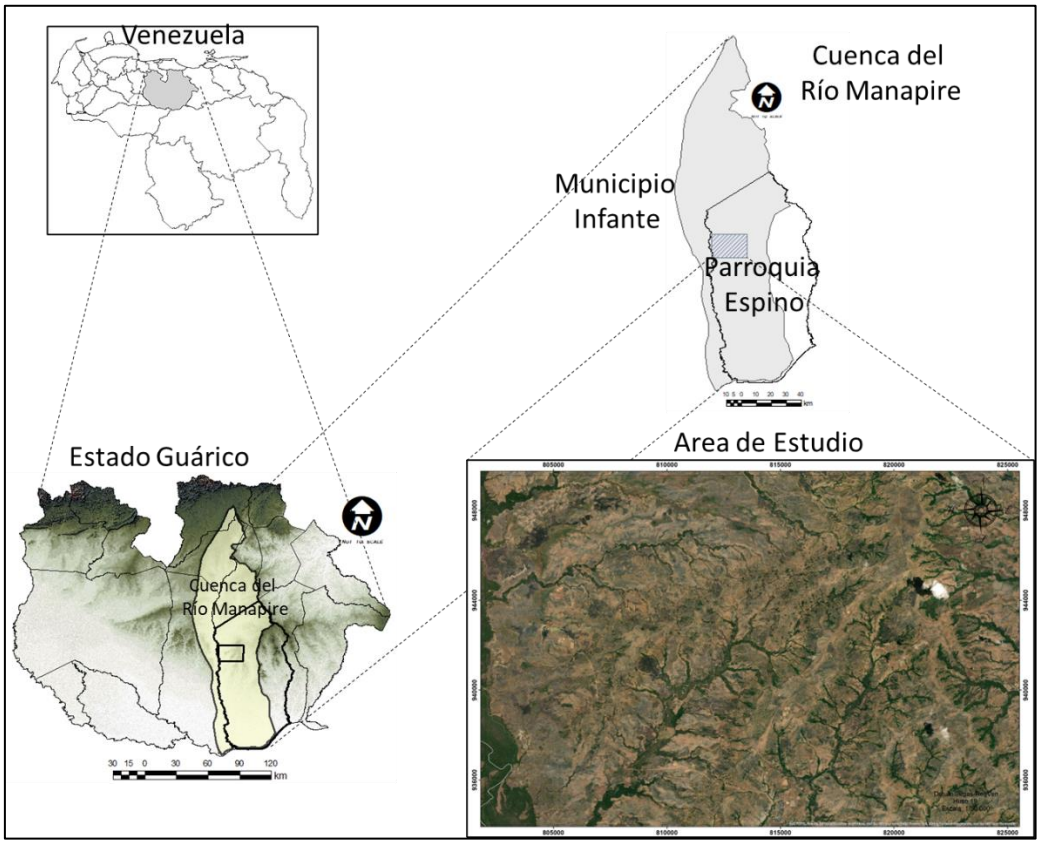


Figura 1. Ubicación relativa del área de estudio en la cuenca del rio Manapire en los Llanos Centrales del Estado Guárico, Venezuela.

Desde el punto de vista geomorfológico en el sector evaluado convergen paisajes de altiplanicie de mesa y superficies de denudación con unidades de paisaje de lomas y colinas medias con un relieve ondulado y fuertemente ondulado, y pendientes entre 3-8% y 8-20%. Desde el punto de vista climático, las condiciones pluviométricas son más secas en la zona. La estación seca, aun cuando dura seis meses (de noviembre a abril) es algo acentuada en esta parte del estado Guárico, aunque más hacia al sur, las condiciones pluviométricas comienzan a hacerse más húmedas. La estación Toro Negro reporta precipitaciones promedio mensuales cercanas a los 1.300 mm anuales; la temporada seca se inicia en noviembre y culmina en abril, mientras que la lluviosa va de mayo a octubre (Calzadilla, 2007).

Procesamiento de la información cartográfica

Para la subdivisión del área en unidades litológicas se utilizó un mapa geológico digital (Mapa F-8) a escala 1:100.000 (*Creole Petroleum Corporation,* 1956) que cubre la zona de estudio, la cual se encuentra ubicada en el Bloque 8 de la Faja Petrolífera del Orinoco. También se utilizaron hojas cartográficas y ortofotomapas a escala 1:25.000, corregidas geométricamente en el sistema de proyección UTM (*Datum* Sirgas-Regven, Huso 19).

Las curvas de nivel se vectorizaron con separaciones de 20 m de altitud, al igual que la red hidrográfica, el límite del sector y los puntos de control, y con estas coberturas vectoriales se realizó la interpolación de un MDE base de 20 m de resolución espacial (modelo *raster*) por medio del comando *Topogrid* de ArcGis 10.8® (ESRI, 2020), el cual utiliza el método *Anudem* (Hutchinson *et al*., 2011). (Figura 2).

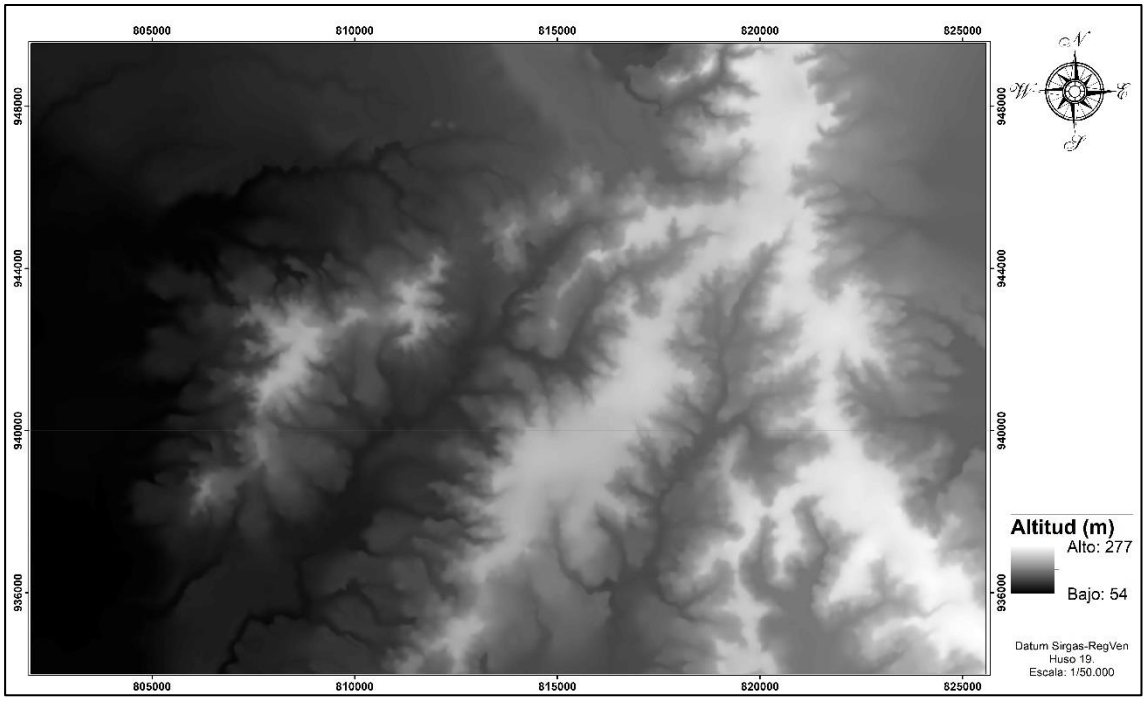


Figura 2. Modelo digital de elevación de la zona de estudio

Parámetros descriptivos de la superficie de terreno

El MDE de 20 m de resolución espacial se utilizó para derivar mapas de diversos parámetros topográficos. Estos incluyeron: altitud, grado de pendiente, posición relativa (PR), curvatura vertical (Perfil_V), curvatura horizontal (Plano_H), área de captación (Area_C), índice topográfico de humedad (ITH), la distancia vertical a la red de canales (Dist_C) y el índice de transporte de sedimentos (ITS).

Los parámetros topográficos fueron calculados con apoyo del programa SAGA GIS® (Conrad *et al*., 2015). El grado de la pendiente fue determinado empleando la ecuación de Zevenbergen y Thorne (1987), quienes utilizan un algoritmo de diferencia finita de segundo orden, ajustado a los cuatro (4) vecinos más cercanos en la ventana de píxeles.

Los parámetros de la curvatura (plano y perfil) también se basaron en el algoritmo de Zevenbergen y Thorne (1987) sobre ventanas de 3x3 celdas. El área de captación se obtuvo mediante el algoritmo de Tarboton *et al.* (1991), el cual utiliza un polinomio cuadrático con 9 términos. El índice de humedad (ITH) fue determinado según la ecuación: ITH=*ln (Area_C/Pendiente°)* (Gessler *et al*., 1995; Wilson y Gallant, 2000). El índice ITS se determinó a partir de la ecuación ITS=$(n+1)\ (Area_C/22{,}13)^n$ (*sen*

Pendiente°/0,0896)^{m}, donde n=0,4, m=1,3 (Moore *et al*. (1993).

La posición relativa (PR) se determinó mediante la fórmula: PR = ([*MDE*]-[MDE_{Min}]/([MDE_{Max}]-[MDE_{Min}]), donde *Max* y *Min* corresponden a las estadísticas máximas y mínimas derivadas del MDE original, en una ventana de 3x3 celdas. En el Cuadro 1 se presenta un resumen conceptual del significado físico de cada uno de los atributos topográficos mencionados, con sus respectivas fuentes bibliográficas.

Cuadro 1. Atributos topográficos utilizados en la clasificación digital del terreno en un sector de los Llanos Centrales Altos.

Atributo	Definición	Referencia
Altitud	Se conoce también como gradiente topográfico, y está relacionado con el valor representado por cada píxel en un modelo digital de elevación (MDE). Constituye la primera derivada del modelo de elevación respecto a los ejes de coordenadas.	Burrough y McDonnell (1998). Zevenbergen y Thorne (1987)
Pendiente	Es la tasa de cambio de la altitud en dirección descendente, y está referida a la inclinación que presenta la superficie del terreno con respecto a un plano imaginario horizontal. Se corresponde con la derivada de primer orden de la altitud.	Moore *et al.*, (1993). Burrough y McDonnell (1998)
Curvatura Horizontal (Plano H)	Curvatura en dirección transversal a la pendiente o cambio de la pendiente con la distancia en dirección transversal (curvatura horizontal). Es una medida de la divergencia o convergencia topográfica, y de la concentración del agua en el paisaje. Adopta valores positivos en las formas convexas y negativos en las cóncavas	Zevenbergen y Thorne (1987)
Curvatura Vertical (Perfil V)	Curvatura en dirección de la máxima pendiente o tasa de cambio de la pendiente en dirección vertical. Es un atributo que determina el camino del agua y la deposición de materiales, y es utilizada para caracterizar los cambios en la velocidad de la escorrentía y en el transporte de sedimentos.	Moore *et al*. (1993)
Área de captación (Área C)	Es el número de celdas ladera arriba que drenan a través de cada celda del modelo. Es proporcional a la escorrentía superficial o subsuperficial poco profunda en un punto dado del paisaje e integra los efectos del área de contribución ladera arriba y la convergencia y divergencia de la cuenca para la escorrentía.	Tarboton *et al.* 1991. Moore *et al*.m(1993). Wilson y Gallant (2000)
Índice topográfico de humedad (ITH)	Es un predictor de zonas de saturación del suelo y relaciona el área de captación específica con el grado de la pendiente.	Gessler *et al.* (1995); Wilson y Gallant (2000)
Índice de transporte	Representa los efectos del relieve sobre los procesos de transporte de los sedimentos, es una medida de la capacidad de transporte	Wilson y Gallant, (2000).

sedimentos (ITS)	de sedimentos del flujo de agua en un punto dado del paisaje. Predice localizaciones de áreas de erosión y deposición neta.	Hengl y Rossiter, (2003)
Dist_C. (Distancia vertical a la red de canales)	La distancia vertical a la red del canal es una forma de determinación y presentación de la profundidad de la fragmentación del relieve. El parámetro está relacionado con la susceptibilidad a la erosión, la cual se incrementa desde las alturas inferiores a las superiores.	Bock y Koethe (2008)
Posición relativa (PR)	Se refiere a la relación entre la posición de un punto elevado con respecto a otro más bajo en una ventana de 3x3 celdas de un MDE. Las posiciones relativas altas se acercan a la unidad (1) y las posiciones relativas bajas tienden a cero (0).	Verbrugge (2006)

Para la obtención del índice de vegetación de diferencia normalizada *(Normalizad Difference Vegetation Index*, NDVI) (Rouse *et al*., 1974), se empleó una imagen de satélite multiespectral (2012) del satélite Miranda (VRSS-1, *Venezuelan Remote Sensing Satélite*), de 16 m de resolución espacial (Figura 3), tomando en cuenta la banda roja visible (B3 [Red]: 0,63 µm - 0,69 µm) y la banda infrarroja cercana (B4 [NIR]: 0,77 µm - 0,89 µm) del espectro electromagnético (NDVI=*NIR-Red*/*NIR+Red*), para lo cual se utilizó el programa SAGA GIS (2015).

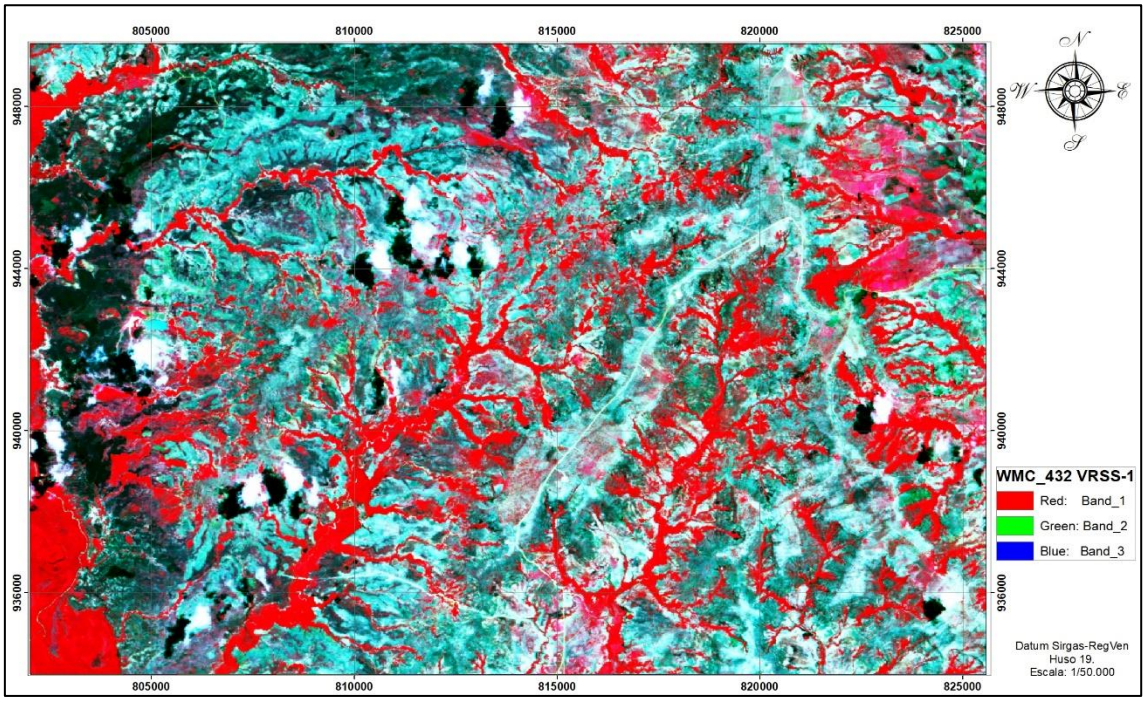


Figura 3. Imagen en falso color (432) del Satélite Miranda (VRSS-1).

Sistema clasificador del terreno: Red de agrupamiento difuso de Kohonen (FKCN)

La red neuronal FKCN utilizada en el análisis morfométrico consta de tres capas. La capa de entrada contiene los valores normalizados de 10 variables ambientales procedentes del MDE y de la imagen de satélite; la capa de distancias tiene una

cantidad de neuronas equivalente al número preestablecido de clases geomorfométricas, y la tercera capa calcula la función de pertenencia de cada celda para cada una de las clases de terreno, basada en las distancias computarizadas en la capa anterior y los valores preestablecidos del coeficiente de borrosidad (ϕ).

Los atributos topográficos y la variable NDVI fueron agrupados en una matriz de datos bajo formato *ASCII (American Standard Code for Information Interchange,* Código Americano Normalizado para el Intercambio de Información), para la aplicación del sistema de clasificación FKCN en cada uno de los MDE con sus respectivas resoluciones. Se evaluó el agrupamiento de píxeles con diversos números de clases (6 a 12) y diferentes coeficientes de borrosidad (ϕ= 1,1 a 1,6), ya que la magnitud de este exponente determina el grado de borrosidad del modelo.

La red entrenada genera un archivo que contiene el mapa final en formato *ASCII*, el cual consiste en la integración de los archivos de los valores de similitud representativos de cada clase (> 0,5). El mapa se puede visualizar en el sistema FKCN o en cualquier programa SIG, previa conversión del formato (e.g. *ASCII* a *raster*).

Número óptimo de clases morfométricas del terreno

Para la obtención del mejor modelo generado por el sistema FKCN se utilizó un enfoque inductivo, basado en el procedimiento de Odeh *et al.* (1992), el cual relaciona el índice de borrosidad alcanzado (FPI, *Fuzziness Performance Index*) con el número de clases. Estos parámetros se obtienen utilizando el algoritmo *Fuzzy C-means* (FCM) (Bezdek, 1981) del programa *Fuzme* 3.5 (Minasny y McBratney, 2002), o el algoritmo FKCN.

En el agrupamiento, el algoritmo FCM utiliza una función objetiva (J) para minimizar los errores de la suma de cuadrados dentro de las clases. Esta función se define mediante la siguiente fórmula:

$$J = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{c} (\mu_{ik})^{\phi} D^2(x_i c_k) \quad (1)$$

donde, ***n*** es el número de datos; **c** el número de clases; $\mathbf{c_k}$ es el vector que representa el centroide de la clase **k**; $\boldsymbol{x_i}$ es el vector que representa los datos individuales ***i***; $\mathbf{D^2}$ $\boldsymbol{(x_i c_k)}$ es la distancia al cuadrado entre $\boldsymbol{x_i c_k}$ de acuerdo con la distancia seleccionada (Mahalanobis) y ϕ es el exponente que determina el grado de borrosidad. El término $\boldsymbol{\mu_{ik}}$ se refiere a la función de membresía para **n** objetos **i** agrupados en **c** clases. La derivada de los valores de la función objetiva (OFV) con respecto a los coeficientes de borrosidad (-dJ/dϕ) para distintos números de clases, genera el mejor valor de ϕ.

La selección del número óptimo de clases en FCM se realizó por repetición de la clasificación para un rango de número de clases (entre 6 y 12). En cada agrupamiento obtenido se generan dos parámetros de clasificación tales como el FPI y la entropía de partición modificada (MPE, *modified partition entropy*). El FPI estima el grado de

borrosidad generada por cada número específico de clases. Matemáticamente, se define como:

$$FPI = 1 - [(cF - 1)/(c - 1)] \quad (2)$$

Donde **c** es el número de clases y **F** es el coeficiente de partición calculado como:

$$F = (1/n)\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{c}(\mu_{ik})^2 \quad (3)$$

F es conceptualmente comparable a la relación del conjunto de varianzas dentro de las clases y la varianza entre clases y es cercana a 1 para los agrupamientos más significativos. Cuando F es igual a 1, el FPI será igual a 0 y las clases serán discretas (no difusas) ya que las subestructuras estarán bien diferenciadas entre sí. Si el FPI es igual a 1 (F=0), la borrosidad en el conjunto de datos será máxima. De esta manera, la minimización de FPI indica un número óptimo de clases difusas que reflejan adecuadamente el comportamiento del conjunto de datos

Significado geomorfológico de las clases digitales de superficie de terreno

A las clases geomorfométricas obtenidas se les asignó el significado geomorfológico a través de una interpretación de las descripciones de sus centroides (concepto central de la clase) y su distribución espacial. También se consideraron los mapas en formato *raster* de los valores de membresías obtenidos con el algoritmo FKCN, conjuntamente con la información litológica dominante en el sector de estudio (Viloria et al., 2016; Valera, 2018).

Validación del mapa de unidades geomorfológicas

Para la validación de las unidades geomorfológicas se realizó la evaluación mediante una matriz de confusión y el índice Kappa (***k***). La matriz de confusión se elaboró a partir de los valores del área que representa cada clase (unidad geomorfológica) en el mapa temático obtenido por el sistema de clasificación FKCN y un mapa de puntos de muestreo utilizado como datos de referencia, basados en una imagen de satélite Spot de 5 m de resolución espacial y el juicio de expertos, con apoyo de ortofotomapas de la zona de estudio y mapas de sombra (*hillshade*) derivados de MDE del satélite Alos Palsar (The *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) de 12,5 m de resolución espacial.

El índice de acuerdo Kappa proporciona una evaluación global de la exactitud de la clasificación. Índice de Kappa (***k***):

$$\boldsymbol{k} = (\boldsymbol{Po} - \boldsymbol{Pe})/ (1 - \boldsymbol{Pe}) \quad (4)$$

Donde ***Po***: es la precisión global o concordancia general; ***Pe***: es la proporción esperada entre el mapa clasificado y los datos de referencia. Calcula una matriz de confusión con errores de omisión y comisión y deriva un índice de acuerdo kappa, una

intersección sobre la combinación de los mapas y una precisión global entre el mapa clasificado y los datos de referencia.

La matriz de confusión, posibilita confrontar la información de sitios de verificación con aquella de la base cartográfica que se pretende evaluar. Además, facilita no solo conocer el grado global de acierto, sino también las categorías en las que se producen tales confusiones. Los valores de error pueden utilizarse para corregir las estimaciones de superficie asignadas a cada unidad geomorfológica. La fórmula permite obtener la exactitud del usuario y la exactitud del productor para cada clase, así como un índice de acuerdo Kappa global. Estos índices de exactitud oscilan entre 0 y 1, donde 1 representa el 100 por ciento de exactitud (Chuvieco, 2008).

Para la evaluación de la confiabilidad temática el tamaño de muestra se basó en muestreo de celdas (pixel), y se calculó mediante la fórmula:

$$\mathbf{n = Z\alpha^2 * (p) * (1\text{-}p) / c^2} \quad (5)$$

donde: ***n*** es el tamaño de muestra, ***Zα*** es el nivel de confianza (95%), ***p*** es la probabilidad o proporción esperada (0,5), y ***c*** es el margen de error (< 5%).

En síntesis, para el área de estudio (36.684,7 ha) con un total de 916.259 pixeles, se definió un tamaño de 9.505 pixeles de 20m x 20m, estipulando un valor de significancia del 5% (0,05), es decir, un nivel de confianza del 95%, y un margen de error de 1 % (±0,01).

Clasificación taxonómica de los suelos

Para la cartografía de suelos de la zona se utilizaron los límites de las clases geomorfométricas obtenidas como marco de referencia, combinando el conocimiento de las relaciones entre el suelo y el medio ambiente con las condiciones ambientales, donde el paisaje fue subdividido en unidades relativamente uniformes con relación a la influencia de los factores formadores de los suelos.

Para la obtención del modelo de categorías taxonómicas de suelo, se realizó un proceso de correlación de clases de suelo con base a la información de diferentes fuentes a escalas de gran visión (1:250.000). Entre los estudios citados se encuentran los siguientes: Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (COPLANARH, 1974), Estudio Agrológico de Guárico Central y Sur de Aragua (MARN, 1990), Sistemas Ambientales Venezolanos (MARN, 1982), y Evaluación Ecosistémica de la Faja Petrolífera del Orinoco (PDVSA, 2006). Posteriormente, se validó la correlación entre la clasificación geomorfométrica y las características del suelo con la descripción de dos calicatas en cada una de las áreas representativas de cada paisaje. Esta evaluación se realizó con base en un número limitado de clases de paisaje y las propiedades del suelo, de acuerdo con la taxonomía de suelos a nivel de subgrupos (*Soil Survey Staff*, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Número óptimo de clases digitales de superficie de terreno

Para la estimación de los modelos de las clases geomorfométricas mediante el sistema de clasificación neuro-difuso (FKCN), se utilizaron nueve (9) variables derivadas del MDE, una (1) variable derivada de la imagen satelital multiespectral (NDVI), más la información geológica de la zona.

El Cuadro 2 indica los estadísticos descriptivos de estas variables, calculados a partir del MDE base de 20 m de resolución. La variación del índice de rendimiento difuso (FPI) en función de los valores de exponente difuso (ϕ) y el número de clases geomorfométricas, se muestra en la Figura 4.

Cuadro 2. Parámetros estadísticos descriptivos del MDE del sector evaluado.

Atributo	Media	Máximo	Mínimo	Desv. Est.	Varianza
Altitud (m)	137	277	54	56	37530
PR	0,50	1,00	0,00	0.11	3,22
ITH	9	23	3	2.4	0,01
Area C (m^2)	134730	78747264	400	1807157	2,9E+09
Pendiente (rad)	0,05	0,58	0,00	0.07	3,28
Perfil V ($m.m^{-2}$)	0,000	0,227	-0,353	0.020	0,04
Plano H ($m.m^{-2}$)	0,000	0,251	-0,27	0.014	0,0037
Dist. C. (m)	15	100	0	17	0,0045
ITS	6	247	0	8.5	447,9
NDVI	0,20	0,72	-0,40	0.18	0,02

PR: Posición Relativa; Area_C: Área de Captación; ITH: Índice Topográfico de Humedad; Perfil V: Curvatura Vertical, Plano H: Curvatura Horizontal, Dist. C: Distancia Vertical a la Red de Canales, ITS: índice de Transporte de Sedimentos; NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Desv. Est.: Desviación estándar.

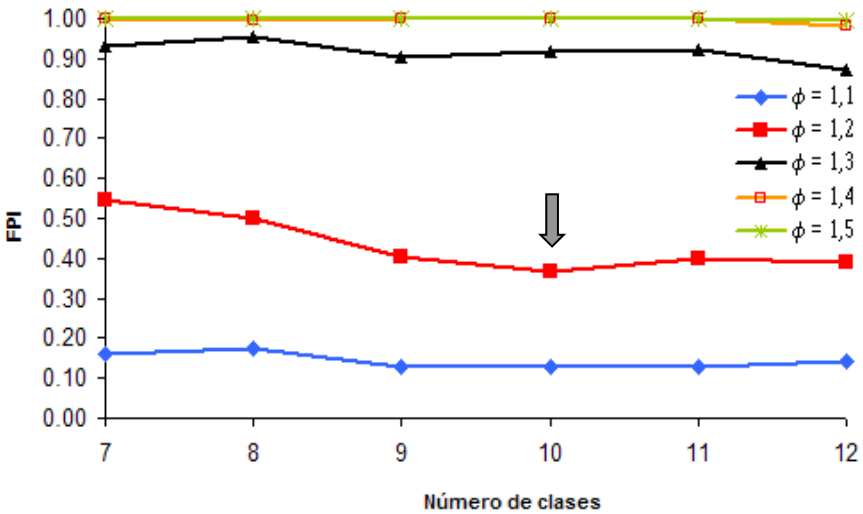


Figura 4. Variación del índice de rendimiento difuso (FPI) en función del número de clases para las variables ambientales.

En la figura indicada, el FPI varía de 0 a 1 y es una medida del grado de separación entre las clases difusas. Un valor igual a 0 indica que no hay borrosidad en los datos y las clases son discretas. Por el contrario, cuando FPI es igual a 1, la borrosidad es máxima, y cada elemento carece de una afiliación clara a cualquier clase, ya que todos los centros de clase tienen valores similares (Odeh *et al*., 1992).

El FPI se acerca al valor de la unidad (1) para todas las clases con valores ϕ comprendidos entre 1,3 y 1,5. Esto indica que la borrosidad alcanzada es máxima y no hay distinción entre clases, por lo que estos resultados son descartados como posibles modelos. También se observa que cuando el FPI se aproxima a cero (ϕ=1,1) se pierde la borrosidad del modelo, y los límites de las clases obtenidos tienden a ser más bruscos, lo cual tampoco es adecuado como modelo representativo.

Para todos los modelos obtenidos se destaca un punto de inflexión en la cual existe una minimización del FPI con un valor cercano a 0,40 (señalado con una flecha), que contribuye a la determinación del número óptimo de clases caracterizada por ser menos difusas y menos desorganizada internamente. Por esta razón, se seleccionó como número óptimo de clases el valor del punto de inflexión en las curvas correspondientes a ϕ= 1,2, obteniéndose 10 clases geomorfométricas para el MDE utilizado.

Significado geomorfológico de las clases digitales de superficie de terreno

La salida del sistema de clasificación FKCN permitió identificar unidades de paisaje, que pueden ser correlacionadas y descritas hasta el nivel de tipos de relieve del sistema de clasificación de paisaje propuesto por Zinck (2012). El valor de los centroides obtenidos con los parámetros de entrenamiento de la red en cada una de las clases geomorfométricas, a 20 m de resolución se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Valores del concepto central de cada clase morfométrica del terreno identificada en la zona de evaluación.

Clase	Variables Auxiliares									
	Altitud (m)	**PR**	**Area C.** (m)	**ITH**	**Pendiente** (%)	**Perfil V** (mm^{-2})	**Plano H** (mm^{-2})	**DIST. C.** (m)	**ITS**	**NDVI**
1	171	0,47	39286	8	9,7	-0,93	-0,07	49	11	0,15
2	202	0,51	5375	6	22,5	0,48	0,29	18	23	0,14
3	76	0,46	867777	11	2,6	-0,40	-0,09	13	3	0,57
4	70	0,47	233282	11	1,0	-0,11	-0,07	6	1	0,21
5	164	0,55	4348	7	6,7	0,63	0,51	9	5	0,14
6	148	0,48	142580	10	2,5	-0,12	-0,15	8	3	0,36
7	236	0,56	6257	8	3,9	0,87	0,16	2	3	0,08
8	96	0,54	8200	9	2,6	0,22	0,13	6	2	0,08
9	123	0,47	25885	8	6,3	-0,60	-0,03	27	6	0,12
10	157	0,42	315671	9	7,7	-1,54	-0,80	43	12	0,51

PR: Posición Relativa, ITH: Índice Topográfico de Humedad, Perfil_V: Perfil de curvatura, Plano_H: Plano de

curvatura, ITS: Índice de Transporte de Sedimentos, NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

La red FKCN produjo un modelo espacial integrado de las diferentes clases geomorfométricas asignando a cada pixel la clase con el valor más alto de la función de pertenencia. En este modelo la clase 7 corresponde a la mesa plana conservada (materiales geológicos de la Formación Mesa), las clases 3 y 10 se relacionan con valles aluviales y coluvio-aluviales respectivamente, y las clases restantes correlacionan con planos inclinados y colinas bajas con diferentes grados de disección (dominancia de la Formación Mesa, con afloramiento de materiales geológicos del terciario en algunos sectores), las cuales presentan diferencias en altura relativa, curvatura del terreno y cobertura vegetal (Figura 5).

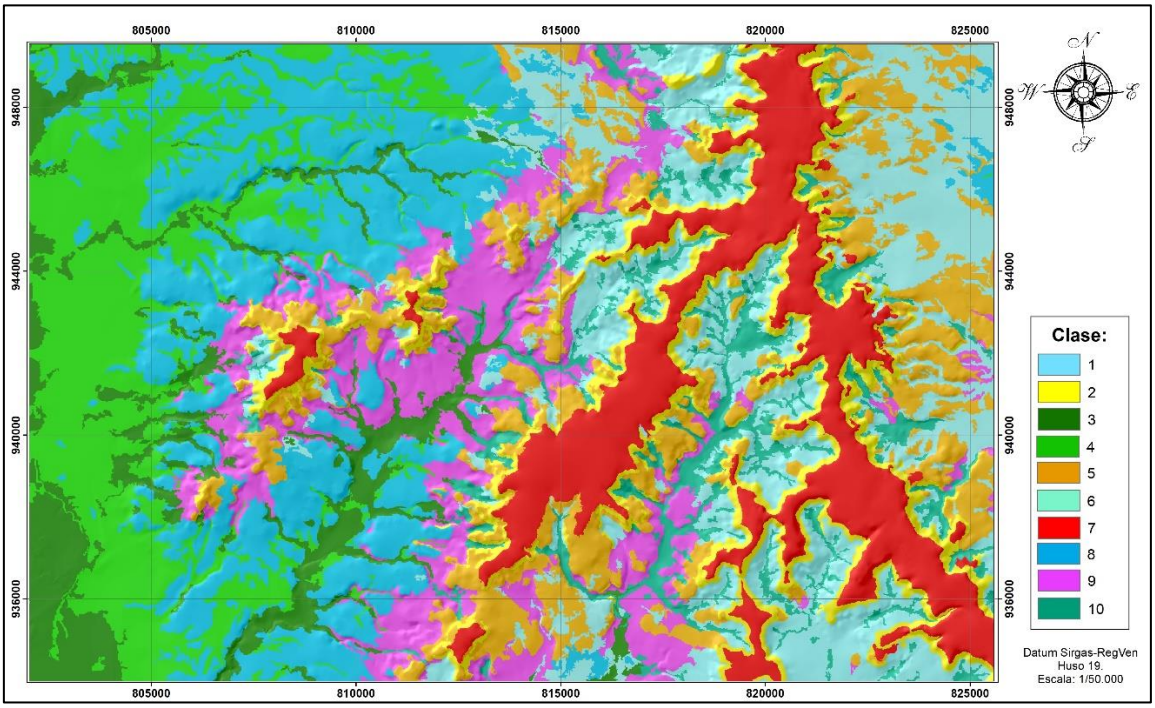


Figura 5. Clases geomorfométricas correlacionadas con tipos de relieve en paisajes de los Llanos Centrales Altos.

De la interpretación de los centroides de clase (Cuadro 3), la distribución espacial y los valores de similitud a cada clase, se derivó el siguiente significado geomorfológico de las clases geomorfométricas, cuya expresión geomorfológica a nivel de tipos de relieve se visualiza en la Figura 6.

La ***clase 7*** corresponde a las áreas más elevadas de la zona, con una altitud media de 236 msnm, pendientes planas de 4% y forma topográfica compleja convexa-lineal, lo que favorece el transporte y la pérdida de materiales. Estas áreas presentan los menores valores del índice de vegetación, lo que indica la escasa cobertura vegetal dominada principalmente por gramíneas. Sin embargo, tanto el ITH como el área de captación y el arrastre de materiales son bastante bajos, principalmente por la presencia de materiales pedregosos en la superficie. Esta unidad corresponde a la mesa plana conservada y ocupa una superficie de 11,3% del área levantada.



Clase 1. Planos inclinados fuertemente disectados.



Clase 2. Escarpes de mesa.



Clase 3. Valles aluviales.



Clase 4. Colinas bajas ligeramente disectadas.



Clase 5. Coluviones de mesa



Clase 6. Colinas bajas fuertemente onduladas.



Clase 7. Mesa plana conservada.



Clase 8. Planos inclinados ligeramente disectados.



Clase 9. Planos inclinados moderadamente disectados.



Clase 10. Vallecitos coluvio-aluviales.

Figura 6. Unidades de paisaje a nivel de tipo de relieve en el sector de altiplanicie de los Llanos Centrales, estado Guárico.

La ***clase 2*** se relaciona con las áreas de mayor pendiente con un promedio superior al 22%, con alturas superiores a los 202 msnm, con forma topográfica divergente (convexa-convexa). Presenta bajos a moderados valores de NDVI con una cobertura vegetal dominada por matorrales. La capacidad potencial de transporte de sedimentos es superior que en el resto de las unidades debido a la pendiente del terreno. Esta clase corresponde al escarpe de mesa, y ocupa una superficie de 6,7% del área levantada.

La ***clase 1*** corresponde a zonas con alturas medias de 171 msnm, con pendientes inclinadas del 10%. Presentan formas topográficas predominantemente cóncavas-lineales, lo que está relacionado con los mayores valores de las fragmentaciones del relieve, dado por la distancia vertical a la red de drenaje. La clase 1 se relaciona con los planos inclinados fuertemente disectados (con afloramiento de materiales geológicos del Terciario en algunos sectores) y se ubica cerca de los escarpes de mesa, dominando al valle coluvial. Ocupa una superficie de 8,2% del área levantada.

La ***clase 5*** corresponde a relieves con una altitud de 164 msnm, con una pendiente del terreno cercana al 7% y formas topográficas divergentes (convexa-convexa). La unidad presenta la menor área de captación y muy poca posibilidad de acumulación de humedad superficial, lo que influye actualmente en una baja susceptibilidad a los procesos erosivos. La clase corresponde principalmente a áreas dominadas por coluviones de mesa, y ocupa el 11,7% de la superficie de la zona evaluada.

La ***clase 3*** pertenece a unidades de relieve alargadas en las posiciones más bajas de la zona, con alturas comprendidas de 76 msnm, con pendientes planas menores al 3%, orientada hacia el Sur-oeste. Presenta formas topográficas convergentes de alta concavidad (cóncava-cóncava), y tiene valores altos de área de captación e índice de humedad, con valores de NDVI indicativos de una cobertura vegetal dominada por bosques ribereños y actúa como depósito de los materiales provenientes de las partes más altas. La clase 3 corresponde a valles aluviales, y ocupa el 7,1% de la superficie levantada.

La ***clase 10*** también se relaciona con unidades alargadas, pero con alturas medias de 157 msnm, con pendientes cercanas al 8% y orientación al Sur y Sur-este, con formas topográficas convergentes. Presenta altos valores de área de captación e índice de humedad y valores de NDVI con una cobertura dominada por vegetación boscosa, matorrales y morichales, que disminuye la escorrentía y el transporte de sedimentos. Son zonas altamente fragmentadas con una marcada red de drenaje, y corresponde a tipo de relieve de vallecitos coluvio-aluviales que se originan en las cercanías de la mesa conservada. Ocupa el 5,5% de la zona evaluada.

Las ***clases 4 y 8*** se relacionan con áreas planas a ligeramente inclinadas, con alturas medias comprendidas entre 70 y 96 msnm, con pendientes entre 1 y 3%, respectivamente, con formas topográficas rectilíneas y convexa-lineales. Ambas clases son colindantes, pero difieren principalmente en cuanto al área de captación, índice topográfico de humedad e índice de vegetación, siendo superiores todos estos

valores en la clase 4, por su posición relativa más baja. La clase 4 corresponde a planos inclinados ligeramente disectados y la clase 8 está relacionada con colinas bajas ligeramente disectadas, ocupando 13,9 y 17,7% respectivamente de la superficie levantada.

La ***clase 6*** corresponde a tipos de relieve dominados por colinas con alturas medias de 148 msnm, con pendientes planas menores de 10%. Presentan formas topográficas predominantemente lineales-cóncavas con ligeras fragmentaciones, lo cual incide en altos valores de índice topográfico de humedad y moderados valores del área de captación. El NDVI indica la presencia de una cobertura vegetal conformada por matorrales dispersos. La clase 6 se relaciona con relieve de colinas bajas fuertemente onduladas (con afloramiento de materiales geológicos del Terciario en algunos sectores) y ocupa una superficie de 7,6% del área levantada.

La ***clase 9*** corresponde a tipos de relieve dominados por relieves de planos inclinados, pero con alturas medias de 123 msnm, con pendientes menores de 10%. Presentan formas topográficas predominantemente complejas cóncavas-lineales con moderadas fragmentaciones, lo cual incide en altos valores de índice topográfico de humedad y moderados valores del área de captación. El NDVI corresponde a una cobertura dominada por vegetación herbácea y árboles dispersos. La clase 9 se relaciona con planos inclinados moderadamente disectados y ocupa una superficie de 10,3% del área levantada.

Un resumen de las correlaciones entre las diferentes clases morfométricas y las unidades geomorfológicas a nivel de tipo de relieve se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Correlación entre clases geomorfométricas y las unidades de paisaje en los Llanos Centrales Altos.

Clase	Unidades Geomorfológicas (tipo de relieve)	Sup. (ha)	(%)
1	Plano inclinado fuertemente disectado	3.008,0	8,2
2	Escarpe de Mesa	2.467,2	6,7
3	Vallecito aluvial	2.601,3	7,1
4	Plano inclinado ligeramente disectado	5.107,0	13,9
5	Coluviones de Mesa	4.290,7	11,7
6	Colinas bajas fuertemente onduladas	2.769,0	7,6
7	Mesa plana conservada	4.131,1	11,3
8	Colinas bajas ligeramente disectadas	6.491,9	17,7
9	Plano inclinado moderadamente disectado	3.792,5	10,3
10	Vallecito coluvio-aluvial	2.000,6	5,5
Total		**36.659,4**	100,00

En el cuadro anterior se evidencia la gran superficie dominada los tipos de relieve de colinas disectadas y coluviones de Mesa (37% del área), las cuales en su mayoría presentan alta pedregosidad y rocosidad superficial. También destaca el tipo de relieve dominado por planos inclinados con diferentes grados de disección con un 32,5% de

la superficie total. De igual manera, la mesa plana conservada y los escarpes de mesa ocupan el 18% de la superficie estudiada, atravesando la zona en sentido Norte-Sur; y los valles aluviales y coluvio-aluviales representan el 12,6% de la zona.

Validación del mapa de unidades geomorfológicas

Los resultados de la matriz de confusión obtenida a partir de los valores de área que representa cada unidad geomorfológica obtenida por el sistema de clasificación FKCN y el mapa de puntos de muestreo utilizado como datos de referencia, se indican en el cuadro 5.

Cuadro 5. Matriz de confusión obtenida de la evaluación de las unidades geomorfológicas en la zona de estudio.

Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	Error Comisión
1	766	7	0	15	0	7	0	0	0	0	795	29
2	0	642	10	21	5	4	0	0	0	0	682	40
3	0	0	285	4	0	0	0	0	0	0	289	4
4	0	0	1	510	11	11	2	0	1	0	536	26
5	0	0	0	4	1317	9	6	0	0	0	1336	19
6	0	0	0	4	12	724	14	6	0	0	760	36
7	0	0	0	1	0	10	703	12	1	0	727	24
8	0	0	0	0	3	15	2	1106	0	0	1126	20
9	1	0	0	0	0	3	5	30	1862	4	1905	43
10	0	0	0	0	0	1	0	12	7	1043	1063	20
Total	767	649	296	559	1348	784	732	1166	1871	1047	**9219**	-
Error Omisión	1	7	11	49	31	60	29	60	9	4	-	**8958**

De la matriz anterior se obtuvo que la precisión global o concordancia general fue de 97,2%; la proporción esperada entre el mapa clasificado y los datos de referencia fue de 12,2%, y el índice Kappa fue igual a 0,968 lo cual indicó una muy buena concordancia entre el mapa obtenido con el algoritmo FKCN y los puntos de referencia. La clase 4 (plano inclinado ligeramente disectado), la clase 6 (colinas bajas fuertemente onduladas) y la clase 8 (colinas bajas ligeramente disectadas) presentaron ligeros errores de omisión, pero no comprometen las exactitudes de productor en la evaluación realizada, ya que las mismas son superiores al 91% en las tres unidades.

Clasificación taxonómica y correlación de los suelos con las unidades geomorfológicas

Para la correlación de los suelos con los tipos de relieve de las unidades de paisaje se emplearon los componentes taxonómicos derivados de los estudios de suelo, actualizados con chequeos en campo y análisis de los horizontes pedogenéticos de los perfiles muestreados en campo. Las correlaciones entre las asociaciones de suelos a nivel de subgrupos taxonómicos y las unidades de paisaje a nivel de tipos de

relieve, se presentan en el Cuadro 6; y la distribución espacial de las clases de suelo se indican en la Figura 7.

Cuadro 6. Correlación entre tipos de relieve y categorías taxonómicas de los suelos de altiplanicie.

Clase	Tipo de Relieve	Composición Taxonómica	Área (ha)	Área (%)
1	Plano Inclinado fuertemente disectado	*Typic Usthorthents - Oxic Dystrustepts*	3.008,0	8,2
2	Escarpe de Mesa	*Lithic Usthorthents - Typic Dystrustepts*	2.467,2	6,7
3	Valle Aluvial	*Dystric Haplustepts - Aeric Epiaquepts - Aquic Ustipsamments*	2.601,3	7,1
4	Plano inclinado ligeramente disectado	*Oxic Dystrustepts - Aeric Epiaquepts*	5.107,0	13,9
5	Coluviones de Mesa	*Typic Usthorthents - Oxic Dystrustepts*	4.290,7	11,7
6	Colinas bajas fuertemente onduladas	*Dystric Haplustepts - Typic Dystrustepts*	2.769,0	7,6
7	Mesa plana conservada	*Typic Kandiustults - Oxic Dystrustepts*	4.131,1	11,3
8	Colinas bajas ligeramente disectadas	*Plinthic Kandiustults - Aquic Dystrustepts*	6.491,9	17,7
9	Plano inclinado moderadamente disectado	*Plinthic Kandiustults - Oxic Dystrustepts*	3.792,5	10,3
10	Vallecitos Coluviales	*Aquic Dystrustepts -Typic Usthorthents*	2000,6	5,5
	Total		**36.659,4**	**100,00**

Bajo este enfoque de predicción se agrupan suelos que se diferencian principalmente por el grado de desarrollo pedogenético. De esta manera, en los relieves dominados por la mesa plana y los escarpes de mesa, se presentan aquellos suelos más evolucionados donde destacan la asociación de subgrupos *Typic Kandiustults - Oxic Dystrustepts*. Desde el punto de vista químico, los suelos se caracterizan por ser muy ácidos, con bajos contenidos de bases cambiables, baja capacidad de intercambio catiónico y muy bajos contenidos de carbono orgánico. Desde el punto de vista físico, algunos presentan aumento del contenido de arcilla con la profundidad (presencia de endopedón argílico), con grandes problemas erosivos.

En algunas zonas de la mesa plana, los suelos no presentan incremento del contenido de arcilla con la profundidad, pero son comunes la presencia de óxidos de hierro y alta pedregosidad superficial, como el caso de los suelos que presentan carácter *Oxic* a nivel de subgrupo. La asociación de estos suelos es representativa de las mesas La Malena, Rabanal y El Salado, y de la región Sur-occidental del sector estudiado, al Sur del sector Santa Clara.

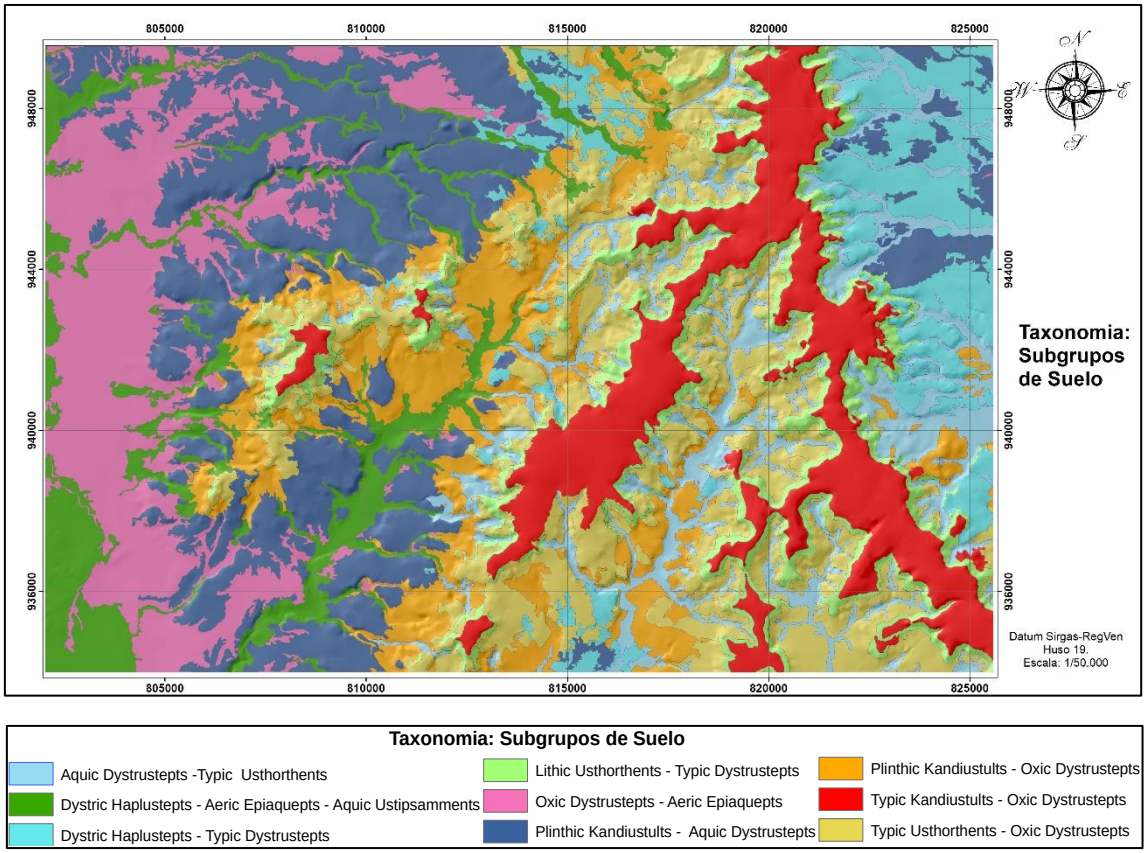


Figura 7. Distribución espacial de los principales subgrupos de suelo en un sector de los Llanos Centrales Altos.

En las áreas correspondientes a tipos de relieve conformadas por colinas bajas fuertemente onduladas, colinas bajas ligeramente disectadas y superficie con coluviones de mesa, dominan suelos que alternan un alto desarrollo pedogenético con un moderado grado de evolución. Estos tipos de relieve presentan asociaciones de los siguientes subgrupos taxonómicos: a) *Dystric Haplustepts - Typic Dystrustepts*, b) *Plinthic Kandiustults - Aquic Dystrustepts* y c) *Typic Usthorthents - Oxic Dystrustepts*.

Los suelos de estas asociaciones también son de reacción fuertemente ácida, con baja capacidad de intercambio catiónico y baja saturación con bases en el complejo de cambio. Sin embargo, existen diferencias marcadas entre ellas, ya que la primera asociación conjuga suelos de materiales finos en el perfil sin acumulación de arcilla iluvial. La segunda asociación presenta unos suelos con incremento de arcilla con la profundidad, presencia de sesquióxidos de hierro y plintita a menos de 125 cm de profundidad, y otros tienen condiciones de drenaje imperfecto. La tercera asociación está constituida por suelos por suelos de escasa profundidad efectiva y fuerte pedregosidad superficial y subsuperficial.

En la zona donde el relieve es dominado por planos inclinados fuertemente, moderadamente y ligeramente disectados, hay presencia de las siguientes asociaciones de subgrupos taxonómicos: a) *Typic Usthorthents – Oxic Dystrustepts*,

b) *Plinthic Kandiustults - Oxic Dystrustepts*, y c) *Oxic Dystrustepts - Aeric Epiaquepts*). En la mayoría de los casos los suelos presentan características similares a los predominantes en los sistemas de colinas, aunque con alta presencia de suelos imperfectamente drenados ya sea por acumulación o empozamiento del agua en las depresiones por tiempo suficientemente largo o por formación de mesa de agua colgante estacional, cerca de la superficie debido a la presencia de la plintita que interfiere en la permeabilidad del agua en el suelo.

Las áreas dominadas por los valles aluviales y los vallecitos coluvio-aluviales, presentan los suelos más recientes desde el punto de vista pedogenético. Las asociaciones de subgrupos taxonómicos dominantes son: a) *Dystric Haplustepts - Aeric Epiaquepts - Aquic Ustipsamments*, y b) *Aquic Dystrustepts - Typic Usthorthents*.

Los suelos presentan similares condiciones a los anteriores desde el punto de vista químico (Baja fertilidad, pH ácidos), aunque mejoran ligeramente con relación a la saturación con bases en el complejo de cambio. Sin embargo, existe con una alta variabilidad, tanto espacial como dentro del perfil. La primera asociación de suelos incluye situaciones con ciertos problemas de drenaje, con anegamientos por ciertos períodos, y también incluye suelos livianos excesivamente drenados (*Psamments*), lo que indica que dichos suelos son predominantemente arenosos. En resumen, se evidenció la dominancia de la asociación de suelos compuesta por los subgrupos Typic Usthorthents - Oxic Dystrustepts con 20% de la superficie total, *Plinthic Kandiustults - Aquic Dystrustepts,* ocupando el 17,2% de la superficie total, le sigue la asociación de los subgrupos *Oxic Dystrustepts - Aeric Epiaquepts*, con 13,9%.

CONCLUSIONES

La integración de técnicas geomorfológicas con modelos de clasificación no supervisada permitió superar algunas limitaciones de los métodos convencionales, ofreciendo una representación más precisa y dinámica de los patrones del terreno. Además, la capacidad de la lógica difusa para manejar la imprecisión y la incertidumbre en los datos, especialmente en ambientes de alta variabilidad, refuerza el potencial de este enfoque para contribuir a una mejor comprensión de la distribución de los suelos en la región de estudio.

Este método de clasificación no supervisada constituye una importante alternativa de apoyo al experto para la obtención de una visión más amplia e integral de la estructura del paisaje, a la vez que sirvió como base para la planificación y aplicación del método de muestreo de suelos para la evaluación de las relaciones suelo-paisaje y con fines ecosistémicos.

La correlación taxonómica permitió clasificar los suelos a nivel de subgrupos en cada una de las unidades geomorfológicas obtenidas en la zona correspondiente a paisajes de altiplanicie de los Llanos Centrales del estado Guárico.

La evaluación en los sitios de muestreo representativos indicó que las unidades geomorfológicas presentes corresponden a unidades de paisaje a nivel de tipo de

relieve, conformados por mesas planas conservadas, escarpes de mesa, valles aluviales y coluvio-aluviales, planos inclinados disectados y colinas disectadas, correlacionados con asociaciones de suelo de los subgrupos *Typic Dystrustepts, Typic Kandiustults, Typic Usthorthents, Plinthic Kandiustults, Lithic Usthorthents, Dystric Haplustepts, Aeric Epiaquepts, Oxic Dystrustepts, Aquic Dystrustepts y Aquic Ustipsamments.*

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales “Rómulo Gallegos” (CIESA-UNERG).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bezdek, J.C. (1981). Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum Press, New York. 256 p.

Bezdek, J.C., E.C. Tsao; and N.R. Pal. (1992). Fuzzy Kohonen Clustering Networks, in Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems 1992 (San Diego), pp. 1035-1043.

Bogale, A.G. Anwar A. Adem, Wolde Mekuria and Tammo S. Steenhuis. (2023): Application of geomorphometric characteristics to prioritize watersheds for soil and water conservation practices in the Lake Tana Basin, Ethiopia, Geocarto International, DOI: 10.1080/10106049.2023.2184502

Burrough, P.A.; and R.A. McDonnell. (1998). Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford, New York. 333 p

Calzadilla, A. (2007). Estado Guárico. GeoVenezuela. Capítulo 47. Tercera parte: Medio Físico y Recursos Ambientales. Fundación Empresas Polar. pp284-407. Caracas, Venezuela.

Chuvieco, E. (2008). Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. Ed. Ariel S.A.: Barcelona, 595 pp.

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Boehner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007, https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015.

COPLANARH. (1974). Inventario Nacional de Tierras Región Llanos Centro-Orientales y Orientales. Caracas. 415 p.

Ehsani, H.A. and F. Quiel. (2008). Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. Geomorphology 99:1-12

Florinsky, I.V., (2021). Geomorphometry today. InterCarto. InterGIS 27(2): 394–448 (in Russian, with English abstract). doi:10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Guth, P.L., Van Niekerk, A., Grohmann, C.H., Muller, J.-P., Hawker, L., Florinsky, I.V., Gesch, D., Reuter, H.I., Herrera-Cruz, V., Riazanoff, S., López-Vázquez, C., Carabajal, C.C., Albinet, C., and Strobl, P. (2021). Digital elevation models: terminology and definitions. Remote Sensing 13: 3581. doi:10.3390/rs13183581.

Hengl, T., and Reuter, H.I. (Eds.), 2009. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications.

Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

Hutchinson, M.F.; X. Tingbao; and J.A. Stein. 2011. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. Geomorphometry.org 19-22.

Kohonen, T. 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics 43, 59-69.

Kohonen, T. 1989. Self-Organization and Associative Memory. 3th edition. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokio. 312p.

Kohonen, T. 1991.Self-organizing maps: Optimization approaches. In Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks, pp981-990, Espoo, Finland.

Lin, C.; C. Lee. 1996. Neural fuzzy systems. Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA. 797 p.

MARNR. (1982). Sistemas Ambientales Venezolanos Proyecto VEN/79/001, Volumen 2, Número 18. Dirección General de Planificación y Ordenación del Ambiente. Caracas, Venezuela.

MARNR. (1990). Inventario Nacional de Tierras. Guárico Central y Sur de Aragua. Serie de Informes Científicos. DGSIIA/Zona 2/IC. Tomo I. Maracay Palmaven. 1992. Aná-lisis de Suelos y su Interpretación. 2da. Edición. Serie Técnica, Ediciones Palma-ven. Caracas. 12p

Moore, I.D.; P.E. Gessler; G.A. Neilsen; and G.A. Peterson. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 443-452.

Odeh, I.O.A.; A.B. McBratney, and D.J. Chittleborough. 1992. Soil pattern recognition with fuzzy c-means: application to classification and soil landform interrelationships. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 505- 516.

PDVSA. (2006). Evaluación de los sistemas ecológicos de la Faja Petrolífera del Orinoco como base para la ordenación territorial. Capítulo 4. Suelos. 123p.Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo. Gerencia de Ambiente. Caracas, Venezuela.

Rey, J.C., G. Martínez, E. Micale, N. Fernández, E. Namias, M.A. Polanco, y Valera, A. (2015). Mapeo de suelos por medio de lógica difusa y su relación con el rendimiento de banano (musa AAA). XXII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. San Cristóbal, Táchira. Venezuela. 6 p.

Rouse, J.W.; R.H. Haas; J.A. Schell; and D.W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. p. 309–317. In Proc. ERTS-1 Symp., 3rd, Greenbelt, MD. 10-15 Dec. 1973. Vol. 1. NASA SP-351. NASA, Washington, DC.

Sevilla, V. (2014). Comparación de dos métodos de cartografía digital con un estudio agrológico convencional en la Cuenca del Rio Canoabo, Estado Carabobo. Trabajo de Ascenso para optar a la Categoría de Asistente. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 117 p.

Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy. Twelfth Edition. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. NRCS-USDA. Washington DC. USA.

Tarboton, D.G.; R.L. Bras; and I. Rodriguez-Iturbe. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. Hydrological Processes 5: 81-100.

Valera A.R., M. Orta F. (2018). Aplicación de técnicas geoestadísticas y redes neuronales artificiales en la delimitación de clases de fertilidad de suelos. UNERG Agrocientífica 1 (1): 1-19

Valera, A. (2012). Tecnologías de Inteligencia Artificial: Redes neuronales artificiales y teoría de conjuntos borrosos para el análisis geomorfométrico de paisajes de montaña. Editorial Académica Española. ISBN: 978-3-8484-7612-1. 108 p.

Valera, A. (2015). Inventario de suelos y paisajes con apoyo de técnicas de cartografía digital en áreas montañosas. Caso Cuenca del Río Caramacate, Estado Aragua. Tesis de doctorado en Ciencias del Suelo. Universidad Central de Venezuela. Postgrado en Ciencias del Suelo. Maracay, Estado Aragua, Venezuela. 263 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1714.3920

Valera, A. (2018). Geomorfometría y Edafometría. Cartografía Digital de Paisajes y Suelos con Técnicas de Inteligencia Artificial. Editorial Académica Española. Mauritius. ISBN: 978-620-2-12102-6. 317p.

Valera, A., J.A. Viloria; y Viloria, Á. (2010). Aplicación de redes neuro-difusas en la clasificación geomorfométrica de paisajes montañosos de Venezuela. En: Resúmenes. XV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Morales, C., J. Cuervo y H. Franco (compiladores). SCCS. Risaralda, Pereira. Colombia. p.97.

Valera, A., y Viloria, J.A. (2009). Aplicación de técnicas de inteligencia artificial en el modelado de unidades de paisaje en la cuenca del río Güey, Maracay - estado Aragua. Memorias XVIII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Santa Bárbara, Zulia. Venezuela. 7 p.

Verbrugge, L. (2006). Depth of Soil in the Goss-Gasconade-Rock outcrop complex in Callaway County, Missouri using the Soil Land Inference Model (SoLIM). Thesis Degree of Master of Science.Northwest Missouri State University. 73 p.

Viloria J.A, A. Viloria-Botello, M.C. Pineda, y Valera, A. (2016). Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: A neuro-fuzzy approach. Geomorphology Vol. 253:199-207.

Viloria, A. (2007). Estimación de Modelos de clasificación de paisaje y predicción de atributos de suelos a partir de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 88 p.

Viloria, A., Núñez, H., y Viloria, J. (2012). Sistema Clasificador del Terreno por Fuzzy Kohonen. Versión 1.0. UCV. Facultad de Ciencias. Escuela de Computación. Centro de Ingeniería de Software y Sistemas. Laboratorio de Inteligencia Artificial. Caracas, Venezuela.

Vivas, L. (2007). El Cuaternario en Venezuela. Capítulo 10. GeoVenezuela. Tercera parte: Medio Físico y Recursos Ambientales. Fundación Empresas Polar. pp74-126. Caracas, Venezuela.

Wilson, J.P. and J.C. Gallant. (2000). Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley

& Sons, 479 p.

Xiong, Liyang, Li, Sijin, Tang, Guoan and Strobl, Josef. (2022). Geomorphometry and terrain analysis: data, methods, platforms and applications. Earth-Science Reviews. 233. 104191. 10.1016/j.earscirev.2022.104191.

Zevenbergen, L.W.; and C.R. Thorne. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms 12: 47-56.

Zinck, A. (2012). Geopedologia. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands. 131p.