

Metodología para la evaluación morfoedáfica en sistemas de laderas en zonas templadas

Luis Miguel Espinosa Rodríguez*

Recepción: 6 de marzo de 2008

Aceptación: 16 de enero de 2009

* Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Correo electrónico: geo_luismiguel@hotmail.com

Se agradece a Angélica Sáenz Jaimes la revisión y corrección del Abstract.

Resumen. Bajo el enfoque de la geografía del paisaje y desde una perspectiva original y de integración se presenta una metodología de análisis morfoedáfico. El proceso metodológico integra razonamientos del análisis geomorfológico y de la geografía del suelo, los cuales se expresan e interpretan desde un punto de vista holístico-territorial. El problema de investigación se centra en la resolución de fases terminales de evaluación geomorfológica y edáfica, y se aplica en tres sistemas de laderas localizados en el Sistema Volcánico Transversal.

El producto final de la investigación se concentra en un mapa morfoedáfico que representa resultados de los índices de desarrollo geomorfológico y de la relación de equilibrio edáfico con una leyenda que unifica los criterios de análisis.

Palabras clave: metodología, análisis morfoedáfico, sistema de laderas, desarrollo geomorfológico, relación de equilibrio edáfico.

Methodology for the Morphoedaphic Evaluation of Hill-Slope Systems in Temperate Zones

Abstract. From the point of view of Landscape Geography, and from an original and integration perspective, a methodology of morphoedaphic analysis is shown. The methodology process integrates reasoning from the analysis of Geomorphology and Soil Geography, which are analyzed and expressed from a holistic-territorial point of view.

The research problem is focused on setting up terminal phases of geomorphology and edaphology evaluation; and is applied in three hill-slope systems localized in the Mexican Transverse Volcanic System.

The final product is concentrated in a morphoedaphic map which represents the results of the geomorphologic developmental index and the relation of edaphic equilibrium with a legend which unifies the analysis criteria.

Key words: methodology, morphoedaphic analysis, hill-slope systems, geomorphologic developmental relation of edaphic equilibrium.

Introducción

Las propuestas y métodos de evaluación morfoedáfica que se desarrollaron en la década de los años ochenta poseen un carácter novedoso y aportan elementos importantes de descripción y análisis del territorio; sin embargo, resulta complejo encontrar una propuesta holística que se desarrolle bajo una concepción geográfica capaz de explicar el proceso de distribución espacial y los escenarios alternativos que presenta el territorio; todo ello expresado en un solo documento

cartográfico, habilitado para conformar e integrar una leyenda ordenada y jerarquizada que exhiba el comportamiento cualitativo y cuantitativo de las variables geomorfológicas, edáficas y sistémicas de un territorio particular (Espinosa, 2006).

A partir de esta idea, se considera que la integración del estudio del suelo y el relieve sustenta un estudio de evaluación de paisajes, partiendo de la premisa de que a cada unidad de suelo le corresponde un tipo particular de geoforma.

De acuerdo con lo anterior, en este proyecto de investigación se desarrolla una propuesta integral de evaluación morfoedáfica

de paisajes en laderas, en la cual las variables de estudio poseen un carácter dinámico, en el entendido de que cada una de ellas muestra atributos espaciales, desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo; en una escala de trabajo 1:50:000.

La hipótesis general de la investigación se fundamenta en que la selección, manejo e integración de variables geomorfológicas y edafológicas permiten la confección de un método paramétrico y cartográfico confiable que accede a la evaluación de sistemas de laderas.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo central de esta investigación se centra en proponer, desarrollar y validar un método práctico y eficiente para la evaluación de laderas.

El desarrollo de la investigación geomorfológico-edáfica en esta investigación descansa bajo una visión geosistémica, entendida ésta como un modelo teórico del paisaje establecido por diversos autores, como Bolós (1992), Strahler y Strahler (1999)

y King (1984), entre otros; ya que ésta explica las relaciones que prevalecen en el paisaje, entre las cuales destacan las conexiones específicas entre la estructura horizontal y vertical de los componentes. Este enfoque refiere una visión interdisciplinaria; y tiene como propósito identificarse como una base sólida para la conceptualización aplicada y orientada hacia trabajos de planeación física, evaluación de los recursos, organización de diferentes tipos de territorios en función de la cobertura y uso de suelo, y en la confección de sistemas geográficos regionales.

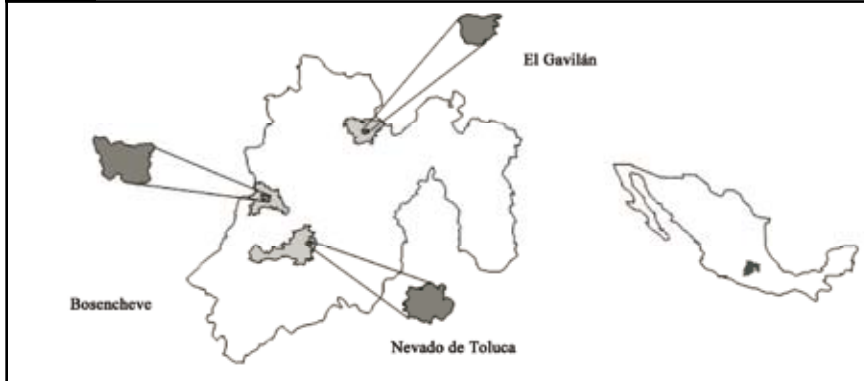
1. Zonas de muestreo y aplicación de la metodología

La metodología se aplicó y validó en sistemas de laderas del volcán Nevado de Toluca, en las del complejo volcánico El Gavilán y en el Parque Nacional Bosencheve. La figura 1 muestra la localización general de las zonas de aplicación y el cuadro 1

presenta datos específicos de cada unidad de muestreo.

La selección de las zonas de muestreo responde a la selección de criterios de funcionamiento de la metodología, considerando, por una parte, las condiciones paramétrico-estadísticas que permiten la comparación y ratificación de los resultados; asimismo, la elección obedece a consideraciones estadísticas que se relacionan con el proceso de certificación y validación de la información.

Figura 1. Localización de las zonas de aplicación de la metodología (tomado de Espinosa, 2006).



Cuadro 1. Características de los sistemas de laderas (Basado en: Mooser *et al.* (1996) e INEGI, (1998) y tomado de Espinosa, 2006:

Atributos Geográfico-generales		Atributos geográfico-generales de los sistemas de laderas		
		Nevado de Toluca	El Gavilán	Bosencheve
Latitud media		19° 06'	19°54'	19° 25'
Longitud media		99° 46'	99° 29'	100° 07'
Altitud msnm		4 680	3 020	2 710
Origen	Unidad fisiográfica	Porción central del Sistema Volcánico Transversal		
Geología	Tipo de roca	Andesitas y Pómez	Basaltos, tobas y brechas volcánicas	Basaltos y tobas
	Edad	Derrames lávicos y depósitos piroclásticos datados de 10 500 años <i>B.p.</i>	Bloques y derrames del Terciario.	Depósitos piroclásticos y basálticos del Terciario inferior
Geomorfología	Geoforma	Predominio de laderas convexas	Laderas en sistemas de bloque y calderas volcánicas	Laderas acumulativas y piedemonte
	Orientación	N	S-SW	E
Clima	Clasificación	Cw ₂ (w)(b')g Semifrío	Cw ₁ (w)(w)bg	C(w ₂)(w)B(i)
		E(t)w Frío	Templado subhúmedo	Templado subhúmedo
	Isotermas	4° C - 12° C	14° C	12° C - 14° C
	Isoyetas	1 200 - 1 800 mm	800 mm	800 - 900 mm
Uso de suelo		Agrícola y forestal	Forestal y agrícola	Forestal y agrícola

El proceso de legitimación se basó en el análisis multivariado, por medio del cual se realiza la obtención de unidades morfoedáficas con atributos particulares, considerados en el diseño de más de dos muestras independientes. Otro criterio responde a la ratificación y valoración geográfica, fundamentada en las regularidades de la envoltura geográfica, expresadas a través de procesos de zonalidad y azonalidad geográfica, determinados éstos por los gradientes de latitud y altitud, y, manifestados a través de una franja territorial, que se circunscribe al Paralelo 19° N; todo ello como parte de un complejo sistema que pertenece a la envoltura geográfica, según lo ha establecido Mateo en 1984.

La selección de las áreas de muestreo para realizar el trabajo experimental responde a una consideración que se basa en la posible similitud que podría encontrarse en los espacios estudiados; no obstante, también queda claro que la zonalidad no precisa condiciones idénticas de comparación entre los sistemas de laderas que se estudian; partiendo del entendido que los mecanismos que se desarrollan sobre la superficie terrestre son complejos, de tal forma no existe un solo proceso que se manifieste en la naturaleza de forma idéntica.

Por otra parte, se consideraron los criterios de Baron (2002), quien establece diez puntos clave acerca del estudio de montañas y partes de ellas, éstos son: la influencia de gradientes físicos; la afectación a la vida por parte de los gradientes físicos; el movimiento de vida salvaje; las zonas de migración humana; la caracterización climática; la importancia prehistórica e histórica; los procesos de modelado; los procesos físicos y bioquímicos, y la conformación y transformación de paisajes.

2. Desarrollo metodológico

La propuesta metodológica que resuelve el problema de investigación se centra en la resolución de siete etapas de trabajo que conforme generan resultados; éstas dan lugar a un sistema de integración que constituyen dos fases terminales caracterizadas por una evaluación geomorfológica y una edafológica, que a su vez, convergen en una matriz que liga la información de cada variable estudiada.

La proposición de evaluación morfoedáfica es de tipo multicriterio y multivariable; entendiéndose la primera como la integración de razonamientos diversos, pero que encuentran un punto de coincidencia; de tal forma que los criterios de partida son emanados de la geomorfología y la geografía del suelo, y el punto de unión se observa a través de la interpretación de cada punto de vista y de la expresión holístico-territorial manifestada en documentos cartográficos.

El desarrollo metodológico de la evaluación morfoedáfica en sistemas de laderas se clasifica como paramétrico; no

obstante a ello, es enriquecido por una visión cualitativa que las propias variables generan y por la distribución espacial que exponen. Resulta importante puntualizar que cada uno de los parámetros utilizados es concebido y ordenado con el propósito de que muestren la importancia o jerarquía, que éstos poseen en el sistema.

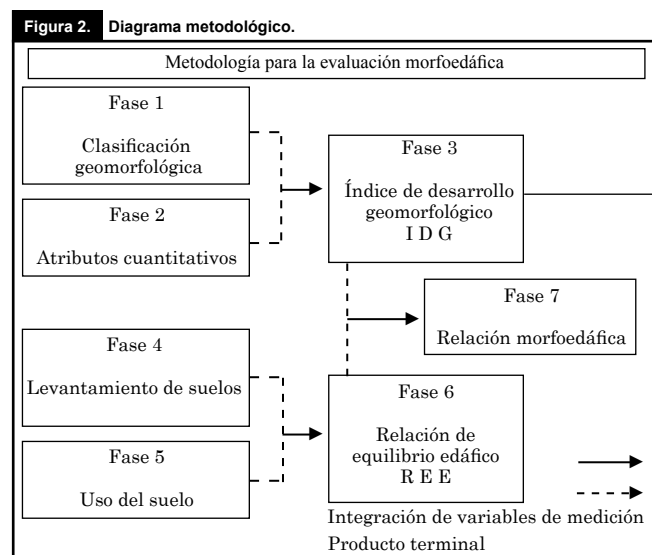
Esta idea se centra de manera inicial en el procedimiento para definir el peso de cada variable, de tal forma que al encontrarse con un número determinado de éstas y un valor asignado, se advierta cuál de ellas posee mayor o menor influencia en el desarrollo del proceso geomorfológico o edáfico.

Esto último se ha planteado en función de encontrar, de la forma más natural posible, la influencia de cada parámetro, a través del valor y la comparación con los demás que componen a la matriz de evaluación.

Es importante destacar que el empleo de escalas de medición corresponde a la capacidad que éstas tienen para clasificar los objetos desde el punto de vista de los elementos que proporcionan respuestas, como lo establece Briones (1995). De acuerdo con esto, los niveles o escalas de medición utilizadas en este apartado, de acuerdo con Pick y López (1995) y Kerlinger (1988), miden las propiedades de los indicadores de los objetos; de tal manera que se seleccionaron las de tipo intervalo y de razón.

El desarrollo del procedimiento metodológico se apoya en un sistema cartográfico, el cual se basa en la sobreposición de polígonos que reflejan las características cualitativas y cuantitativas determinadas en las diferentes áreas obtenidas. Los rodales que reflejan un valor numérico específico; y éstos a su vez, conforman un sistema con el cual se obtiene la geometría topológica que determina la generación de nuevos polígonos y de un indicador del nivel de complejidad del sistema cartografiado.

La propuesta metodológica se presenta en el siguiente diagrama de flujo:



A continuación se explican las características específicas de cada una de las fases que corresponden a la metodología y los criterios con los cuales se ha construido.

2.1. Fase 1. Clasificación geomorfológica

El objetivo se centra en obtener una diferenciación de las formas del relieve utilizando criterios de origen, geometría y características distintivas del sustrato geológico. El desarrollo de esta fase comprende la interpretación de material cartográfico previamente elaborado y de mosaicos aerofotográficos a escala grande; asimismo, se fundamenta en la verificación directa en campo; así como en la valoración de las condiciones climáticas regionales y locales.

El producto terminal de esta primera etapa, es una carta geomorfológica general a escala 1:50,000, en la cual cada una de las unidades geomórficas identificadas se clasifica de forma jerárquica y se le asigna un valor numérico. Los atributos básicos considerados para la elaboración de la clasificación geomorfológica son los siguientes:

a) *Caracterización de geoformas*: esta parte refiere a una identificación de las principales formas que constituyen al paisaje, tales como planicies, valles, piedemontes, montañas, lomeríos y mesetas, identificados éstos como elementos básicos constitutivos del relieve.

b) *Tipo de geología y edad*: se realiza una clasificación del tipo del sustrato que comprende a las laderas de estudio para determinar las características de erodabilidad, resistencia a la erosión, procesos gravitacionales y permeabilidad, entre otros.

c) *Geometría*: la clasificación de la geoforma depende de atributos espaciales identificados a través de la geometría, la cual se determina a través de rasgos puntuales, lineales y areales.

d) *Consolidación del sustrato*: por consolidación del sustrato se entiende el grado de intemperismo que presentan las rocas expuestas sobre la superficie.

e) *Caracterización climática*: este apartado define particularidades de la influencia climática sobre la dinámica y la evolución de las geoformas; así como de los suelos que se desarrollan en las unidades territoriales.

f) *Sistema de drenaje*: la caracterización de los atributos cualitativos del relieve se basa en la interpretación de la red fluvial dominante para identificar elementos de control estructural, características generales de la disección fluvial y condiciones generales del sustrato sobre el cual se desarrolla.

De manera particular, el proceso de reconocimiento de la red fluvial y la importancia de la interpretación de los sistemas dominantes permiten valorar y considerar las anomalías en el relieve, el desarrollo de vertientes, las características y origen de las rupturas de pendientes, los

contactos litológicos, rasgos lineales o areales, las relaciones entre el sustrato geológico y la geoforma; así como diferentes procesos de modelado, entre otros. Por último se registra la presencia de sistemas de cárcavas como sistemas de erosión acelerada y evidencia de procesos de degradación.

g) *Remoción en masa*: se establece la presencia de procesos de remoción en masa, debido a que éstos se presentan con frecuencia en sistemas de laderas.

Un ejemplo de la caracterización geomorfológica se observa en el cuadro 2 que muestra algunos de los atributos del relieve de la región de El Gavilán.

2.2. Fase 2. Atributos cuantitativos

El proceso que se sigue para la obtención de los parámetros cuantitativos requiere del desarrollo de cinco partes que se integran para realizar la evaluación geomorfológica. Esto último significa que el análisis por variable genera información particular de cada elemento considerado en el proceso de estudio y el valor obtenido representa un estado que califica características y tendencias.

Al referir valores paramétricos en conjunto, se establece una relación lineal por medio de la cual se observa el conjunto de variables y comportamiento con respecto al grupo al que pertenecen. Es así que esta parte define desde el inicio un sistema que se encuentra integrado y las relaciones que se desarrollan entre los elementos que lo conforman.

A continuación, se enumeran y explican las características de cada uno de los pasos que conforman la evaluación cuantitativa de los sistemas de laderas, así como los criterios de su interpretación.

a) *Clasificación de resistencia del sustrato geológico a la erosión*: este índice clasifica las unidades litológicas en función de la resistencia que éstas tienen a procesos de intemperismo y erosión, de acuerdo con las condiciones generales que cada una de las rocas guarda en función de su textura, dureza y grado de fracturamiento. De acuerdo con las características distintivas de cada grupo de rocas encontrado, es asignado un valor numérico que representa y clasifica los atributos del sustrato.

Para obtener este valor numérico, se utiliza la propuesta de los Índices Litológicos desarrollada por la FAO (1976), en la cual se establece una escala de resistencia general para los diferentes tipos de rocas; sin embargo, la utilización de ésta se sujeta a dos modificaciones.

La primera refiere a la unificación de variables, en la que se suman en una sola clase el grupo de rocas clasificado por "edad", a las cuales se les ha denominado como "especiales".

La segunda transformación al método propuesto, refiere a la inversión de los valores establecidos en la escala original, de tal manera que el valor más cercano a cero corresponde a la clase más resistente a la erosión y viceversa. Por último, y con el propósito de homologar los resultados en el proceso metodológico, se considera manejar clases en números enteros que agrupan las características de resistencia; de tal forma que el índice se representa como se muestra en el cuadro 3.

b) *Pendientes*: se realiza una clasificación del territorio por medio de la caracterización de pendientes en seis rangos, considerados como los que representan desde el punto de vista geomorfológico la distribución natural de las formas del relieve.

El criterio seleccionado para la elaboración de rangos posee la cualidad no sólo de definir la distribución espacial de la pendiente y el ángulo de rompimiento, sino que éste además permite correlacionar las características del territorio desde el punto de vista morfológico y morfométrico, con procesos fluviales y de remoción en masa observados de manera cualitativa y cuantitativa (cuadro 4).

c) *Densidad de la disección*: se obtiene mediante la modificación de la metodología propuesta por Lugo (1988) en la cual la malla de referencia reduce la superficie de medición a 1.0 km².

Cuadro 3. Índices utilizados para la determinación de resistencia a la erosión, modificado de FAO, 1976.

Índices litológicos de resistencia a la erosión			
Clase de roca	Tipo de roca	Índice FAO	Índice
Duras	Rocas básicas	0.1 – 0.2	1
	Rocas ácidas	0.1 – 0.5	2
	Rocas metamórficas	0.2 – 0.4	3
	Areniscas consolidadas	0.4 – 0.5	4
Blandas	Calizas friables	0.3 – 0.4	5
	Dolomitas	0.3 – 0.5	6
	Esquistos blandos muy friables	0.7 – 0.8	7
	Yesos, margas y arcillas	0.8 – 0.9	8
Especiales	Depósitos fluviales	0.4 – 0.8	5
	Glaciares consolidados	0.4 – 0.8	6
	Depósitos coluviales no estabilizados	0.7 – 0.9	7
	Depósitos torrenciales no consolidados	0.7 – 0.9	8

Cuadro 4. Clasificación de la pendiente en rangos.

Atributos de pendiente	
Pendiente en grados	Rango
0 – 3	2
3 – 6	
6 – 15	4
15 – 30	
30 – 45	
Mayor a 45	6

Cuadro 2. Caracterización geomorfológica de El Gavilán.

Atributos geomorfológicos de El Gavilán		
Elementos cualitativos	Variables	Características
Geoformas	Origen	De composición andesítica, la estructura volcánica del Terciario se encuentra conformada por un sistema de bloques basculados y parcialmente destruidos; ésta se asocia con un sistema de complejos orientados en dirección E-W, que sobrepasan los 3 000 msnm. Presenta el desarrollo de un sistema de piedemonte extenso en la porción sur formando una rampa acumulativa que es ocupada por actividades de carácter agrícola. El origen de la estructura se encuentra asociado al emplazamiento del megacomplejo sobre un sistema regional de fracturas sobre el cual diferentes eventos volcánicos conformaron al edificio; dicho sistema se relaciona, de manera primaria, con el sistema tectónico de tensión que conforma al graben de Acambay; y en segundo orden, se le relaciona con estructuras de la Sierra de Monte Bajo y el campo monogenético Polotitlán-Jilotepec.
	Erodabilidad	De acuerdo con lo anterior, si bien se desarrolla un sistema amplio de corrientes fluviales, el carácter de éstas tiende a un origen estructural y no erosivo, aunque se reconoce en la estructura un relieve suavizado.
Geología	Resistencia a la erosión	La dureza del material presenta resistencia general a la erosión; sin embargo, el emplazamiento sobre patrones estructurales regionales y la presencia a un sistema semiortogonal de lineamientos provocan el desarrollo de procesos de distribución y profundización en los valles fluviales.
	Procesos detectados	El megacomplejo presenta control estructural influenciado por un sistema transcurrente lateral izquierdo, que se presupone como responsable del desmembramiento de la estructura. Por la morfología de un parteaguas suavizado y el desarrollo de fondos planos en algunos valles, además de la ausencia de sismicidad local, se interpreta que los procesos tectónicos de basculamiento, ascenso y descenso de bloques se encuentran en estado de inactividad y/o recesión.
Geometría	Atributos geométricos	La geometría de las laderas se relaciona con un sistema de bloques dispuestos hacia el W y al S sobre los cuales la morfología presenta un dominio de laderas rectas y convexas, así como las de tipo cóncavo dentro de la caldera. Predominan pendientes que oscilan entre las medias y las fuertes de 15° a 45°, sin embargo, de manera cualitativa no se advierten procesos asociados a remoción en masa o un sistema fluvial asociado de manera directa con la pendiente.
	Rasgos (puntuales, lineales, areales)	Los rasgos dominantes se manifiestan a través de lineamientos que clasifican a diferentes unidades de bloque con un sistema de basculamiento. La unidad volcánica se encuentra desmembrada de manera parcial, sobre la cual se emplazan algunas calderas abiertas en dirección al Este.

Para clasificar e interpretar los resultados se siguen los criterios definidos por Strahler (1984), con los cuales se agrupan las unidades geomorfológicas. Los valores de clasificación se muestran en el cuadro 5.

El dato que se identifica como “5 - n+1” representa una clasificación alta, en la cual se representa el valor límite que refiere al criterio como el de mayor jerarquía.

d) *Órdenes de drenaje*: el valor de los órdenes de drenaje de los sistemas fluviales se obtiene con los criterios de clasificación de la relación de bifurcación establecidos por Horton (en Strahler, 1984). De esta manera, la ecuación utilizada para este propósito es:

$$R_b = N_u / N_u + 1$$

Donde:

R_b = Relación de Bifurcación

N_u = Número de segmentos

e) *Longitud de cauces*: la última parte que corresponde a los elementos cuantitativos del relieve se determina por medio de la longitud de cauces para comprobar el crecimiento de los mismos; para ello se utiliza la fórmula:

$$L_u = L_u / N_u$$

Donde:

L_u = Longitud media de todos los segmentos de cauce de orden u.

N_u = Número de segmentos

Cuadro 5. Clasificación del tipo de densidad de disección.

Valores de densidad de la disección	
Valores de densidad	Clasificación
0 - 4	1
4 - 5	2
5 - n+1	3

Cuadro 6. Clasificación de los rangos para la clasificación de las unidades geomórficas.

Rangos de desarrollo geomorfológico		
Valores	Rango	Tipo
25.1 - 27.0	1	Muy intenso
23.1 - 25.0	2	Intenso
21.1 - 23.0	3	Muy alto
19.1 - 21.0	4	Alto
17.1 - 19.0	5	Medio alto
15.1 - 17.0	6	Medio
13.1 - 15.0	7	Medio bajo
11.1 - 13.0	8	Bajo
9.1 - 11.0	9	Muy bajo
7.1 - 9.0	10	Incipiente
5.0 - 7.0	11	Poco desarrollado

2.3. Fase 3. Índice de Desarrollo Geomorfológico (IDG)

La generación del índice se basa en la integración de las fases que se desarrollaron hasta este momento. Es por ello que para su desarrollo se utilizan los resultados generados en la etapa de clasificación de los atributos cuantitativos y se interpreta con los obtenidos en la primera parte del procedimiento.

El proceso de integración, como se definió en la sección de introducción de la metodología, genera el primer mapa terminal denominado como Índice de Desarrollo Geomorfológico. La elaboración del mapa se lleva a cabo por medio de la sobreposición de los polígonos temáticos obtenidos en la cartografía generada en cada una de las etapas anteriores, de tal manera que se conforman nuevas unidades territoriales.

Una vez obtenido el valor en cada unidad geomórfica, se alcanza el valor de la media, y con este último se realiza una nueva clasificación de los resultados agrupándose en once clases específicas:

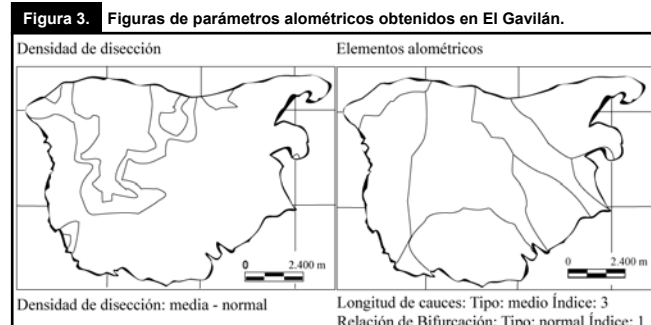
De acuerdo con los resultados encontrados en el proceso de aplicación de la metodología, la leyenda se puede modificar y ajustarse a las condiciones físico-geográficas dominantes.

Asimismo, es posible integrar información general o específica representativa de las unidades geomórficas. Así el mapa genera la oportunidad de interpretar el comportamiento general y global de las variables en cada unidad territorial.

El cuadro 7 muestra algunos valores de diferentes unidades geomorfológicas de El Gavilán.

Cuadro 7. Parámetros y valores del IDG en El Gavilán.

Atributos del IDG						
Unidad geomorfológica	Litología	Pendiente	Densidad disección	Órdenes drenaje	Longitud de cauces	Total
1	4	1	1	1	3	10
81	2	1	1	1	3	8
94	2	2	1	1	3	9
235	5	1	1	1	3	11
270	5	2	1	1	3	11
607	2	1	1	1	3	8
787	4	1	1	1	3	10
822	5	2	1	1	3	12
1585	2	2	1	1	3	9
1877	2	1	1	1	3	8



2.4. Fase 4. Levantamiento de suelos

Para esta fase se lleva a cabo un levantamiento de suelos de cuarto orden bajo la perspectiva de la *Soil Taxonomy*, en el cual se siguen los lineamientos establecidos por el Manual de Procedimientos y Especificaciones de la Subdirección de Docencia e Investigación del Instituto Agustín Codazzi de Colombia (1986); asimismo, se siguen las observaciones realizadas por Siebe *et al.* (1996) para el desarrollo del trabajo de campo.

La clasificación del suelo bajo los criterios establecidos, proporciona información acerca de la vocación natural que las unidades edáficas poseen y el estado evolutivo que guardan; siendo más importante determinar el grado de desarrollo (procesos de formación y degradación presentes) que su nombre.

Esta afirmación se sustenta en la idea de que los indicadores utilizados en el estudio de suelos, de acuerdo con Jasso (2002, basado en Birkeland, 1984; Pedraza, 1996; Thomas, 2001 y García 2001), se relacionan con periodos de estabilidad, tipo, intensidad y duración de los factores ambientales y procesos que predominan durante la pedogénesis; y a su vez, con la formación del paisaje generado a través de la interrelación entre los subsistemas de naturaleza geológica, geomorfológica, climática, edáfica y biótica; de tal forma que el relieve, suelo y vegetación son los indicadores ecológicos que relacionan los cambios entre materia y energía.

Dichos cambios siempre alteran en mayor o menor grado la morfodinámica y evolución, llegando en ocasiones a destruirlos de forma parcial o total (García, 2001). Esta premisa ha sido abordada en el estudio de paleosuelos por Solleiro *et al.* (2000), quien resalta un apoyo valioso para reconocer periodos de estabilidad e inestabilidad del paisaje; dicho reconocimiento se basa en el estudio cualitativo y cuantitativo de los tipos de suelos y los horizontes que se formaron, de los procesos que tuvieron lugar, así como el grado de evolución que alcanzaron (figura 4).

A continuación se presentan los criterios de calificación utilizados en la metodología para representar los diferentes tipos de suelos (cuadro 8).

2.5. Fase 5. Uso de suelo

Para la obtención del índice de uso de suelo se definen dos etapas aplicadas en las unidades cartográficas emanadas de la clasificación de suelos; la primera basada en el método propuesto por la SEDUE en el Manual de Ordenamiento Ecológico de 1988. La segunda parte corresponde a la aplicación de valores y atributos numéricos basados en la energía utilizada en el sistema, en la identificación de factores limitantes para el desarrollo de actividades, y en las técnicas de producción y mecanización del suelo, si es que éstas existen.

1. Índice del Manual de Ordenamiento Ecológico: para obtener el índice de uso de suelo se requiere de la confección de una carta de cobertura de suelo elaborada por medio de la fotointerpretación de pares fotográficos, de imágenes de



Cuadro 8. Criterios de clasificación de las unidades de suelo (Los tres primeros tipos corresponden a la clasificación de Porta, 1994 y los restantes a la de Espinosa, 2006).	
Criterios de clasificación	
Bioedafogenéticos	Refieren a suelos <i>in situ</i> que se encuentran en equilibrio, definido por medio del balance de materia y energía que éste posee.
Cataedafogenéticos	Se clasifican bajo este criterio las unidades edáficas <i>in situ</i> que presentan cambios que no muestran estabilidad por la pérdida de nutrientes.
Antropizados	Se definen en esta clase todos aquellos suelos <i>in situ</i> que reciben diferentes tipos de presión, manifestada por modificaciones en su estructura a través de elementos contaminantes o procesos erosivos.
De levantamiento tectónico lento	Refiere a todos aquellos suelos que se han formado a través de procesos de acumulación de materiales provenientes de procesos gravitacionales generados por ascensos de origen tectónico.
Por subsidencia	Se agrupan suelos desarrollados en zonas con pendientes suaves por transporte de materiales debido a hundimientos del terreno.
Por remoción	Refiere a todos aquellos suelos que se han formado a través de procesos de acumulación de materiales provenientes de procesos relacionados con la estabilidad de vertientes.

satélite y de la verificación en trabajo de campo. Con la cartografía elaborada se procede a utilizar la fórmula:

$$IUS = 10 - AZUNA (100) / AT$$

Donde:

IUS= Índice de Uso de Suelo

AZUNA= Áreas de uso de suelo no adecuadas que no corresponden con la vocación natural del suelo

AT= Superficie total de la unidad edáfica

Los resultados obtenidos se clasifican de acuerdo con la metodología referida que define de forma sucesiva la ocupación en inadecuada, mala, regular, buena y óptima.

La clasificación de los resultados aparece en la matriz denominada como Primera Clasificación de Uso de Suelo (Us) bajo el concepto “Clase”; y ésta no se reporta en los porcentajes descritos, sino por un atributo que presenta una secuencia numérica que parte del “0” que representa el nivel ideal al “4” que manifiesta lo inconveniente.

2. Aplicación de valores y atributos numéricos: se realiza una segunda categorización de los rangos obtenidos en función del tipo de energía empleada en el sistema.

Este proceso se basa en otorgar un valor entero que representa a cada uno de los tipos de ocupación conservando así una estructura jerárquica de los mismos; a estos valores se les agrega un decimal que representa una constante matemática que define el tipo de energía que se emplea en la unidad edáfica.

Esta asignación se fundamenta en los tipos de insumos que se requieren para el funcionamiento de la unidad. Es necesario aclarar que éstos se especifican por medio de los resultados obtenidos en la carta edáfica, es decir, de acuerdo con la vocación natural del suelo.

Para culminar el proceso de clasificación del uso de suelo, a los resultados obtenidos hasta este momento se suma una constante matemática que identifica la presencia de factores limitantes de utilización de cada una de las unidades, así como otra que califica a las técnicas de producción y mecanización

del suelo; en el entendido de que sean adecuadas o no en función de las características de vocación edáfica.

2.6. Fase 6. Relación de equilibrio edáfico

Este índice es uno de las más importantes en el proceso de evaluación morfoedáfica; conforma la segunda fase terminal de la metodología.

La representación cartográfica de este procedimiento y los valores que la sustentan surgen a través de la división de los valores obtenidos en la Clasificación de Suelos y el Índice de Uso de Suelo. De acuerdo con esto, esta relación se expresa de la manera siguiente:

$$REE = Cs / CUs$$

Donde:

REE= Relación de Equilibrio Edáfico

Cs= Clasificación de Suelos

CUs= Clasificación de Uso de Suelo

Es importante destacar que en el diseño de esta parte de la metodología se busca que los resultados obtenidos de este índice tengan un comportamiento tal, que el resultado de la división se encuentre entre los valores 0.0 y 90.0. El propósito de este criterio se centra en encontrar la relación que existe entre el suelo y la vocación de éste con referencia a la utilización que se le proporciona.

El valor mínimo identifica una disparidad entre ambas variables e identifica espacialmente problemas específicos y viceversa. El cuadro 9 muestra la escala de valores considerados para clasificar la REE en once rangos específicos que aparecen en la clasificación morfoedáfica.

2.7. Fase 7. Estabilidad morfoedáfica y cartografía

Este periodo de trabajo corresponde a un proceso de integración que considera los resultados emanados en las fases de desarrollo geomorfológico y la relación de equilibrio edáfico.

En esta etapa de trabajo se realiza una matriz de integración en la cual se suman los valores obtenidos en cada uno de los productos terminales señalados, obteniendo así una caracterización particular del espacio en el cual se definen las unidades morfoedáficas.

Con la información completa y conociendo los valores de estabilidad morfoedáfica y con los criterios obtenidos a través de cada fase y del trabajo de campo que fundamenta la propuesta, se establece un procedimiento de clasificación de los resultados a través de la media ponderada, para obtener rangos que califican las condiciones de estabilidad en el paisaje estudiado. Las figuras 5 y 6 muestran la leyenda y el mapa correspondiente.

Cuadro 9. Correspondencia paramétrica con los rangos de REE.

Rangos de relación de equilibrio edáfico	
Valores	Tipo
0.1 - 8.2	Polarizada
8.3 - 16.3	Incipiente
16.4 - 24.5	Muy baja
24.6 - 32.7	Baja
32.8 - 40.9	Medio baja
41.0 - 49.1	Media
49.2 - 57.3	Medio alta
57.4 - 65.5	Alta
65.6 - 73.3	Muy alta
73.4 - 81.9	Estrecho
82.0 - 90.0	Muy estrecha

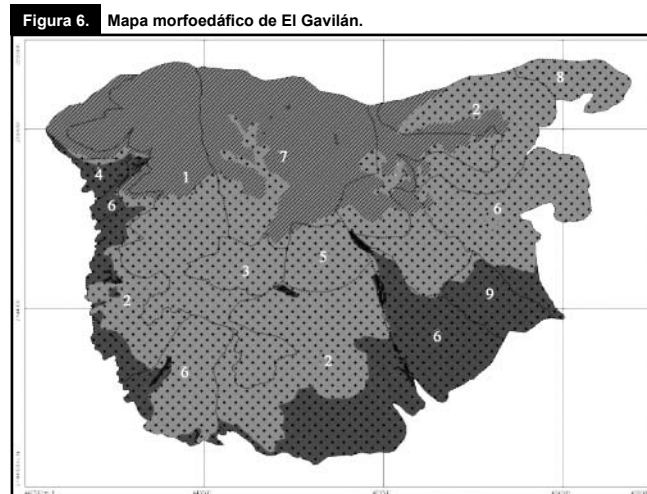
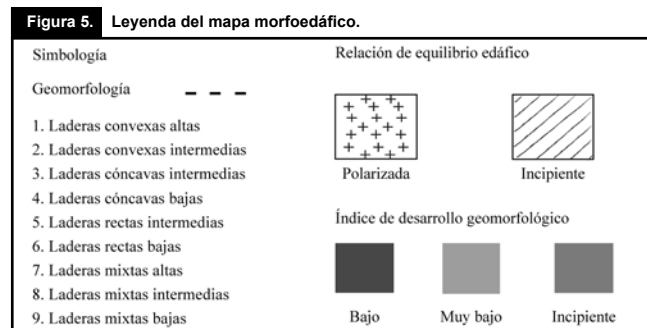
3. Resultados

Como puede observarse en el cuadro 10 y en la gráfica 1, el proceso metodológico permite exhibir la conducta de cada sistema de laderas y diferenciarlo de los otros. Existen dos clases idénticas en cuanto al comportamiento general; sin embargo, éstas logran diferenciarse y presentar la tendencia de desarrollo particular por las características de los atributos que poseen.

Se aprecia que si bien en Bosencheve y Nevado de Toluca las clases de índice son las mismas, el comportamiento interno de las variables registra valores característicos distintivos.

El resultado del análisis del suelo, en general, ha permitido la realización de una valoración fisiográfica, en la cual, la generalidad de la información se inclina hacia suelos con características bioedáficas como se observa en la del mapa morfoedáfico de El Gavilán (figura 5 y 6).

Los resultados obtenidos al aplicar el instrumento de medición sobre material cartográfico 1.50,000 arrojaron elementos indicadores satisfactorios desde la perspectiva geomorfológica y del suelo, al mismo tiempo que los objetivos de la investigación se han cubierto, sin embargo, se considera que la mayor capacidad de análisis puede ser lograda al aplicarse en escala de trabajo más grande una vez que se desarrollen ajustes paramétricos con el propósito de obtener más detalle al modelo de evaluación.



Conclusiones

Por lo que concierne al instrumento de evaluación se establecen algunos elementos importantes para su estudio. El primero de ellos tiene que ver con cada una de las fases que propone la metodología y el segundo con los resultados que ésta tiene.

La figura siguiente muestra la relación correspondiente de algunas de las unidades morfoedáficas y las tendencias que éstas tienen hacia el estado que guardan en el paisaje (figura 7).

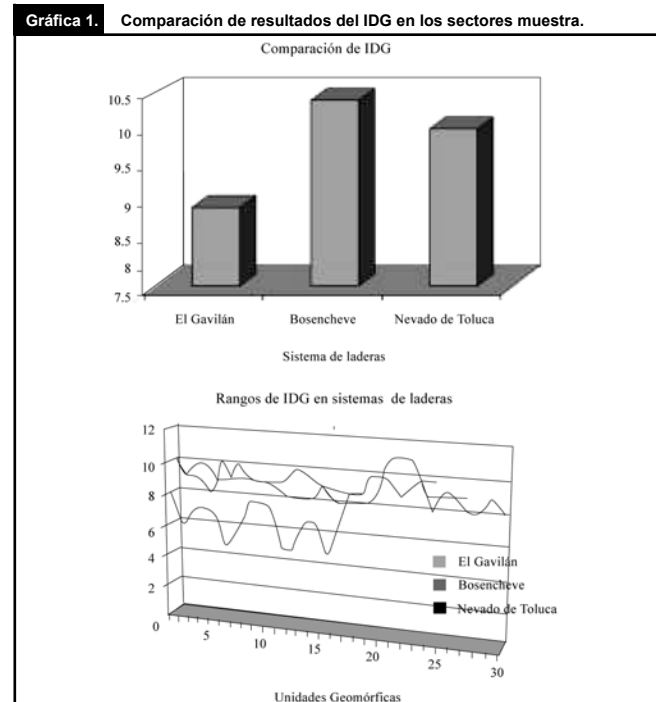
Es importante definir que al conceptualizar la fase operativa de la metodología, aparece una valoración con atributos cualitativos seguida de los de carácter cuantitativo, dicha secuencia permite contar con una visión completa acerca de los procesos que se desarrollan, donde la descripción adjetiva es la introductoria a los estudios numéricos.

La construcción de un concepto y método original que considera como base los elementos teóricos y metodológicos de dos disciplinas, al integrarse generan un nuevo paradigma en el campo de las ciencias del paisaje.

Este nuevo paradigma se cimienta en un proceso de autopoiesis caracterizado por el establecimiento de fronteras nuevas en campo de investigación básica y aplicada; el cual se encuadra en los planteamientos teóricos y metodológicos de la geografía del paisaje.

Cuadro 10. Comparación de media ponderada y clasificación de los IDG

	El Gavilán	Bosencheve	Nevado de Toluca
M=	8.67	10.1	MP= 9.7
	Poco desarrollado	Muy bajo	Muy bajo



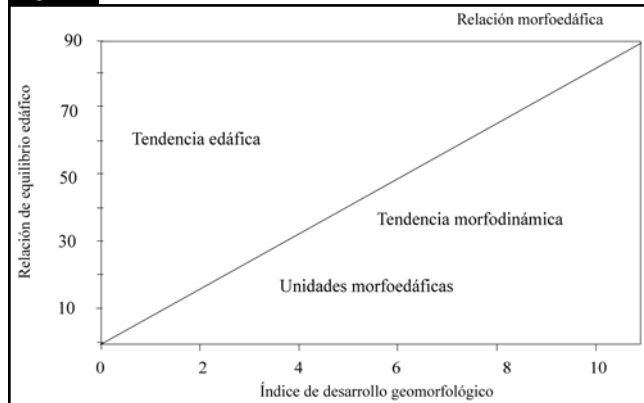
El proceso de construcción referido se basa en una estructura cognitiva que se generó a través de un proceso de reflexión interdisciplinaria que abarcó el estudio de métodos, estructura,

componentes y alcances de la Geomorfología y la Geografía del suelo; todo ello con el propósito de alcanzar propuestas y soluciones en el estudio del paisaje y de la Geografía.

Al establecer la correspondencia entre las disciplinas que conforman a la Morfoedafogénesis cabe resaltar la construcción de la matriz que enlaza las variables de estudio geomorfológico y edáfico.

Por otra parte, se resalta la visualización diacrónica de las variables de la investigación y la perspectiva ecética de la misma; así como la generación de índices como el de desarrollo geomorfológico y la relación de equilibrio edáfico. Por lo que se refiere al método empleado, se establece que ha logrado medir los parámetros deseados. El instrumento expuso capacidad de adaptación en cada uno de los sistemas de muestreo; por lo que abre la posibilidad uso y desarrollo en cualquier otro espacio que cumpla condiciones semejantes a las estudiadas.

Figura 7. Relación morfoedáfica en El Gavilán.



Bibliografía

- Birkeland P.W. (1999). *Soil and geomorphology*. 3a. ed. Oxford University Press, New York–Oxford.
- Bolós M. (1991). *Manual de ciencia del paisaje*. Masson, Barcelona.
- Briones G. (1995). *Métodos y técnicas de investigación para las ciencias sociales*. Trillas. México.
- Elbersen W.; T. Benavides y S. Botero (1986). *Metodología para levantamientos edafológicos*. 2a. parte. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá Colombia.
- Espinosa L. (2006). “Propuesta para la evaluación morfoedáfica en sistemas de laderas”. Tesis para obtener el grado de Doctor en Geografía. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García A. y J. Muñoz (2002). “El paisaje en el ámbito de la Geografía”, en *Temas selectos de Geografía de México, III. Métodos y técnicas para el estudio del territorio*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jasso C.; S. Sedov; E. Solleiro y J. Gama (2002). “El desarrollo de los paleosuelos como índice de la estabilidad del paisaje. Un ejemplo del centro de México”, en *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. Universidad Nacional Autónoma de México. Núm. 47.
- Kerlinger F. (1997). *Investigación de comportamiento*. 3a. ed., Mc Graw Hill Interamericana de México s. A. de c. v. México.
- King Ch. (1984). *Geografía Física*. Oikos Tau. Barcelona.
- Lugo J. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada*. Instituto de geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO. (1981). *A framework for land evaluation-fao soils. Bulletin 32*, Second printing, (electronic document) ed 1981, Rome. Food and agriculture organization of the united nations- land and water development division.
- Pedraza J. (1996). *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Editorial Rueda, Alarcón. Madrid.
- Pick, S. y A. López (1995). *Cómo investigar en ciencias sociales*. Trillas. México.
- Pirnat, J. (1998). “A comparison agricultural and forest ecosystems in a landscape through energetic imputes”, en *Landscape transformation in Europe: practical and theoretical aspects*. Polish Association for Landscape Ecology, IALE. Faculty of Geography and Regional Studies of the Warsaw University (FGRSW).
- Porta, J. y R. López.(2001). *Edafología para la agricultura y el medioambiente*. Mundi-Prensa. Madrid.
- Siebe, C.; R. Jahn y K. Stahr (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia de Suelo A.C. Chapingo, México.
- Strahler, A. (1984). *Geografía Física*. Omega, Madrid.
- Strahler, A. N. y A. H. Strahler (1999). *Elements Of Physical Geography*. J. Willey. USA.
- Thomas, F. (2001). *Landscape sensivity in time and space an introduction*. Catena 42.