

**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO  
FACULTAD DE GEOLOGIA Y MINAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

# **GEOMORFOLOGIA**

**AUTORA: Dra. C. Alina Rodríguez Infante**

**MOA, 2000**

## INDICE

| <b>Contenido</b>   | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| Introducción   | 1             |
| Definición   | 2             |
| Principios básicos de la geomorfología   | 3             |
| Interacción de los procesos morfogénicos y la formación del relieve                | 7             |
| Métodos de investigación geomorfológica  | 8             |
| El levantamiento o cartografiado geomorfológico                                    | 8             |
| Interpretación de mapas topográficos   | 9             |
| Métodos morfométricos  | 11            |
| Mapa de pendientes   | 12            |
| Mapa de red de drenaje o fluvial   | 15            |
| Mapas de isobasitas  | 17            |
| Métodos aéreos   | 20            |
| Los procesos geológicos y la formación del relieve. Principales formas del relieve | 20            |
| Bibliografía   | 33            |

## **INTRODUCCION.**

Con el desarrollo científico técnico que permite al hombre obtener información de la superficie terrestre desde sensores remotos y partiendo de la necesidad de hacer cada día más económicas las investigaciones geológicas, se ha ido incrementando progresivamente en estas la aplicación de los métodos geomorfológicos que posibilitan la determinación de estructuras geológicas de carácter regional y local, constituyen métodos tradicionales de búsqueda y evaluación de yacimientos minerales, son de obligada aplicación en la proyección de obras constructivas y permiten la evaluación de los impactos que las tareas geólogo-mineras originan al medio ambiente.

Además de la aplicación de las investigaciones geomorfológicas en el campo de la geología a la cual se ha hecho referencia anteriormente, es reconocida la tendencia de que la geomorfología como ciencia se ha hecho cada día más geológica que geográfica, lo que queda justificado en primer lugar por que los descubrimientos de nuevas superficies terrestres del planeta fueron resultados de los siglos precedentes, haciéndose la geografía más sociopolítica, lo que ha desplazado a la geomorfología hacia el campo de la aplicación práctica; al mismo tiempo de que en las investigaciones geomorfológicas se utilizan cada vez más los métodos hidrodinámicos, granulométricos y mineralógicos propios de las ciencias geológicas.

En el desarrollo de este curso se pretende dar los principios básicos de la aplicación de los métodos geomorfológicos en la solución de problemas prácticos, particularizando en la interpretación tectónica aplicada y los métodos de la investigación geomorfológica con fines geológicos.

## **DEFINICION.**

La geomorfología es una ciencia natural que se encarga del estudio del relieve de la superficie terrestre y su nombre es derivado de tres palabras griegas: *ge*-tierra, *morfé*-forma y *logos*-estudio.

Las formas del relieve terrestre surgen por la interacción de los procesos exógenos o de superficie y los procesos endógenos al actuar sobre las rocas que afloran en la superficie terrestre, dando como resultado la formación de rasgos del relieve de diferentes órdenes que van desde las grandes estructuras planetarias como son los océanos y continentes, hasta las pequeñas cárcavas y formas cársticas de carácter local. Sin embargo, según la definición general queda implícito que la geomorfología estudia tanto el relieve de las superficies emergidas como de los fondos oceánicos, pero si partimos del hecho de que los procesos morfogénicos que actúan en las superficies continentales e insulares difieren de los que modelan los fondos marinos, se ha aceptado el que la geomorfología se ocupe de las formas medias y pequeñas del relieve, mientras se ha dejado a la oceanología el estudio y cartografiado del relieve submarino y a la geotectónica el estudio de los

orígenes y desarrollo de las grandes estructuras planetarias. No obstante a lo anterior y partiendo del propio avance que ha tenido la geología a partir de las concepciones de la tectónica de placas y formación de la corteza terrestre, se hace difícil determinar el campo de aplicación de cada una de estas ramas de la ciencia, interactuando todas entre sí.

Con el desarrollo de la geomorfología se han ido ramificando los conocimientos, siendo todavía más aceptada la clasificación del científico ruso Semianov, que la clasifica en dos ramas principales: Climática y Estructural.

La Geomorfología Climática centra su análisis en el papel del clima en la formación del relieve, mientras que la Geomorfología Estructural parte de la relación existente entre la estructura geológica y los procesos exógenos en la formación del relieve. A partir de esos objetivos y teniendo en cuenta los intereses de los profesionales del campo de la geología, es la segunda vertiente sobre la cual se basan las investigaciones geomorfológicas.

### **PRINCIPIOS BASICOS DE LA GEOMORFOLOGIA.**

La Geomorfología como todas las ciencias cuenta con un conjunto de principios básicos que rigen y al mismo tiempo sustentan las investigaciones. A continuación se realizará el análisis de los considerados más importantes y que desde el punto de vista geológico son de inevitable consideración.

Primer principio: Actualismo. Este constituye también el primer principio de la geología y en su esencia plantea que el presente es la clave del pasado. En su enunciado inicial dado por J. Hutton en 1785 se planteó que los mismos procesos geológicos que operan en la actualidad lo hicieron también en el pasado, lo que desde el punto de vista dialéctico constituye un error, ya que las condiciones del planeta han ido transformándose en el tiempo, como por ejemplo el carácter oxidante de la actualidad no se ha mantenido de forma constante en la atmósfera, por lo que es imposible considerar similitud de procesos. Lo que sí queda claro es que si son las mismas leyes las que han regido los procesos tanto en el pasado como en el presente de la tierra.

La aplicación de este principio se hace de forma constante y en ocasiones inconsciente, a partir de los conocimientos que continuamente el hombre va adquiriendo de la observación de los fenómenos que ocurren en la actualidad y que permiten la interpretación de las paleoformas y paleoestructuras que comúnmente afloran en la superficie terrestre. Como un ejemplo muy sencillo de la aplicación de este principio se puede hacer referencia a la formación de los lagos en herradura, los que pueden ser estudiados en la actualidad en cualquier sistema fluvial en estadio de vejez y que al ser observados en superficie o enterrados bajo sedimentos más jóvenes pueden ser interpretados,

permitiendo la reconstrucción geomorfológica y además paleotectónica y paleogeográfica de la zona.

Segundo principio: La estructura geológica es un factor de control de la evolución del relieve y se refleja en este. El relieve tiene que ser entendido como el resultado de la interacción de los procesos exógenos con las rocas, una interacción que mantiene un carácter diferenciado en dependencia de las propiedades físicas y químicas de estas. Ahora, la posición de una roca respecto a la superficie está en dependencia de la estructura geológica que presenta y en particular de su yacencia y grado de agrietamiento. Un ejemplo clásico de la geología cubana es la forma de relieve desarrollada en el extremo oriental de La Sierra Maestra, en el área conocida como Ramón de las Yaguas, donde el relieve transiciona de norte a sur de meseta - Santa María del Loreto – a cuevas y finalmente a crestas a partir del eje de la estructura sinclinal ubicada en el centro de la mesa hacia sus flancos. Esta variación geomorfológica va a estar condicionada no sólo por los cambios litológicos que van desde los conglomerados de la Formación Camarones hasta las tobas de la Fm. El Cobre, sino también por el aumento progresivo del buzamiento de las capas hacia el sur. Lo anterior queda reflejado esquemáticamente en la figura 1.



**Figura 1:** Corte esquemático de la Mesa de Santa María del Loreto.

Tercer principio: Los procesos geomorfológicos dejan sus huellas distintivas en el relieve y cada uno desarrolla un conjunto de formas propias. De los conocimientos generales de la geología es conocido que cada proceso geológico genera formas - tanto erosivas como acumulativas - que sólo serán características de él e inconfundibles con las formas creadas por otro proceso, lo que permite tanto en el estudio del relieve actual como en las formas antiguas la determinación de los procesos dominantes que han intervenido en su desarrollo. Para ejemplificar este principio podemos hacer referencia a las formas desarrolladas con el paisaje fluvial que van desde las pequeñas cárcavas hasta los grandes valles, sin obviar la formación de terrazas, lagos, cascadas y meandros como elementos mas frecuentes, sin embargo, en los relieves glaciares se forman estructuras similares, pero que al ser originadas por la acción de otro agente morfogénico, se diferenciarán en sus rasgos generales, por los cuales son reconocibles. Este principio nos deja claro al mismo tiempo que la

observación de rasgos diferentes del relieve originados por varios agentes morfogénicos en una zona, nos permite determinar los procesos que han actuado y como será analizado más adelante, lo común en el paisaje es la acción conjunta de estos en su modelado.

Cuarto principio: El relieve se desarrolla por etapa, las que se caracterizan por las formas distintivas dadas por la acción de diferentes agentes morfogénicos sobre la superficie. La esencia de este principio parte de la concepción evolutiva del paisaje, el que en su desarrollo va a pasar por diferentes etapas aun bajo la acción del mismo proceso morfogénico, pero que en cada una de esas etapas actuarán agentes diferentes o predominarán unos agentes sobre otros. El ejemplo más clásico y conocido para el relieve cubano es el fluvial, el que ha sido caracterizado en cualquier texto en sus tres etapas fundamentales: juventud, madurez y vejez. Los rasgos de cada una de estas etapas son fácilmente identificables en el paisaje y estas diferentes características van a estar en dependencia del predominio de la erosión de fondo o vertical, de la erosión lateral u horizontal o de los procesos acumulativos. En la aplicación de este principio debe quedar claro que para una misma región se pueden encontrar elementos del paisaje que corresponden a diferentes estadios de la evolución lo que estará en dependencia no sólo de la edad de cada uno de los procesos actuantes, sino también de las condiciones climáticas variables en el tiempo y de las características litológicas y tectónicas de la zona.

Quinto principio: La complejidad geomorfológica es más común que la simplicidad. En el estudio del relieve de una región con excesiva frecuencia se encuentran rasgos del paisaje que han sido originados por diferentes agentes morfogénicos, al mismo tiempo estos rasgos pueden encontrarse en estadios diferentes de su evolución. La interacción de estas formas diferentes permite asegurar que tanto desde el punto de vista de su génesis como de su desarrollo histórico existe el predominio de la complejidad geomorfológica sobre la simplicidad, lo que siempre debe tenerse presente en la interpretación de una región.

Teniendo en cuenta el grado de complejidad se acostumbra a clasificar el relieve en cinco tipos diferentes.

1. Simple: Es considerado el relieve resultante de la acción de un proceso morfogénico dominante. Debe quedar claro que es dominante y no único, esto último puede considerarse prácticamente como inexistente.
2. Compuesto: Es el relieve resultante de la acción conjunta de dos o mas procesos morfogénicos, los cuales pueden encontrarse en diferentes estadios evolutivos.

3. Monocíclico: Relieve desarrollado en un solo ciclo o estadio de evolución aun cuando sean el resultado de varios agentes o procesos morfogénicos, lo que podrá encontrarse en aquellas regiones recientemente levantadas del fondo marino y caracterizadas por su homogeneidad litológica y estructural.
4. Policíclico: Pertenecen a esta clasificación los relieves conformados por formas del paisaje pertenecientes a más de un ciclo evolutivo, aun cuando su origen esté asociado a un solo proceso morfogénico. Esto último a que se hace referencia puede explicarse a través del ejemplo de una región de relieve simple de génesis fluvial donde se han desarrollado elementos morfológicos de diferentes etapas, condicionado por cambios litológicos, los que han favorecido el avance de la erosión de forma diferenciada, haciendo que en unos sectores se presenten rasgos de juventud y en otros de madurez o vejez.
5. Desenterrado o exhumado: Es el relieve antiguo expuesto a la superficie después de haberse erosionado parcial o totalmente la cobertura sedimentaria o volcánica que lo cubrió durante una etapa del desarrollo geológico de la región.

Sexto principio: Sólo una pequeña parte del relieve actual es más antigua que el Paleógeno, siendo la mayor parte del mismo no más antigua que el Pleistoceno. Las investigaciones realizadas sobre diferentes regiones del planeta evidencian que el relieve de la superficie terrestre es muy joven, originado durante el Cuaternario, encontrándose sólo pequeños sectores de relieve antiguo. Las causas que justifican este fenómeno son explicadas en el próximo principio a partir del desarrollo de la última glaciación. Cuba constituye un ejemplo típico de este principio, pues su relieve es resultado de los procesos morfogénicos desarrollados en la etapa post-miocénica, lo que es evidente por que casi toda su superficie se encuentra cubierta por rocas terrígenas y carbonatadas de génesis marina del Mioceno Medio y Superior, lo que indica que el levantamiento general de la isla fue posterior a esa etapa.

Séptimo principio: Una correcta interpretación del relieve actual sólo es posible a partir de la completa interpretación de los cambios climáticos y geológicos ocurridos durante el Pleistoceno. Las grandes glaciaciones pleistocénicas no sólo afectaron a aquellas regiones que quedaron cubiertas por las grandes masas de hielo, si no que también originaron alteraciones de carácter climático y geológico en casi la totalidad del planeta, esto es provocado por la disminución general de las temperaturas de la atmósfera, la disminución del volumen de agua que circula en la superficie al encontrarse gran parte de esta en estado sólido y al mismo tiempo ocurrir cambios eustáticos. Estos fenómenos a los que se hace referencia trajeron como consecuencia la disminución de los

procesos de meteorización y en mayor grado de las transformaciones químicas en condiciones de superficie, al disminuir el volumen de agua a temperaturas agresivas que circulan por la misma, alteraron la magnitud de las precipitaciones atmosféricas al disminuir la evaporación y al mismo tiempo, intensificaron los procesos erosivos de fondo al haber ocurrido la disminución del nivel del mar, provocando fluctuaciones en las líneas de costa. Por esta razón en el análisis geomorfológico de cualquier región es necesario tener en cuenta los efectos de dicha glaciación, la que al mismo tiempo determina que el relieve actual sea predominantemente post-pleistocénico, ya que la mayoría de las formas antiguas del paisaje fueron transformadas por estas alteraciones.

En el caso de Cuba este fenómeno no ha sido estudiado en profundidad, sin embargo si se hace referencia con frecuencia en la literatura a los cambios de climas húmedos y secos y a las fluctuaciones del nivel del mar durante el Cuaternario.

Octavo principio: Para la correcta interpretación de la geomorfología de una región es imprescindible tener en consideración las condiciones climáticas. Aun cuando en los inicios de este texto se explicó que desde el punto de vista geológico la rama de la geomorfología mas aplicada es la estructural, es necesario tener presente en el análisis geomorfológico las condiciones y variaciones climáticas imperantes en cada zona de investigación, pues se ha partido de que el relieve es el resultado de la interacción de los procesos exógenos con las rocas que afloran en la superficie y cerca de esta, y los procesos exógenos actuantes están en dependencia de las condiciones climáticas de cada región. Cuba presenta a modo general un clima tropical húmedo, sin embargo es por todos conocido que existen variaciones internas incluso en regiones tan cercanas como la porción norte de la región oriental y la sur, por lo que sobre las mismas rocas se desarrollan formas disímiles del relieve.

### **INTERACCION DE LOS PROCESOS MORFOGENICOS Y LA FORMACION DEL RELIEVE.**

Antes de concluir el análisis de los aspectos más generales de la geomorfología como método de investigación geológica, se hace necesario analizar la relación existente entre los procesos morfogénicos y el relieve resultante.

En la conformación del relieve actúan de forma interactiva los procesos exógenos y endógenos, aun cuando exista el predominio de unos sobre los otros. Estos procesos actúan en sentido contrario y para ello haremos el análisis de forma independiente.

Los procesos exógenos son clasificados en denudativos y acumulativos en dependencia de si sus efectos son degradadores o tendientes a rebajar las formas elevadas o positivas del relieve y

acumulativos cuando su función es la de rellenar las depresiones o formas negativas. Según estas tendencias, la acción de los procesos exógenos conllevan a la nivelación de la superficie, lo cual no ocurre de forma totalizadora por la acción de los procesos endógenos, responsables de las deformaciones tectónicas, la formación de los cuerpos magmáticos y metamórficos y las grandes deformaciones catastróficas ocurridas durante los movimientos telúricos.

Al analizar lo anteriormente expresado queda claro que ambos grupos de procesos actúan de forma general en sentido contrario, pero en su conjunto son los responsables del relieve resultante, por lo que se les ha dado en llamar el par dialéctico de unidad y lucha de contrarios a escala planetaria.

En cualquier investigación geomorfológica es imprescindible reconocer el papel que cada uno de ellos desempeña en la conformación del paisaje, ya que desde el punto de vista geológico, que es la razón de la aplicación de los métodos geomorfológicos, el objetivo fundamental es determinar el proceso morfogenético actuante y con ello la estructura geológica en su estilo y composición que le dio origen al relieve resultante.

### **METODOS DE INVESTIGACION GEOMORFOLOGICA.**

La geomorfología como toda ciencia tiene sus métodos de investigación, sin embargo como todas las ciencias naturales y en especial como todas las geociencias, su método fundamental es la observación directa, en condiciones naturales, de las formas del terreno, observación que naturalmente debe evitar las ilusiones ópticas y que intentará ver el relieve desde distintos ángulos. Conjuntamente con el levantamiento o cartografiado geomorfológico existen otros métodos auxiliares como los métodos aéreos, los métodos morfométricos y la interpretación de los mapas topográficos. A continuación se hará un análisis de las principales características de cada uno de estos métodos.

El levantamiento o cartografiado geomorfológico consiste al igual que en el mapeo geológico en la observación directa en el campo, bajo condiciones naturales, en este caso de los rasgos del relieve, sin dejar de observar los elementos geológicos que condicionan el mismo. Las etapas generales del levantamiento son las siguientes:

Preliminar o preparatoria: En esta etapa la tarea fundamental es el estudio de toda la bibliografía que sobre el área de trabajo existen, lo que permitirá la confección de las fichas bibliográficas; selección y preparación de los materiales de trabajo; establecimiento de las normas de trabajo con las cuales se desarrollará el mismo y planificación de las etapas de trabajo posteriores en dependencia de las características del proyecto técnico que ha sido aprobado.

En esta etapa se realiza en ocasiones de forma superficial y en otras de forma minuciosa de los mapas topográficos y de las fotografías aéreas y en caso de que se vayan a aplicar los métodos morfométricos se confeccionan durante esta etapa.

Etapa de campo: Esta es la etapa del levantamiento propiamente dicho y la misma se desarrollará en tres subetapas: Reconocimiento, la que ocupa el 10 % del tiempo total dispuesto para el trabajo de campo y en la cual se unifican criterios en cuanto a la documentación. De campo propiamente dicha, donde se realiza la documentación por puntos de muestreo y ocupa el 80% del tiempo de trabajo y la Final o de comprobaciones que ocupa el 10% restante y la que será utilizada de forma combinada con la etapa siguiente o de gabinete para realizar cualquier tipo de corrección sobre la información obtenida y procesada.

El levantamiento puede ser de carácter selectivo o intensivo. El levantamiento intensivo se realizará en el caso específico en que las investigaciones tengan un carácter detallado, donde además no se hayan realizado investigaciones de fotointerpretación y morfometría detalladas y a la escala equivalente al levantamiento, por lo cual deberá garantizarse el barrido de todo el territorio estudiado debiendo cumplirse que la documentación se realice cada un centímetro del mapa.

El levantamiento selectivo se desarrollará en aquellas investigaciones donde la información obtenida de los trabajos precedentes y el análisis morfométrico y fotogeológico se haya realizado de manera profunda y minuciosa de forma tal que permita establecer un esquema geomorfológico preliminar que se compruebe selectivamente en los sectores de máxima complejidad. Con el desarrollo de las investigaciones de teledetección y los métodos de procesamiento de imagen se hace cada vez más posible la realización del levantamiento selectivo, lo que garantiza la mayor economía del trabajo, al disminuir el tiempo de trabajo de campo que es el más costoso en cualquier investigación en el campo de las geociencias.

Etapa final o de gabinete es en la que se realizará la interpretación final de toda la información geomorfológica obtenida, lo que permitirá la elaboración del Mapa Geomorfológico de la zona y el informe técnico.

Desde el punto de vista geológico que es en definitiva el objetivo con el cual aplicamos las investigaciones del relieve, el mapa debe mostrar todos los elementos del relieve que reflejan las condiciones geológicas que le dieron origen.

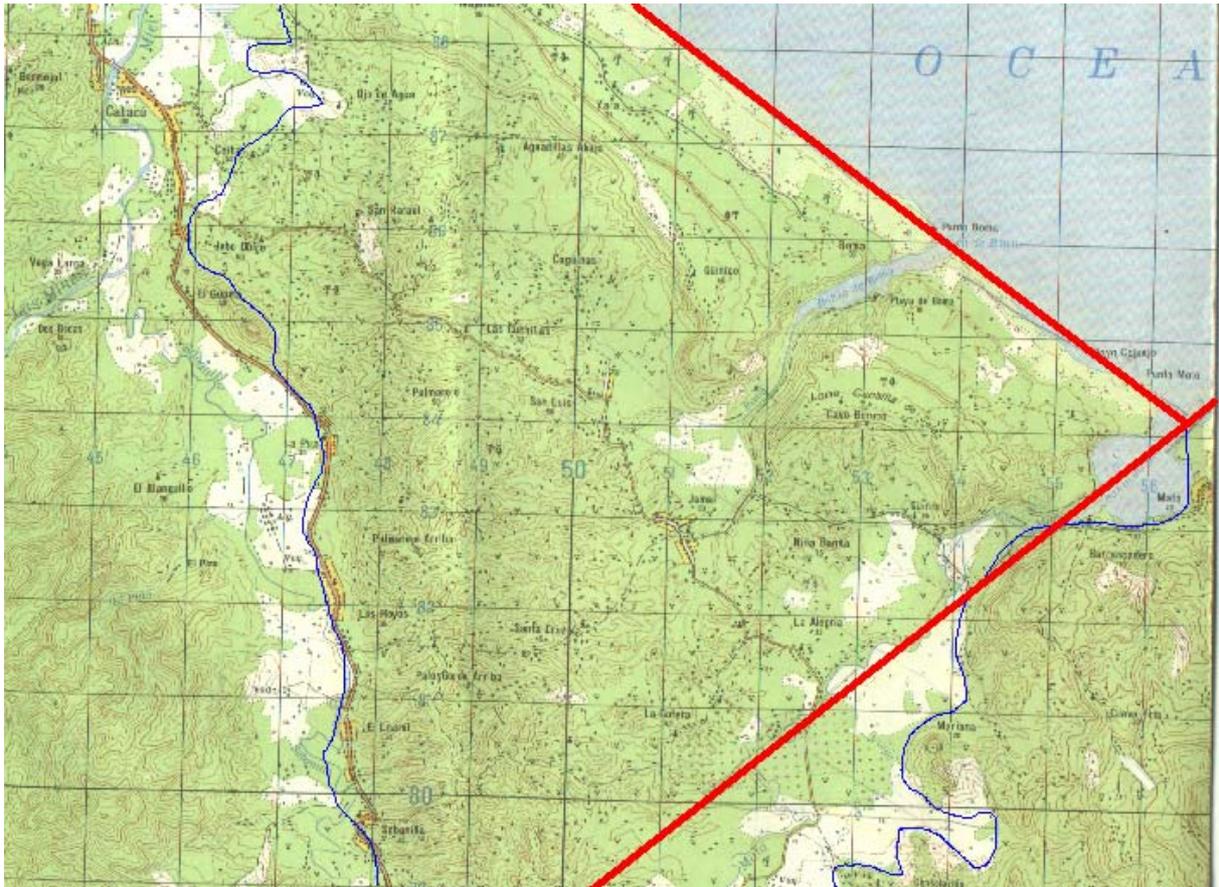
Interpretación de mapas topográficos. Para los geólogos es común el uso de la información topográfica como material imprescindible de orientación del trabajo de campo y para la representación de los fenómenos observados en este; sin embargo, no es común realizar la interpretación integral del mismo durante las investigaciones, al obviar que dichos mapas reflejan

de forma fiel la topografía y esta estará en dependencia de las condiciones geológicas y tectónicas de la superficie. Todo cambio en la configuración, densidad y cotas de las curvas de nivel son indicadores de cambios en las rocas subyacentes, lo que ocurre de igual manera con los sistemas fluviales y otros elementos del paisaje que en el mismo están representados.

En el análisis de la función de los mapas topográficos no pretendemos que pueda considerarse que este sustituirá la observación directa de campo, pero si que favorece la interpretación integral del área investigada, permitiendo establecer las primeras interrogantes, orientar el trabajo de campo y confeccionar los perfiles geomorfológicos del territorio.

Para ejemplificar lo anterior en la figura 2 se muestra un sector del mapa topográfico de la zona de Sabana, Plancheta 5376-IV a escala 1: 50 000 donde se analizarán las principales interrogantes que pueden establecerse de su interpretación.

Al observar el mapa se diferencian tres sectores con comportamientos diferentes de las curvas de nivel. En el sector más occidental las curvas se presentan con un trazo lineal homogéneo y alargado de orientación noreste que enmarcan elevaciones de cimas alargadas y agudas, manteniendo los arroyos principales esa orientación. En el sector central las curvas son sumamente sinuosas enmarcando un relieve altamente diseccionado por la erosión con un pobre desarrollo del sistema fluvial lo que evidencia un suelo permeable. Dentro de este sector se encuentra desarrollado el valle del río Mata que desemboca en la bahía de bolsa de igual nombre, el que se va caracterizar por su comportamiento normal desde la parte alta hasta llegar a la parte sureste del Guirito, donde comienza a estrechar su cauce de manera brusca hasta la propia desembocadura, en que forma un valle en V pronunciada, lo que demuestra un comportamiento anómalo que sólo puede ser justificado por efectos litológicos o tectónicos; en este caso todo parece indicar que ambos factores intervienen, ya que en esta zona está el contacto con las rocas calcáreas miocénicas, mientras que la existencia de la propia bahía con su estructura de bolsa indica la presencia de fallas transversales a la costa y la alineación del valle y algunos de sus afluentes, así como la alineación de la costa en el borde oriental de la bahía permite considerar la existencia de una falla donde la componente del desplazamiento horizontal ha sido en sentido izquierdo – siniestro – y el vertical queda marcado por un máximo levantamiento del sector oriental. El tercer sector u oriental mantiene un comportamiento intermedio entre los dos anteriores pues aquí las curvas son más regulares que en el sector dos, pero no presentan una orientación predominante y las pendientes del terreno son igualmente muy variables.



**Figura 2:** Sector noroeste del mapa topográfico de la zona de Sabana.

Escala original 1: 50 000.

En la zona costera pueden observarse algunas de las terrazas que caracterizan la región con una alineación NW – SE paralelas a la costa alineada la que se supone se encuentra limitada por fallas. Con esas observaciones realizadas, en la orientación del trabajo de campo ya es posible buscar las zonas donde se deben poner en contacto las diferentes litologías que afloran en la superficie, las estructuras de mayor rango que afectan las rocas e incluso en este caso, entrar en consideraciones acerca de las direcciones principales de los desplazamientos tectónicos que en la etapa más reciente han ocurrido en la zona.

Métodos morfométricos: Por la propia etimología de la palabra, son métodos que se utilizan para obtener información acerca de las medidas de las formas del relieve, por lo cual los mismos son de amplia aplicación en las investigaciones geomorfológicas de interés geológico. La confección de estos mapas tienen como base la información reflejada en los mapas topográficos, con la única diferencia que en los mapas morfométricos la misma se sintetiza y se unifica según el tipo de mapa que se confeccione. La aplicación de estos mapas abarca todas las ramas del trabajo geológico,

desde los estudios regionales, los análisis neotectónicos, hasta la proyección de obras ingeniérriles, aun cuando como veremos en la interpretación de cada uno de ellos, su máxima aplicación es en los estudios tectónicos.

Los principales métodos morfométricos utilizados serán descritos a continuación, siendo imprescindible aclarar que existen software que realizan estos mapas a partir de la digitalización de los mapas topográficos. De igual forma se darán algunos elementos de su interpretación aun cuando es necesario aclarar que se obtienen los mejores y más integrales resultados cuando se interpretan de manera conjunta todos los métodos, complementándose los datos de unos con los de los otros.

Mapa de pendientes: Consiste en la representación areal de la variación de los valores de pendiente de un sector de la superficie. Para la confección del mapa se parte del criterio de que áreas con separación similar de las curvas de nivel presentan iguales valores de inclinación, por lo cual la primer tarea consiste en separar los sectores del mapa con comportamiento similar de las mismas, determinando para cada sector los valores de pendiente que le corresponden en dependencia del espaciamiento entre curvas según la fórmula

$$\tan\alpha = \frac{\Delta h}{e}$$

Donde:

$\alpha$  : Angulo de pendiente.

$\Delta h$  : Desnivel o separación vertical entre curvas.

$e$  : Espaciamiento horizontal entre curvas.

Para facilitar el trabajo de confección del mapa se establece en la etapa inicial los intervalos o rangos de pendientes con los cuales se va a trabajar en dependencia de los objetivos que se persigan. Para ello es importante conocer las normas que están establecidas para la tarea en específico como por ejemplo, en la construcción de carreteras y caminos están establecidos los valores de pendientes aceptadas para cada tipo de vía; y en el estudio de los yacimientos de corteza de intemperismo ferroniquelífera se ha estudiado la variación de los espesores y grado de conservación de las lateritas según la inclinación del terreno, estando claro que para valores entre 0° y 10° existe un buen desarrollo y conservación de las cortezas, para pendientes entre los 10° y 15° las cortezas aparecen con poco espesor y ausencia de los horizontes superiores y que para pendientes mayores de 15° las cortezas pierden interés industrial.

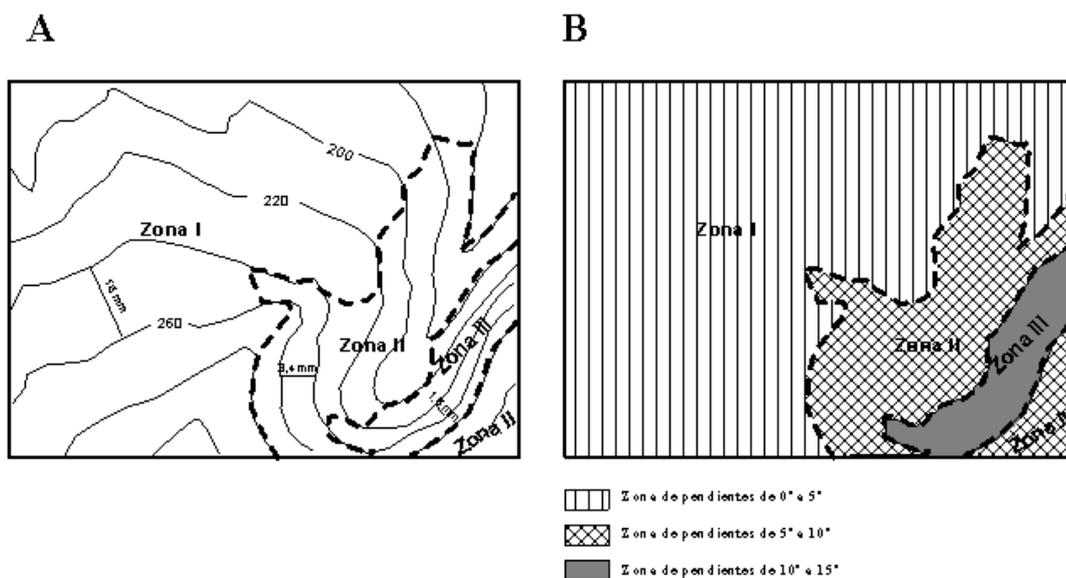
Conociendo los intervalos de interés según el trabajo a realizar se confecciona una tabla como la que se muestra a continuación:

| Angulo de pendiente | Espaciamiento horizontal (e) |                         |
|---------------------|------------------------------|-------------------------|
|                     | Para $\Delta h = 20$ m       | Para $\Delta h = 100$ m |
| 0°                  | Infinito                     | Infinito                |
| 5°                  | 4,57 mm                      | 22,85 mm                |
| 10°                 | 2,23 mm                      | 11,15 mm                |
| 15°                 | 1,49 mm                      | 7,45 mm                 |

**Tabla 1:** Cálculo del espaciamento horizontal según los grados de pendiente.

Para el cálculo de estos valores hay que tener en cuenta la escala del mapa con que se está trabajando y el espaciamento vertical entre las curvas para el mismo.

Ya con las áreas seleccionadas y midiendo los valores medios de separación entre las curvas de nivel se procede a determinar el rango al cual pertenece cada sector. A continuación se ofrece un ejemplo gráfico en las figuras 3 A y B de cómo se realiza la determinación de los sectores y de los ángulos de pendiente. Después de confeccionado el mapa se procede a su interpretación, la que estará en dependencia de los objetivos iniciales con los cuales se confeccionó.



**Figura 3:** Confección del mapa de pendientes.

**A:** Selección de áreas de similitud entre las curvas.

**B:** Valores de pendientes por sectores.

Por ejemplo, si el interés consiste en determinar los sectores de prospección de yacimientos ferroniquelíferos, aquellos sectores con pendientes mayores de 15° quedan definitivamente desechados en las áreas de desarrollo de dicha corteza, mientras que en los de valores entre 10° y 15° se trabajará con reserva y en dependencia de los resultados de otros métodos aplicados.

En el caso de referirse por ejemplo a un proyecto de construcción de carreteras que dentro de sus normas no admita pendientes mayores de 5°, se propondrá un trazado por áreas donde el costo de desbroce y aplanamiento sea el mínimo.

En los estudios tectónicos siempre será de interés la alineación de los sectores de máximas pendientes y más en aquellos lugares donde se ponen en contacto con zonas llanas o de muy baja pendiente que pueden ser indicadoras de un escarpe de falla o de línea de falla, así como los sectores que han sido sometidos a los mayores ascensos lo que puede quedar justificado por la mayor erosión ante la presencia de igual litología. En la interpretación del mapa es importante en ocasiones determinar el sentido en que se desarrollan esas pendientes, es decir no sólo su valor sino también su dirección o cambios en dicha dirección con el objetivo de determinar el sentido de la erosión. De igual forma en estos estudios de erosión a los que se hace referencia es importante evaluar si las pendientes aparecen o no articuladas entre sí. En específico pueden realizarse diversas interpretaciones, pero eso sólo será posible a partir de la aplicación práctica del método.

La figura 4 que se muestra a continuación, corresponde al área suroriental de Guantánamo de la carta topográfica a escala 1: 50 000 donde se confeccionó el mapa de pendientes según los rangos 0°-3°, 3°-6°, 6°-9°, 9°-12°, 12°-15° y más de 15°, los cuales fueron representados por un aumento de la densidad de la trama según aumenta el grado de pendiente.



**Figura 4:** Mapa de pendientes de la zona de contacto entre el Valle de Guantánamo y Sierra del Maquey.

En el mapa se puede observar que existe una alineación de las pendientes máximas de dirección predominante norte sur aun cuando presenta algunas inflexiones indicadoras de alineaciones al parecer de carácter tectónico. Esa zona alineada de máximas pendientes corresponden a la vertiente occidental de la Sierra del Maquey donde se encuentra el contacto entre las rocas de la formación de igual nombre con las areniscas de la Fm. San Luís, pero al parecer y tal como se observará mas adelante en los otros métodos aplicados existen movimientos verticales a través de una falla profunda que limita la morfología de la zona, levantándose el bloque más oriental.

De igual forma si se observa en detalle la parte sur, la mayor inflexión que ocurre en esta franja de altas pendientes coincide con la alineación anómala que se muestra en el límite de la bahía y que se mantiene hacia el este con una alineación entre pendientes de diferentes valores, la cual es señalada con una línea roja de trazo discontinuo.

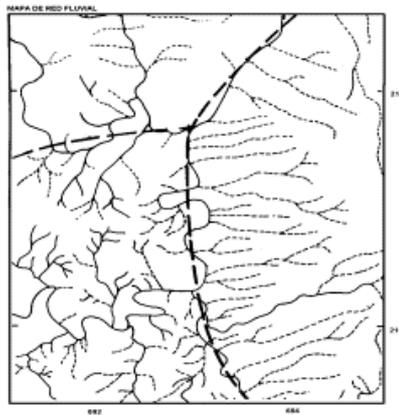
Toda la parte occidental presenta valores de inclinación de 0° a 3°, correspondiendo a la parte oriental del Valle de Guantánamo y ya hacia el extremo oriental de la sierra vuelven a obtenerse bajos valores de pendiente.

Mapa de red de drenaje o fluvial: Para las condiciones geomorfológicas cubanas, donde los procesos morfogénicos fundamentales son los fluviales, el estudio del comportamiento de la red de drenaje tanto en su forma como en su densidad constituye un elemento de gran importancia. El drenaje de cualquier región de la superficie terrestre está condicionado por varios factores, dentro de los cuales los más importantes son el clima, la litología, la topografía y las condiciones estructurales del terreno, los que permitirán utilizar la información de estos mapas en la valoración geológico tectónica del territorio y en la proyección de las construcciones.

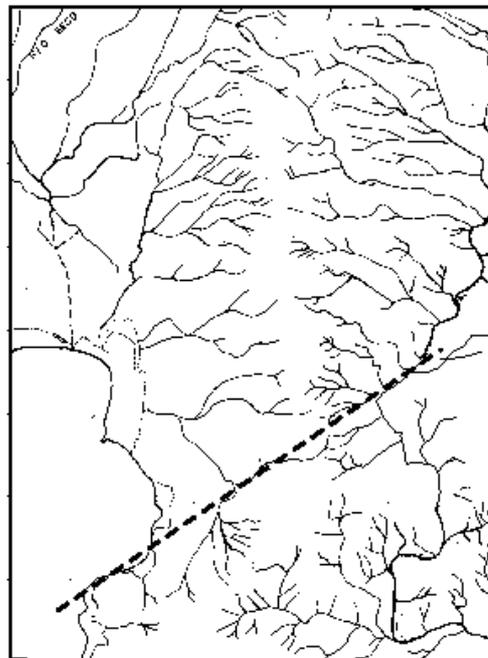
Para la confección del mapa de red fluvial se parte del sistema de ríos y tributarios representado en el mapa topográfico, tanto en sus cauces permanentes como temporales, después de lo cual se procede al trazado de todas las cárcavas y afluentes que quedan inferidas por las curvas de nivel hasta llegar a los extremos mas elevados de la red fluvial tanto en su cabecera como en los márgenes de la cuenca. Después de trazada la red, el objetivo fundamental estará en la determinación de las principales alineaciones que pueda presentar la red, las anomalías en el comportamiento del drenaje así como las variaciones en la densidad del mismo.

A continuación se muestra en la figura 5 el mapa de red fluvial que fue confeccionado en río Moa comprendida en la zona de la presa Nuevo Mundo, entre los poblados de Caimanes y Calentura. Es fácilmente observable en el mismo las variaciones de la densidad del drenaje entre la vertiente oriental y occidental del río principal, mientras que en la propia vertiente occidental existen variaciones entre la porción norte y sur, lo cual nos da una idea no sólo de las variaciones

topográficas sino también litológicas. De igual forma la configuración de la red de drenaje es un indicador de estos cambios a los que hemos hecho referencia. El comportamiento de la red en la parte este es típico del drenaje en zona de escarpe de falla asociado al bloque que sufre los máximos levantamientos, al presentar afluentes en redes paralelas o subparalelas alargadas y pobremente ramificadas. Hacia la parte suroccidental el comportamiento dendrítico de densidad media indica una homogeneidad litológica-estructural. Hacia el noroeste la densidad del drenaje es menor correspondiente a suelos permeables y con una configuración totalmente diferente. En la figura, con líneas de trazo más grueso y discontinuo se marcan las principales alineaciones, pudiendo notarse otras menores que no han sido señaladas.



**Figura 5:** Mapa de red de drenaje de un sector de río Moa.



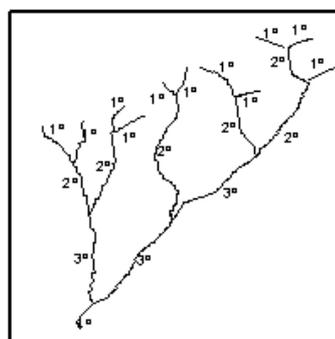
**Figura 6:** Mapa de red de drenaje de la zona de contacto entre el Valle de Guantánamo y Sierra del Maquey.

El mapa de red fluvial del área de Guantánamo de la figura 6 corresponde a la misma área que con anterioridad se había mostrado en el mapa de pendientes.

En el se pueden observar las alineaciones entre cursos de las cuencas del río Yateras y de los ríos del oeste que son indicadoras de posibles fracturas, observándose que hacia la vertiente oriental los ríos del segundo orden aparecen alargados, mientras que hacia la occidental son cortos y más ramificados. En la parte sur se marca de igual forma la alineación de varios afluentes coincidente con la alineación costera de la zona de la bahía que ya se ha analizado y constituye un elemento a considerar el que algunos afluentes –los más occidentales- que son cortados por dicha alineación desagüen hacia el norte, encontrándose la costa más cercana hacia el sur y el este, lo que puede indicar que la parte sur se eleva respecto a la norte.

Es imprescindible reiterar que en el caso de la aplicación de los métodos morfométricos en los estudios regionales para regiones de clima tropical húmedo el mapa de red fluvial es considerado el de mayor aplicación teniendo en cuenta que los procesos fluviales para estas regiones son los principales en el modelado del terreno.

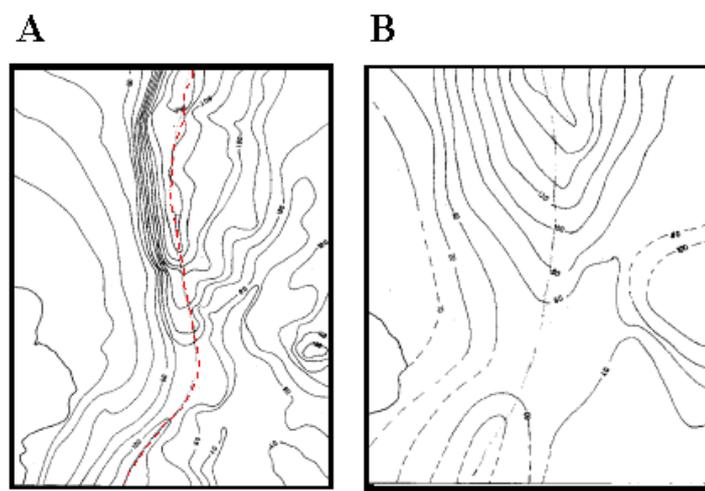
Mapas de isobasitas: Estos mapas marcarán los niveles de base de erosión de los ríos de un determinado orden, el cual va a estar dado por el tiempo de su formación, denominándose primer orden a los ríos más jóvenes o de última formación y sucesivamente serán más viejos a medida que el orden sea mayor, de esta forma los cauces de primer orden serán aquellos que no reciben agua de ningún otro tributario es decir, son los primeros canales en encausar las aguas, más conocidos por cárcavas y cañadas. La unión de dos cursos de primer orden dará lugar a la formación de un curso de segundo orden y así sucesivamente, ahora bien, cuando se unen dos cursos de órdenes diferentes se mantiene el orden del superior tal y como se muestra en la figura 7.



**Figura 7:** Mapa de órdenes de los ríos.

Después de confeccionado el mapa de órdenes, se superpone el mismo al mapa topográfico, buscándose los puntos de intersección de los ríos de un orden determinado con las curvas de nivel, poniéndose en esos puntos los valores de la cota topográfica. Después de marcados todos los puntos se unen con líneas rectas o curvas los puntos de igual valor. Estos mapas se construyen para los ríos de segundo orden en adelante, pues los del primer orden darían como resultado final un mapa similar al topográfico actual.

La interpretación de estos mapas es de gran utilidad en los estudios tectónicos y neotectónicos en particular y en la evaluación de la intensidad de la erosión en el tiempo. A continuación se muestra en la figura 8 el comportamiento de las isobasitas en el área de Guantánamo antes referida.



**Figura 8:** Mapas de isobasitas de la zona de Guantánamo.

**A:** Segundo Orden. **B:** Tercer Orden.

Si se observa el mapa de segundo orden se notará que existe una asimetría en el comportamiento de las curvas de isobasas entre una y otra ladera de la actual Sierra del Maquey, del mismo modo se podrá notar una variación en el comportamiento de estas hacia el sur, formándose dos bloques de cierres, uno hacia el norte y otro al sur de la anomalía a la que se había hecho referencia anteriormente. Hacia el norte los valores máximos que se alcanzan son de 240 m, mientras que al sur llegan a los 100 m. Tanto hacia el este como hacia el oeste del eje de esta zona de cierres positivos se observa un descenso de los valores de las isolíneas, sin embargo este descenso no se comporta por igual en ambos casos. Hacia el oeste el descenso ocurre de forma regular y gradual con curvas casi paralelas, mientras que hacia el este las isolíneas se comportan de forma sinuosas e irregulares formando cierres locales indicadores de variaciones litológicas y estructurales.

Al observar el mapa del tercer orden se nota que en una posición casi paralela, pero no coincidente, si no algo desplazada hacia el este se encuentra el eje de la estructura de cierre de las isolíneas positivas pertenecientes al parte de agua principal de la Sierra del Maquey que alcanzan valores máximos de 180 m en la parte septentrional y 80 m en la meridional, formándose de igual forma una ruptura entre la parte norte y sur que está asociada espacialmente a la misma alineación referida.

Al comparar este mapa con el del segundo orden se nota que el comportamiento de las isobasitas aquí es simétrico entre ambas vertientes y el descenso de los valores hacia el oriente y el occidente ocurre de forma similar que en el caso anterior pero también con mayor regularidad. Como resultado de esta comparación podemos plantear que en periodos recientes han ocurrido movimientos de ascensos diferenciados entre la parte perteneciente a la Sierra del Maquey y el valle de Guantánamo que ha provocado el desplazamiento de la divisoria o eje de la estructura levantada hacia el oeste al favorecerse la erosión en el sector de la sierra que colinda con el valle y que al mismo tiempo ha provocado la asimetría en las isolíneas del segundo orden. La ruptura que ocurre en la parte sur de los cierres positivos en los dos órdenes analizados se suman como criterio para suponer la existencia de una fractura, lo que sumado a la desviación que ocurre en los ejes, el desplazamiento de la línea de costa en la parte perteneciente a la bahía, la presencia de costa recta y alineada y la inflexión de la franja de máximos valores de pendientes que se presenta asociada a la misma zona nos permite asegurar la existencia de una falla con una componente horizontal importante de tipo diestro, mientras que la componente vertical indica un ligero levantamiento del bloque sur justificado en primer lugar por la ampliación de las isobasas hacia este bloque y por el drenaje en sentido norte de los arroyos que son cortados por dicha fractura. Aunque en este material no se presentará, en el mapa de disección vertical de la zona se observa que la erosión de fondo alcanza el mismo rango de valores en el norte y sur de la estructura, lo que sólo queda justificado por el levantamiento del bloque sur, ya que el descenso topográfico normal es hacia el sur.

Existen otros métodos morfométricos como son los de disección vertical y horizontal que son indicadores de la erosión de fondo y lateral, los mapas de cimas, de relieve residual y frente de sinuosidad de las montañas que informa sobre el carácter tectónico de los límites montañosos alineados. La aplicación de algunos de estos métodos y la metodología de su confección podrán ser consultadas en textos referidos en la bibliografía como son Principios de la Metodología de la Investigaciones de Campo y el Mapeo Geomorfológico de Spiridinov y Geotectónica General de Jain.

Métodos aéreos. Se consideran métodos aéreos todas las observaciones con fines geomorfológicos que pueden realizarse desde un avión hasta la interpretación de las fotografías aéreas. La aplicación del método como tal ha ido desarrollándose de forma progresiva y debe tenerse en cuenta que el uso de las fotografías aéreas con fines geológicos sólo es posible por el vínculo existente entre los caracteres geomorfológicos, la estructura geológica y la litología aflorante.

Los principios de la aplicación de estos métodos se estudiará en la parte correspondiente a Teledetección y Fotogeología.

## **LOS PROCESOS GEOLOGICOS Y LA FORMACION DEL RELIEVE. PRINCIPALES FORMAS DEL RELIEVE.**

En el análisis de las principales formas del relieve desarrolladas a partir de la acción de los diferentes procesos morfogénicos, es imprescindible reconocer que en la formación del relieve actúan de forma conjunta varios procesos los que pueden encontrarse en distintos estadios evolutivos y que la acción de cada uno está condicionada por la influencia de diferentes factores, dificultando ello la interpretación práctica y real de cada uno de sus elementos.

No obstante a lo anterior, es frecuente el reconocimiento de las formas típicas generadas por la acción de un agente determinado. A continuación se realizará el análisis de cada proceso, los criterios para su reconocimiento y la importancia de los mismos desde el punto de vista práctico, iniciándose por los procesos morfogénicos de carácter exógeno y dentro de estos por el proceso condicionador en gran medida de los otros procesos de superficie que es la meteorización.

La meteorización como proceso morfogenético es la responsable de la formación del suelo, estando condicionado su desarrollo e incluso la propia continuidad y conservación de sus productos por las características del relieve, en particular por el grado de inclinación de las superficies topográficas y por ende de la dinámica del escurrimiento superficial. En zonas de altas pendientes los productos del intemperismo, aún cuando puedan llegar a formarse debido a las condiciones climáticas y litológicas apropiadas, no tendrán posibilidad de conservarse al ser arrastrados por las aguas de arroyadas o por el escurrimiento pluvial, lo que condicionará el afloramiento de la roca madre en dicha superficie, mientras que en las hondonadas o bases de dichas pendientes se acumulará el eluvio, creando depósitos que podrán ser temporales o permanentes en dependencia de la dinámica erosiva. Por otro lado, en las zonas de muy baja pendiente el producto meteórico se conserva , pero su desarrollo es lento y poco potente ya que el movimiento de las aguas tanto superficiales como subterráneas es excesivamente lento, lo que provoca que se recarguen rápidamente de sustancias que impiden el intercambio químico activo. Se puede concluir que las mejores condiciones para el desarrollo y conservación de potentes cortezas meteóricas se obtienen en relieves de pendientes

moderadas. Con lo anterior queda explicado a groso modo la influencia del relieve en el desarrollo de los procesos de intemperismo, pero al mismo tiempo, este es un proceso condicionador del relieve resultante de una región, al determinar el volumen de material detrítico suelto que puede ser arrastrado por los agentes erosivos, a la vez que condiciona el desarrollo de la vegetación que es otro elemento controlador del paisaje. A medida que se hace más intensa la meteorización de una región, tiende a hacerse más suave el relieve, perdiéndose progresivamente las angulosidades del mismo.

Desde el punto de vista geológico el estudio de las zonas de predominio de los procesos de meteorización va a estar determinado por la posible asociación de yacimientos de corteza como es el caso de los yacimientos lateríticos y bauxíticos, así como en el estudio de suelos para obras ingeniérriles, además del aporte que a la rama de la agricultura se realiza evaluando los suelos para los cultivos.

En estrecha relación con los procesos de meteorización se encuentran los deslizamientos de suelos y rocas condicionados por la fuerza de la gravedad, los que van a constituir un agente fundamental del modelado del paisaje en las regiones de montañas, al tender a establecer las pendientes de equilibrio en aquellas zonas en que los procesos tectónicos o antropogénicos han provocado la ruptura de las mismas. La magnitud del deslizamiento va a estar en dependencia de las condiciones del suelo, magnitud de las pendientes y la acción de las aguas tanto superficiales como subterráneas. El estudio de los movimientos gravitacionales en la práctica geológica tiene como fin fundamental la conservación de las obras construidas, en los estudios preliminares a los proyectos constructivos, además de los estudios medioambientales por su influencia en la ruptura del equilibrio ecológico al poder alcanzar estas grandes dimensiones.

Otra forma del relieve relacionada con la meteorización es el relieve cárstico desarrollado por la disolución de rocas solubles y agrietadas bajo la acción de las aguas superficiales y subterráneas en zonas de clima tropical húmedo. En Cuba esta forma de relieve presenta una gran extensión superficial al encontrarse las condiciones climáticas necesarias y estar cubierta su superficie en una gran extensión por rocas calcáreas miocénicas y postmiocénicas.

Las formas del relieve cárstico varían desde pequeñas depresiones u orificios verticales conocidos como *diente de perro*, *Karren* o *Lapiez*, hasta mogotes o elevaciones de formas cónicas o cerros de cimas redondeadas y paredes abruptas como los típicos de Viñales, pasando por las abundantes dolinas o embudos que pueden aparecer tanto en las cimas o laderas de los sistemas montañosos como en las zonas costeras de rocas calcáreas. Para el territorio cubano existe un estudio bastante detallado de las formas del relieve cárstico realizado por A. Núñez Jiménez, el cual clasificó además

el carso en Cuba en diferentes tipos y subtipos lo que puede ser consultado en la bibliografía referida.

Desde el punto de vista geológico la determinación de las áreas cársicas constituyen un criterio para la delimitación de las áreas de afloramiento de las rocas solubles e incluso de determinación de estructuras de fractura y en específico de fallas, ya que como norma en las zonas de fallas se desarrollan las mayores depresiones cársticas al favorecerse el proceso de erosión diferencial. La delimitación de las zonas cársticas es de importancia vital en la proyección de obras ingeniérriles tanto de carácter civil, militar y en las construcciones mineras.

Respecto a los procesos erosivos se hará referencia a aquellos procesos de mayor influencia en el relieve cubano como son los procesos fluviales y costeros.

Los procesos fluviales son los principales modeladores del relieve cubano, constituyendo por lo tanto el elemento que más información puede dar sobre las condiciones litológicas y tectónicas de una región. De los conocimientos geológicos básicos es conocido que el proceso de desarrollo de un sistema fluvial se realiza a través de etapas o estadios cada uno con características específicas que estarán condicionadas por los factores topográficos, tectónicos y litológicos. Para el análisis de estos factores debe partirse que para iguales condiciones climáticas y tiempo de exposición a los agentes denudativos el grado de erosión que alcanza un río estará en dependencia en primer lugar de la litología por sobre la cual corre, así como por el grado de meteorización de la misma. Rocas menos resistentes o más meteorizadas permitirán el avance rápido de los procesos erosivos con la consecuente formación de llanuras de inundación, meandros y envejecimiento del río, lo cual sólo podrá ser limitado o interrumpido por procesos tectónicos de ascenso, los que se podrán poner de manifiesto de forma continua provocando la profundización del valle, o de forma pulsante favoreciendo el desarrollo de terrazas. Por el contrario en zonas de rocas duras el envejecimiento ocurre de forma lenta, predominando los valles angostos y de paredes verticales cuya morfología variará en dependencia del tipo de roca y de la yacencia que presente la misma. Lo más común en el análisis de las cuencas fluviales es la existencia de varias litologías en toda su extensión, siendo este un factor que permite la determinación de los elementos geológicos. Estos cambios litológicos también determinan la textura del drenaje, a medida que las rocas son más permeables se favorecen los procesos de infiltración y se hace menos denso el drenaje, aumentando la textura en aquellas zonas de rocas impermeables o de pobre desarrollo de los suelos.

En cuanto a la tectónica, su mayor incidencia se determina por el control que sobre la configuración y alineación de los cauces realizan las estructuras tanto plegadas como de fracturas, estas últimas con mas intensidad y regularidad.

El drenaje es controlado por el plegamiento fundamentalmente en aquellas regiones donde la secuencia de rocas plegadas están constituidas por capas de diferentes resistencia a la denudación y el drenaje es más joven que el plegamiento. Bajo estas condiciones los ríos principales corren paralelo al eje de la estructura a través de la zona de afloramiento de las rocas blandas, las que pueden encontrarse tanto en el núcleo como en los flancos de la misma. En caso de plegamiento regional se podrá notar la disposición paralela de varias cuencas, las que sólo perderán ese paralelismo por la existencia de fallas oblicuas al eje del plegamiento, mientras que los tributarios principales corren oblicuos o perpendiculares al eje, con redes subparalelas.

Las zonas de fallas y fracturas crean zonas de debilidad por fricción o trituración de las rocas del plano de ruptura, lo que facilitará el desarrollo de los cauces siguiendo estas zonas de debilidad. Este control se notará con facilidad por la alineación de los cauces de una misma cuenca o de afluentes y cauces de varias cuencas cercanas, en algunos casos se determina por la configuración de la red fluvial la que puede presentar una forma enrejada que indicará agrietamiento o fallamiento en dos direcciones que se cortan entre si.

Con los elementos que se han analizado es elemental reconocer que a través del estudio del paisaje fluvial se puede obtener información primaria de las características geológicas de un territorio que facilitará las investigación, de igual forma en los estudios hidrogeológicos y en la proyección de construcciones de obras ingeniérriles y en particular de carácter hidráulico, el estudio de los sistemas fluviales es de gran importancia.

En el análisis del relieve costero se debe partir de que la morfología litoral va a estar en dependencia de las oscilaciones del nivel eustático y de los movimientos tectónicos tanto de las tierras emergidas como de las zonas marinas. Estos procesos tenderán en caso de que predomine el levantamiento de la zona continental o descenso del nivel del mar a la formación de costas rectas, poco sinuosas, con la posible formación de terrazas si estos movimientos tienen un carácter pulsante y de acantilados, los que se conservarán en el tiempo en dependencia de la competencia o resistencia de las rocas. En caso contrario, las costas se caracterizarán por su morfología sinuosa, con abundantes entrantes y salientes y cayerías, pudiendo notarse la presencia de elementos morfológicos e incluso biológico de zonas intercontinentales o de tierra adentro como se denomina comúnmente, en la zona de costa.

En cuanto a la intensidad de la erosión costera va a estar en dependencia a la profundidad del mar frente a la costa, de la morfología costera y de las características geólogo estructurales de la zona de costa.

En las costas de mares profundos la erosión se intensifica ya que el rompiente del oleaje se desarrolla directamente sobre la misma línea de costa, dando como resultado una costa agresiva

donde no abundan depósitos marinos y de playas y cuando existen, se caracterizan por su inestabilidad y granulometría gruesa. Un ejemplo específico de esto lo constituyen las costas del sur del territorio oriental de Cuba.

En las costas de mar poco profundo en su frente, predominan los procesos de acumulación, disminuyendo la erosión, la que puede llegar a ser nula, al ocurrir el rompiente lejos de la línea de costa o como ocurre en la región nororiental, donde la barrera arrecifal bordea el litoral, el rompiente se encuentra al norte de la barrera y amortigua los efectos del oleaje.

En general podemos concluir respecto a los procesos costeros, que la presencia de determinados elementos erosivos o acumulativos serán indicadores de las características geológicas del territorio y en el caso específico de Cuba, por su condición de isla, son utilizados muy frecuentemente los elementos del paisaje litoral en la interpretación geólogo tectónica regional.

En cuanto a los procesos endógenos el análisis parte del papel que desempeñan los procesos tectónicos sin dejar de considerar la influencia que en algunas regiones en particular pueden tener los procesos magmáticos y metamórficos.

Según el segundo principio geomorfológico que plantea que la estructura geológica es un factor fundamental de control del relieve, al determinar esta la posición que ocupan las rocas expuesta a los agentes denudativos. Los procesos tectónicos no sólo determinan la yacencia de las rocas, si no también la intensidad de los levantamientos y hundimientos relativos de una región respecto a otra, lo que determinará la intensidad de los procesos denudativos y en dependencia de ellos se crearán las formas predominantes del relieve.

Esquemáticamente podemos analizar las relaciones más comunes, partiendo siempre de la necesaria consideración del factor tiempo geológico y condiciones climáticas.

- Regiones donde los procesos de levantamiento tectónicos son relativamente más intensos que los procesos denudativos, en estos la tendencia será la formación de relieves elevados, más elevados en la medida en que sea mayor el levantamiento y más duras las rocas que se encuentran en la superficie.
- Regiones donde los procesos de levantamiento son de similar intensidad a los denudativos, se formará un relieve peniplanizado donde se marcarán con facilidad las diferencias litológicas, dado a la acción diferencial de los procesos denudativos.
- Regiones donde los procesos tectónicos predominantes sean de carácter descendente y estén compensados por los procesos acumulativos, se formará un relieve llano cubierto por una potente capa de sedimentos.

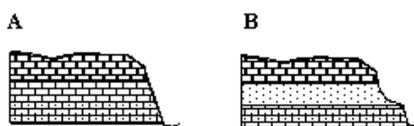
- Zonas donde los descensos tectónicos son más intensos que la acumulación, en las cuales se formarán cuencas deprimidas con poca acumulación de sedimentos.

Existen otras condiciones que pueden presentarse, lo cual debe ser determinado por cada especialista a la hora de realizar la evaluación de una región estudiada y teniendo siempre presente que estas condiciones no son estables en el tiempo, muy por el contrario, la dinámica de los movimientos geotectónicos en el planeta se caracteriza por el cambio en el sentido e intensidad de los desplazamientos, al mismo tiempo que en los relieves antiguos hay que entrar a considerar las variaciones climáticas. Por último queremos hacer referencia al factor antropogénico en este análisis, sobre todo cuando se trata de micro y meso estructuras geomorfológicas, ya que en ocasiones debido a la actividad socioeconómica se alteran las condiciones naturales del equilibrio entre los procesos exógenos y endógenos, desarrollándose formas anómalas para las condiciones regionales.

Un ejemplo de esto lo podemos notar en el río Cayo Guam que ha desarrollado en su parte inferior elementos correspondientes a un río viejo o en estadio de madurez avanzada, lo que ha estado dado por la extracción irracional de los sedimentos de su fondo en la zona de la beneficiadora de cromo, lo que provocó la alteración del ciclo de erosión aguas arriba al bajar el nivel de base de erosión y aguas abajo al aumentar artificialmente el volumen de sedimentos, favoreciendo la acumulación.

Después de haber analizado las relaciones generales entre la tectónica, los procesos morfológicos de carácter exógeno y el relieve resultante, se hará el análisis de los elementos que determinan las principales formas del relieve para cada tipo de estructura geológica.

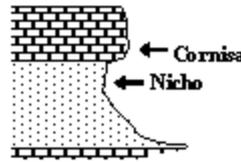
En este análisis se debe partir de las rocas que presentan una yacencia horizontal. El relieve desarrollado sobre las secuencias rocosas horizontales está en dependencia de la composición y grado de resistencia de dichas rocas a los procesos denudativos. Si la secuencia rocosa es de rocas duras y homogénea se desarrollará un relieve de montañas de cimas aplanadas en forma de mesas o mesetas y paredes abruptas. La pendiente de las laderas y el grado de aplanamiento de las cimas serán mayores a medida que las rocas sean más duras.



**Figura 9:** Relieve desarrollado sobre rocas de yacencia horizontal.

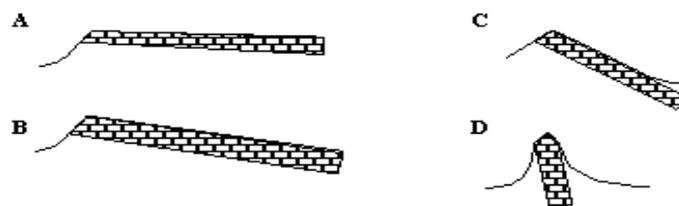
**A:** Secuencia de estratos de rocas duras y **B:** Secuencia donde se alternan estratos de rocas duras y blandas.

Cuando la secuencia sedimentaria es una alternancia de rocas duras y blandas con el tiempo se formará un relieve también elevado pero de laderas irregulares donde se pueden formar cornisas en las capas de roca dura y nichos en las capas de roca blanda, lo que provocará una mayor irregularidad del terreno.



**Figura 10:** Formación de nichos y cornisas en zona de alternancia de rocas duras y blandas.

En zonas donde la secuencia es de rocas poco resistentes y homogénea, la tendencia es la formación de un relieve llano donde pueden aparecer cerros aislados de cimas redondeadas y laderas suaves. En el caso de yacencia monoclinal, además del grado de resistencia a la denudación entra a formar parte de los elementos condicionadores del relieve resultante el ángulo de buzamiento de las capas. En las capas monoclinales de bajo ángulo de buzamiento el relieve resultante sobre rocas duras será de mesas como ocurre en el ejemplo antes descrito de la Mesa de Santa María del Loreto. A medida que aumenta el buzamiento, como se muestra en la figura 11, pasa al relieve de cuestras con una ladera suave que sigue la superficie de capa de roca dura y una ladera abrupta en sentido opuesto donde se facilita la erosión. En los buzamientos por encima de los  $35^\circ$  se forma el relieve de crestas donde las dos pendientes tienden a igualarse, hasta las cúpulas en rocas con yacencia vertical o casi vertical denominadas *Hog's back*. Sobre las secuencias de rocas blandas con yacencia monoclinal se formará un relieve llano donde podrán marcarse los diferentes estratos en dependencia de su dureza.



**Figura 11:** Formas del relieve desarrolladas sobre secuencias de yacencia monoclinal.

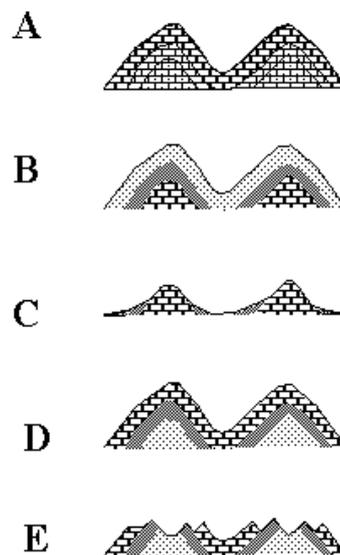
**A:** Mesa, **B:** Cuesta, **C:** Crestas y **D:** *Hog's back*.

Después de haber analizado los casos extremos debe tenerse en cuenta que lo más frecuente en condiciones naturales es la existencia de alternancia entre rocas duras y blandas, dando como

resultado un relieve donde se alternen las formas típicas de las rocas duras como cuestras, crestas y *Hog's back*, con valles dispuestos paralelamente entre si.

En las zonas de desarrollo de estructuras plegadas aumenta la complejidad del relieve que se desarrolla y este va a estar en dependencia no sólo de la dureza de las rocas y del ángulo de buzamiento de las capas que aparecen plegadas, si no también del tipo de plegamiento y profundidad del corte erosivo. Cada uno de estos aspectos serán analizados en su conjunto.

La formación de valles y cordilleras sobre rocas plegadas va a estar en dependencia de la disposición relativa de las rocas duras y blandas respecto al eje o los flancos el pliegue. En una zona plegada constituida por rocas duras, los valles se dispondrán siguiendo los ejes de las estructuras sinclinales y los parteaguas o cordilleras coincidentes con los ejes de los anticlinales.



**Figura 12:** Formas de relieve desarrolladas sobre secuencias plegadas.

**A:** Relieve directo desarrollado sobre una secuencia plegada de rocas duras.

**B y C:** Relieve sobre zona plegada con rocas de diferentes durezas. En la fase inicial de desarrollo se forma un relieve directo (**B**), lo mismo ocurrirá en la fase final (**C**) al encontrarse las rocas duras en el núcleo de la estructura anticlinal.

**D y E:** Relieve sobre zona plegada con rocas de diferentes durezas. En la fase inicial se desarrolla un relieve directo (**D**), pero con el avance de la erosión se forma un relieve indirecto, (**E**), al encontrarse en el núcleo de las estructuras anticlinales las rocas más blandas.

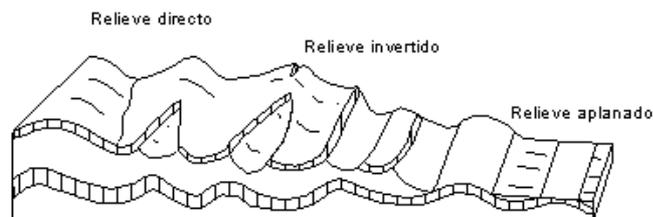
Al existir secuencias estratificadas de rocas con diferentes competencias ante los procesos denudativos, la disposición será en dependencia de la posición de las rocas, si las rocas duras se encuentran en el eje de los anticlinales y las blandas en los flancos, el relieve desarrollado será similar al anteriormente explicado, pero que variará en el tiempo en dependencia de la profundidad del corte erosivo como se muestra en la figura 12; al ser inversa la disposición de las rocas, es decir cuando las rocas duras constituyan los núcleos de los sinclinales y las blandas los núcleos

anticlinales, la disposición del relieve también será inversa, coincidiendo los valles con los ejes anticlinales y las cordilleras con los ejes sinclinales, utilizándose el termino de relieve indirecto para esta situación y directo para los casos anteriores.

Situaciones más complejas se desarrollan cuando las secuencias de rocas duras no se disponen en los núcleos de las estructuras, sino en los flancos, pero los valles y cordilleras se seguirán alineando paralelamente a los ejes de los pliegues.

A continuación se muestra de forma esquemática en la figura 13 el proceso evolutivo de una zona de plegamiento lineal donde se han desarrollado formas del relieve directo, indirecto o invertido y relieve plano, sobre una misma secuencia rocosa, lo que está en dependencia del ciclo erosivo.

Situaciones similares a las que se han analizado para el plegamiento lineal ocurre para las estructuras dómicas y braquipliegues, con la consecuente adaptación de las dimensiones de la estructura y su distribución areal. En cuanto a las redes de drenaje que en el plegamiento lineal tienden a ser paralelas o subparalelas, en los braquipliegues las redes que se desarrollan son de tipo radial para el caso de formas positivas del relieve y centrípetas para formas negativas.



**Figura 13:** Estadios de evolución del relieve sobre secuencias plegadas.

De forma esquemática estas son la formas principales del relieve que se desarrollan sobre las estructuras plegadas, pero en la realidad, esta situación es más compleja, al entrar a considerar el control que la topografía puede realizar en el control del relieve y más aun el papel que las fracturas tectónicas jugarán en el control del relieve. Sin embargo existen criterios generales que pueden utilizarse en la interpretación del relieve sobre secuencias plegadas, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Sobre zonas de plegamiento lineal tienden a desarrollarse valles y elevaciones paralelos.
- El desarrollo de las cuestas siempre se realiza sobre la superficie de capa y siguiendo la dirección de las mismas, es por ello que la presencia de cuestas opuestas y convergentes indican siempre la presencia de estructuras sinclinales y las cuestas opuestas y divergentes indican la presencia de anticlinales.

- Las cuestas originadas por la erosión de un anticlinal que se hunde convergen en la dirección del hundimiento.
- Las cuestas originadas por la erosión de un sinclinal hundido convergen en dirección contraria al hundimiento.

En cuanto a las estructuras de fracturas van a influir en el proceso formador y modelador del paisaje con diferente grado de intensidad y de variadas formas.

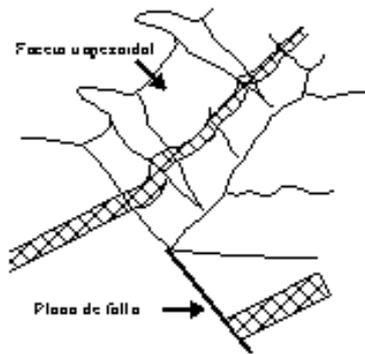
El agrietamiento determinará en primer lugar la densidad del drenaje, al aumentar las posibilidades de infiltración de las aguas meteóricas. Al mismo tiempo controla la disposición y configuración del drenaje si se tiene en cuenta que las fracturas constituyen zonas de debilidad de las rocas, favoreciendo el proceso formador de cárcavas y cauces fluviales. Con mayor intensidad este factor influye en el caso de que la fractura sea con desplazamiento, es decir en presencia de fallas, ya que el propio proceso de desplazamiento al crear fricción entre los bloques de falla favorecen la trituración de las rocas y por lo tanto, la disminución de su resistencia a la denudación.

Debe tenerse en cuenta que la presencia de fracturas bajo cualquier condición climática condicionará favorablemente el desarrollo de los procesos denudativos, tanto meteóricos como erosivos, para ello se analizarán algunos ejemplos.

En regiones periglaciales y de climas templados la presencia de fisuras en las rocas permitirá la acumulación de agua en ellas durante los días cálidos, la que se congelará durante el invierno, provocando la disgregación glacial de las mismas; este material ya fragmentado será más fácil de desprenderse y erosionarse durante el próximo verano, condicionando por ende el modelado del paisaje.

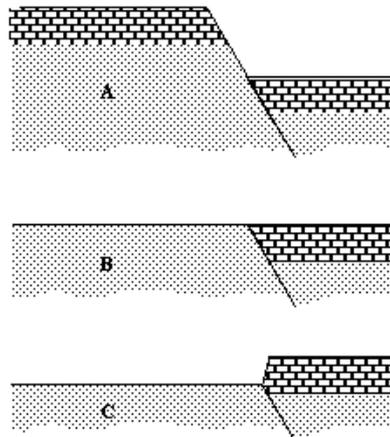
En las regiones tropicales el intenso agrietamiento favorece los procesos de desarrollo de la meteorización física y química al favorecer la infiltración de las aguas meteóricas, de las raíces de las plantas y de los organismos cavadores, todo ello traerá aparejado el aumento de material suelto fácilmente arrastrado por las aguas pluviales o desprendido por la fuerza de la gravedad.

Las fallas como estructuras geológicas también van a originar formas propias del relieve como es el caso de los escarpes de fallas o de líneas de falla, con las facetas trapezoidales que se muestran esquemáticamente en la figura 14, que progresivamente y con la profundización de la erosión se convierten en facetas triangulares.



**Figura 14:** Escarpe de falla con formación de facetas trapezoidales.

La presencia de los escarpes nos permite tener una idea relativa del sentido del desplazamiento de los bloques según el plano de falla, aun cuando es posible que haya ocurrido la inversión del mismo, lo que estará en dependencia de la profundidad del corte erosivo y de las características litológicas cortadas por la falla. Un ejemplo de inversión del escarpe se muestra en la figura 15.

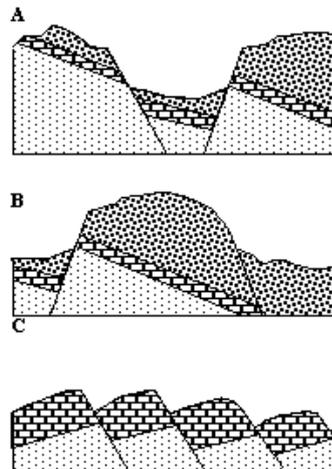


**Figura 15:** Inversión del escarpe de falla.

En la fase inicial del proceso de formación del escarpe se desarrolla un relieve directo al encontrarse la forma positiva del relieve asociada al bloque levantado (A), pero con el avance de la erosión la capa de rocas duras que ocupa la posición estratigráfica superior es erosionada quedando en el bloque levantado las rocas menos resistentes (B), que al encontrarse a la misma altura serán atacadas con igual intensidad por los agentes denudativos, siendo entonces más erosionadas, quedando finalmente las rocas duras del bloque hundido en la posición superior del escarpe (C), que ya en estos momentos está invertido.

Los escarpes son típicos para el fallamiento normal de las rocas y en aquellos casos de fallas inversas de ángulos pronunciados, las cuales además son raras en la naturaleza debido a que las fallas inversas se desarrollan bajo condiciones compresivas intensas.

Otras morfologías típicas de regiones afectadas por fallamiento normal es la presencia de las fosas tectónicas o *gravens*, los pilares tectónicos o *horsts* y las estructuras escalonadas o en *echelon* las cuales se desarrollarán cuando existen fallas de rumbos paralelos y con direcciones de buzamiento convergentes en los dos primeros casos y totalmente paralelas en el último, como se muestra en la figura 16.



**Figura 16:** Formas del relieve desarrolladas en zonas de fallas normales.

**A:** fosa tectónica o *graven*, **B:** pilares tectónicos o *horst* y  
**C:** estructura escalonada o en *echelon*.

Referente al fallamiento inverso, la principal forma de reflejarse en el relieve es a través de la repetición de capas que al aflorar en la superficie provocan una sucesión de formas similares de muy difícil interpretación y que generalmente pueden confundirse como una zona de afloramiento continuo de la misma roca, aun cuando al igual que en el fallamiento normal puede aparecer el escalonamiento en caso de fallas paralelas entre si.

Las fallas de deslizamiento por el rumbo o *strik slip* van a provocar el desplazamiento lateral de las litologías cortadas por la estructura y por lo tanto, de las formas del relieve con ellas asociadas.

Antes de concluir el análisis de las fallas como elemento regulador y conformador del relieve, debe recordarse que tectónicamente ya está reconocido que en el proceso evolutivo de una región, una estructura puede cambiar el sentido de su desplazamiento, convirtiéndose en otro tipo de falla, por lo que pueden verse estilos geomorfológicos diferentes asociados a ellas.

Respecto a los otros procesos endógenos que ocurren en la corteza terrestre - magmatismo y metamorfismo – se debe partir en el análisis que exceptuando el vulcanismo, los otros sólo se ponen de manifiesto en la superficie cuando el corte erosivo de la región ha profundizado hasta alcanzar las rocas formadas a través de estos procesos, y por ende los rasgos estructurales que las

caracterizan, debido a que los mismos son típicos de zonas profundas y sólo llegan a la superficie en las regiones denominadas como “zócalos”. La profundización de la erosión sólo podrá ser justificada a través del levantamiento general de la región o de procesos tectónicos intensos que a partir de la deformación regional alteran el equilibrio entre los procesos endógenos y exógenos.

Las rocas magmáticas en general se van a manifestar en el relieve a través de las formas que tienen los cuerpos y su grado de denudación va a estar en dependencia de las propiedades químicas y mineralógicas. En el caso de pequeñas intrusiones, se manifestarán en el relieve a través de microformas dentro de la morfología regional, tal es el caso de diques, cuellos volcánicos, stocks u otros. Su carácter deprimido o levantado dependerá de la intensidad de la denudación, lo que a su vez estará en relación con su composición y de las condiciones climáticas de la región; y podrán identificarse en el relieve a través de los rasgos superficiales que desarrollen.

Cuando se trata de grandes cuerpos magmáticos como son los batolitos, lacolitos, lopolitos, etc. Pueden llegar a formar estructuras del relieve de carácter regional sobre las cuales se desarrollarán microformas locales en dependencia de las propias particularidades del macizo. En los bordes de estos cuerpos es típico el desarrollo de formas del relieve intermedias o diferenciadas con las desarrolladas sobre el propio cuerpo magmático y la de las rocas de caja, debido a la existencia de una zona de alteración en el contacto entre ambas, un ejemplo de esto lo constituyen las bandas esquistosas que bordean los grandes intrusivos.

Referente a los macizos metamórficos, se van a caracterizar morfológicamente por relieves positivos, generalmente abruptos, dado por la dureza típica de las rocas metamórficas, que en el caso de las rocas esquistosas presentará microformas orientadas en el sentido de dicha esquistocidad. Las áreas de pizarras por el contrario, presentarán relieves deprimidos donde las microformas regularmente orientadas dependerán de la yacencia de los planos de pizarrosidad.

Para concluir el análisis de los métodos geomorfológicos en su aplicación a las investigaciones geológicas se debe recordar que el objetivo fundamental del geólogo es la aplicación de dichos métodos para facilitar las investigaciones, haciéndolas más económicas. Es por eso que la tarea fundamental consiste en determinar las principales formas del relieve y con ellas poder concluir sobre las condiciones geológicas de su formación, en la que quedan implícitas las características estructurales de las rocas y la resistencia a los procesos denudativos en dependencia de su composición química y mineralógica.

Para el geólogo que se inicia en las investigaciones geomorfológicas debe quedar claro que la formación del relieve es el resultado de la interacción de los procesos morfogénicos sobre las rocas que se encuentran en la superficie a través del decursar del tiempo geológico, y que todos estos

elementos relacionados son cambiantes en el tiempo y en el espacio, por lo que se hace sumamente difícil la generalización de la información o las conclusiones prematuras como por ejemplo de que sobre iguales rocas se desarrollan formas iguales o similares del relieve. Para evitar estos errores es imprescindible el reconocimiento básico y aplicación de los principios geomorfológicos y el reconocimiento del carácter dialéctico de los procesos formadores del relieve.

El resultado final de las investigaciones geomorfológicas pueden expresarse a través de un mapa de relieve en el que se representen cada una de las formas del relieve desarrolladas en una región, o a través de un mapa geomorfológico en el que se señalarán las zonas geomorfológicas o de comportamiento similar del paisaje generalmente en dependencia de los procesos morfogenéticos condicionantes. En el manual “Tipos y simbología de los mapas geomorfológicos” se reconocen los diferentes mapas geomorfológicos existentes y la simbología utilizada en los mismos.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Augusto O. Deslizamientos. Aspectos Geológicos de Protección Ambiental. Vol.1, Oficina regional de ciencia y tecnología, UNESCO, 1995.
2. Cavallín A., Marchetti M. Geomorphology and environmental impact assessment: a practical approach. Quaderni di Geodinamica Alpina e Quaternaria, 1995.
3. Conde M. Estudio morfotectónico de la estructura Quesigua. Trabajo de diploma, Departamento de Geología, I.S.M.M., 1996.
4. Costa J. E. Developments and applications of Geomorphology. Springer-Verlag, 1984.
5. Díaz J.L. Movimientos tectónicos recientes de Cuba occidental. Nuevas investigaciones geodésicas y geomorfológicas. Ciencias de la Tierra y el Espacio, No.17, 1990.
6. Fleisher P.J. Maps in applied geomorphology. Developments and application of geomorphology, 1984.
7. García G., Muñoz N., Domínguez E., Rodríguez A. Métodos geólogo-geomorfológicos en la búsqueda y exploración de yacimientos de cortezas de intemperismo ferroniquelíferas en Cuba. Revista Minería y Geología, No.1, 1983.
8. González E., Cañete C., Carral R., Díaz J., Capote C., Rodríguez A. Análisis estructural del macizo Mayarí Baracoa. Serie Geológica No.4, 1986.
9. Instituto de Investigaciones Geológicas. Tipos y simbología de los mapas geomorfológicos. Ministerio de Minería y geología, 1978.
10. Instituto Tecnológico Geo Minero de España. Manual de ingeniería de taludes. 1987.

11. Jain V. E. Geotectónica General. Parte I. Editorial Mir, Moscú, 1980.
12. Kumpan A. S. Reglamento metodológico para levantamientos geológicos a escala 1: 50 000. Tomo I y II. VNESHORGIZDAT, Moscú, 1978.
13. Keller E.A. and Rockwell T.K. Tectonic geomorphology, quaternary chronology and paleoseismicity. Developments and applications of geomorphology, 1984.
14. Magaz A.R. Principales problemas actuales de la geomorfología de Cuba y su importancia en la economía nacional. Ciencia de la Tierra y el Espacio, No.15-16, 1989.
15. Nuñez Jiménez A. Cuevas y Carso. EMFAR, 1984.
16. Nuñez Jiménez A., Korin J., Finko V., Formell F. Notas preliminares acerca del carso en peridotitas, Sierra de Moa, Oriente, Cuba. Revista Geología No.1, 1967.
17. Oliva G. nuevo Atlas Nacional de Cuba. Instituto de Geografía, ACC, 1989.
18. Portela A. Relieve, Nuevo Atlas Nacional de Cuba. Instituto de Geografía, Academia de Ciencias de Cuba, 1989.
19. Pupo A., García M. Estudio de la falla Miraflores. Trabajo de diploma, Departamento de Geología, I.S.M.M., 1995.
20. Rodríguez A. Características geólogo-geomorfológicas del yacimiento Punta Gorda. Revista Minería y Geología, No.1, 1983.
21. Rodríguez A. Estilo tectónico y geodinámica de la región de Moa. Revista Minería y Geología, No.1, 1998.
22. Rodríguez A. Relieve y Neotectónica de la región de Moa. Revista Tecnológica, Serie Níquel, No.1, 1998.
23. Rodríguez A. Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación del riesgo geológico. Tesis doctoral. Departamento de Geología, ISMM, 1998.
24. Thornbury D.W. Principios de Geomorfología. Editorial Pueblo y Educación, 1983.
25. Vargas Cuervo G. Metodología para la cartografía de zonas de susceptibilidad a los deslizamientos a partir de sensores remotos y S.I.G. Boletín geológico, Ingeominas, Vol. 34, No.1, Colombia.