
LAS CONCAVIDADES DE PRIMER ORDEN: EXPRESIÓN DEL MECANISMO ACTIVO DE MODELADO EN EL ALTIPLANO DE SANTA ROSA DE OSOS

Luis Alberto Arias L
Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín
aarias@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 18 de Septiembre de 2006 / Aceptación: 15 de Junio de 2007 / Recibida versión final: 25 de Junio de 2007

RESUMEN

El principio axiomático de considerar al relieve de la superficie terrestre como un sistema dinámico complejo con la cualidad de dejar testimonios de sus comportamientos pasados plantea el reto de la reconstrucción histórica de la evolución geomorfológica en las diferentes regiones. Un aspecto fundamental de la complejidad de los sistemas geomórficos es la existencia de historias muy diversas en regiones diferentes.

En estudios previos se han delineado las directrices generales del proceso evolutivo del relieve en el altiplano de Santa Rosa de Osos y se han identificado y descrito las generaciones de relieve asociadas a cada fase (Arias et al, 2000, 2002, 2006).

Si el relieve de una región es en lo fundamental un producto histórico, es pertinente la pregunta acerca de los tipos de relieve que están siendo modelados actualmente. En otros términos más específicos: ¿Cuales son los mecanismos activos de modelado del relieve y las geoformas resultantes en el altiplano de Santa Rosa de Osos? Intentar responder satisfactoriamente este interrogante constituye el objetivo central del ensayo.

Las concavidades semicirculares encajadas en los flancos de las colinas del ASRO constituyen la generación de relieve en proceso activo de modelado en esta unidad de relieve mayor de la cordillera Central. Inicialmente se presenta una descripción de estas geoformas con base en las características morfométricas de sus elementos constitutivos (flancos, fondo plano y cierre terminal).

La configuración mórfica de las concavidades expresa un proceso de evolución convergente; su diversidad mórfica se interpreta como estados de desarrollo mórficos distintos.

La diversidad mórfica de las concavidades se despliega en las fases embrionarias y tempranas de su desarrollo expresando así una trayectoria de evolución divergente, mientras en las fases avanzadas se hace explícito un proceso de convergencia mórfica, acorde con una evolución convergente.

Las hipótesis cualitativas postuladas en este ensayo acerca del modelado de las concavidades de primer orden emplea parámetros morfométricos factibles de cuantificar (pendientes, longitud y perfil de los flancos; área, gradiente y forma de la línea perimetral de los fondos planos; grado de encajamiento del fondo plano). Las hipótesis cualitativas podrán someterse al análisis cuantitativo en el momento que los modelos digitales de elevación (MDE) disponibles tengan la resolución espacial adecuada.

El ensayo aborda igualmente la investigación del mecanismo de modelado. Este mecanismo opera como una sucesión de circuitos de retroalimentación positiva, inestables por su naturaleza, los cuales al "romperse" (cruzar su umbral de estabilidad) generan un conjunto de procesos y geoformas transitorias, tales como:

- La transformación de un flujo hídrico interno de carácter intergranular en un flujo concentrado.
- La transformación de una "erosión química" interna, eficiente para evacuar materiales iónicos, especialmente sílice, en una "erosión física" interna que evacua material particulado (arcillas, limos y arenas), en franjas alargadas del perfil de meteorización.
- Procesos de tubificación que generan túneles y chimeneas al interior de los perfiles de meteorización.
- Finalmente, el colapso de los sobretechos de estas geoformas internas, con lo cual, el proceso morfogenético pasa de una

fase subterránea a otra con expresión superficial.

Los procesos identificados en este estudio involucran la disolución iónica de arcillas caoliniticas presentes en perfiles de meteorización de la cuarzdiorita del batolito Antioqueño. Las tasas de los procesos de disolución de arcillas y de formación de túneles y chimeneas se desconocen; ahondar en estos tópicos es una necesidad apremiante por sus consecuencias negativas en los proyectos infraestructurales (presas hidráulicas, carreteras) y en las actividades agropecuarias.

PALABRAS CLAVES: Generación de Relieve, Concavidad de Primer Orden, Tubificación (Sifonamiento), Disolución de Arcilla, Superficie de Erosión, Sistemas Geomórficos, Evolución Divergente, Evolución Convergente.

ABSTRACT

To consider the relief of the terrestrial surface as a complex dynamic system with the quality of leaving testimonies of its last behaviors is the axiomatic principle that presents the challenge of historical reconstruction of landforms in different regions. A fundamental aspect of the complexity of geomorphic systems is the existence of diverse histories in different regions.

In previous studies they have been delineated the general guidelines of the evolutionary process of the relief in the uplifted erosion surface of Santa Rosa de Osos "altiplano"; the relief generations associated to each phase have been previously identified and described (Arias et al, 2000, 2002, 2006).

If the relief of a region is fundamentally a historical product, it has relevance the question about the relief types that are being actively modeled. In more specific terms, which the active mechanisms of modeling are? and which the resulting geomorphic structures in Santa Rosa de Osos highlands are? Trying to respond this query satisfactorily constitutes the central objective of this essay.

Semicircular fitted concavities in the flanks of the hills of the ASRO constitute the active relief generation. A description of morphometric characteristics of its constituent elements (flanks, plane bottom and terminal closing) is presented initially. The geomorphic configuration of these structures expresses a process of convergent evolution; the diversity of them is interpreted as different states of morphic development.

Geomorphic diversity operates in the embryonic and early phases of modeling of first order concavities and express a divergent evolution while in the advanced phases it becomes explicit a process of convergent evolution.

Postulated qualitative hypotheses about the modeling of first order concavities use quantifiable parameters (slopes, longitude and profile type of the flanks; area, gradient and its forms of perimeter line of the plane bottom; degree of fit of the plane bottom). The qualitative hypotheses could be undergone quantitative analysis in the moment that digital models of elevation (MDE) available have the appropriate spatial resolution.

The essay approaches the investigation of the mechanisms of modeling of these geomorphic structures. These mechanisms operate like a succession of positive feedback circuits, unstable for its nature, which when are broken (to cross its threshold of stability) generates a process group and transient landforms, such as:

- The transformation of an intergranular internal flow in a concentrated flow.
- The transformation of an efficient internal chemical erosion to evacuate ionic materials -especially silica - in internal physical erosion that evacuates particle material (clays, silts and sands).
- Piping process generates tunnels and chimneys into weathering profiles.
- Collapses of recovering materials of tunnels and chimneys generate a systematic cluster of hollows along axial concavities. As a consequence, morphogenetic processes shift from underground to superficial conditions.

Identified processes in this study involve dissolution of kaolinitic clays in weathering profiles derived from granitic rocks. The rates of kaolinitic dissolution and formation of tunnels and chimneys are ignored; however, to deepen in this topic is an urgent necessity for their negative consequences in the infrastructural projects (dams, highways) and agricultural activities.

KEY WORDS: Relief Generation, First Order Concavity, Piping, Clay Dissolution, Erosion Surface, Geomorphic Systems, Divergent Evolution, Convergent Evolution.

1. INTRODUCCIÓN

Considerar el relieve como un producto histórico lleva implícito un conjunto de ideas complementarias, como por ejemplo, la existencia de periodos de tiempo en los cuales se configuraron tipos de relieve diferentes. En esta perspectiva, el relieve se puede asociar con un palimpsesto, es decir, una superposición de estructuras mórficas de edad y génesis diferentes (Budel, 1982; Brunsten, 1990; Bremen, 1993).

En coherencia con lo anterior, es pertinente la pregunta acerca de las estructuras mórficas en proceso activo de formación. ¿Cuáles son las geoformas que están siendo construidas actualmente? Para abordar este interrogante conviene diferenciar entre la vigencia temporal de un mecanismo de modelado y la edad de las estructuras producidas.

El concepto de "relieve activo" postulado por Budel (1982) remite en primera instancia a definir los mecanismos de modelado vigentes en una región; ellos guardan ciertas relaciones de causalidad y de condicionamiento con el contexto geológico-climático actual y con las estructuras de relieve heredadas (Brunsten, 1990). Es frecuente que para las condiciones de un relieve localizado dentro de un corredor cordillerano como el de la cordillera Central en Antioquia, un condicionamiento importante lo impongan los eventos de levantamiento tectónico del Terciario-Cuaternario (Arias, 1995, 1996).

Identificar y definir el relieve activo en el altiplano de Santa Rosa de Osos (ASRO) implica delinear los mecanismos activos de modelado y las estructuras mórficas resultantes. Los primeros consisten en sistemas de procesos interrelacionados por circuitos de retroalimentación positiva y negativa que generan geoformas transitorias y geoformas persistentes.

La imagen de la dinámica y estructura del relieve desde la perspectiva sistémica es relativamente reciente en geomorfología, aunque siempre existe y existirán aquellas posiciones que establecen conexiones y relaciones entre los imaginarios heredados y los nuevos imaginarios para concluir que "no hay nada nuevo bajo el cielo" (Rosnay, 1979; Anhert, 1998). Por lo tanto, es pertinente iniciar con las ideas vigentes acerca de la dinámica del relieve.

Existe una tendencia dominante, a nivel de la comunidad científica nacional e internacional, a considerar como relieve activo las manifestaciones mórficas de procesos individuales; el inventario de cicatrices de deslizamientos activos y recientes, las manifestaciones mórficas de inestabilidad activa en las vertientes, las socavaciones de orillas de las corrientes, las acumulaciones temporales de sedimentos aluviales en tránsito, los desplazamientos de canales meándricos y otros más, se consideran como las expresiones mórficas de la dinámica actual del relieve. En este sentido, se tiende a asociar el concepto de relieve activo con las manifestaciones directas e inmediatas de procesos individuales, en aquellos ámbitos donde el dinamismo del relieve brinda evidencias claras a la observación directa y al registro en la escala de los días y años.

Sin embargo, la dinámica del relieve no se circunscribe a las escalas temporales de 10^{-3} - 10^2 años. Igualmente está presente en aquellos tipos de relieve y geoformas que requieren temporalidades del orden de 10^5 - 10^7 años para su desarrollo. Es necesario por lo tanto establecer una diferencia entre estructuras mórficas de formación rápida, a las cuales se les puede considerar como geoformas transitorias, cuyos periodos de vida son relativamente cortos, de aquellas estructuras mórficas más persistentes, cuya génesis involucra la acción colectiva y solidaria de un conjunto de procesos interrelacionados (Brunsten and Thornes, 1979).

Los mecanismos activos de modelado se despliegan en contextos espaciales muy variados; en un extremo dan identidad dinámica a las grandes zonas morfoclimático-tectónicas de la superficie terrestre y en el otro se configuran en el contexto de la espacialidad local (10^{-1} - 10^3 kms²), como ocurre con las concavidades de primer orden en el ASRO (Tricart, 1981; Tricart et Cailleaux, 1974).

Restringir la idea de formación activa de relieve a las manifestaciones mórficas en aquellos ámbitos donde se realiza un trabajo eficiente en el contexto de la temporalidad histórica humana es insuficiente. La dinámica del relieve en este

contexto temporal tiene gran importancia práctica y aplicada en la medida que interfiere, en la mayoría de los casos, con las dinámicas de intervención de las comunidades. Sin embargo, se trata de dinámicas y de estructuras que participan en el modelado de estructuras persistentes pero no se pueden confundir con estas últimas.

Los mecanismos de modelado activos y las estructuras mórficas resultantes son fenómenos vigentes actualmente, aunque su gestación e inicio se remonte a un pasado geológico; ambas temporalidades son diferentes, la vigencia de un mecanismo no necesariamente implica su gestación reciente (Budell, 1982).

La impronta del relieve activo en la superficie depende de la eficiencia del mecanismo de modelado y de la vigencia de dicho mecanismo; para el caso del ASRO ambas variables se combinan favorablemente para producir una población de geoformas numerosa y de distribución homogénea; en una zona de 54 kms² se identificaron 353 concavidades de primer orden, cuyos tamaños fluctúan entre 0.2-5.0 has y ocupan un 20% del área considerada (Arias et al, 2002). Estas estructuras más recientes marcan una identidad en el relieve del altiplano pero no borran las estructuras pertenecientes a las generaciones de relieve precedentes (Arias, 1996).

Un mecanismo de modelado se configura como una asociación solidaria entre un conjunto de procesos de naturaleza variada (hidrológicos, químicos, de producción de nuevos materiales secundarios, de transporte de ellos, etc.), los cuales producen geoformas específicas. Las geoformas producidas, presentan simultáneamente una estructura básica común y una gran diversidad; esta última se puede entender como estados diferentes de desarrollo mórfico. Por lo tanto en el estudio del relieve activo es necesario diferenciar:

- Geoformas transitorias.
- Estados de desarrollo mórfico del relieve activo.

Los productos transitorios del mecanismo de modelado corresponden a: cambios texturales en los perfiles de meteorización de la cuarzdiorita en respuesta a la disolución de arcillas caoliniticas, formación de túneles y chimeneas en estos materiales y estructuras de hundimiento en los fondos planos de las concavidades. Todas estas estructuras tienen expresión en el relieve, incluso son muy frecuentes, pero carecen de persistencia; todas ellas participan en el modelado de las concavidades de primer orden, no se las puede desligar de estas últimas pero son expresión del proceso, mas no de su resultado.

Las concavidades de primer orden son estructuras persistentes que participan efectivamente en la configuración mórfica del relieve total. Ellas presentan simultáneamente una configuración común y una gran diversidad, lo cual no es una contradicción de términos. Ambas características se complementan si se asumen como estados diferentes de desarrollo mórfico, lo cual no necesariamente "señala" una trayectoria única de desarrollo. Es factible suponer una o varias trayectorias de desarrollo mórfico para las concavidades de primer orden en el ASRO.

Las características comunes y los rasgos de diversidad brindan soporte para postular una trayectoria única o ramificada de producción activa del relieve en el altiplano.

La resolución espacial de las imágenes de radar y las escalas de los mapas topográficos disponibles en el momento no permiten abordar e intentar resolver estos interrogantes de manera cuantitativa pero es un problema vigente para desarrollos posteriores de estudios de geomorfometría.

Los mecanismos de modelado en una región dada se organizan en circuitos de retroalimentación positiva y negativa; los primeros son el motor de la producción de nuevas formas y los segundos garantizan la persistencia de las estructuras producidas. (Capra, 1998).

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las concavidades de primer orden son geoformas distintivas encajadas en los flancos de las colinas de un altiplano disectado; su aspecto general corresponde al de una superficie cóncava amplia donde se diferencian claramente varios

elementos mórficos (flancos, un fondo cóncavo o plano y un cierre terminal). Ver Fotos 1, 2 y 3. Como parte de ellas se incluyen además corredores cóncavos estrechos en los flancos convexos de las colinas con manifestaciones externas de desplomes de túneles y chimeneas. Ver Foto 4.



Foto 1. Concavidad de primer orden de tamaño pequeño. En ella se diferencian un flanco perimetral muy inclinado, un fondo plano semicircular y un cierre terminal.



Foto 2. Concavidad de primer orden de tamaño intermedio. A diferencia de la concavidad de la foto N° 6.1 no presenta cierre terminal.



Foto 3. Vista parcial de una concavidad de primer orden de tamaño mayor. Fondo plano de concavidad disectado por mecanismos de hundimiento y un cierre terminal pronunciado en su parte inferior.



Foto 4. Desarrollo de corredores cóncavos en flancos de colina. En el eje de estos corredores cóncavos se presentan fenómenos de erosión interna (túneles y chimeneas) y colapso del terreno. Ver punto negro en la parte superior de la concavidad en la parte central de la foto.

En las concavidades de mayor tamaño, el elemento mórfico dominante es el fondo plano con un perímetro con forma "de pera", muy amplio y semicircular en su parte superior ("aguas arriba") y con un estrechamiento pronunciado en su parte inferior ("aguas abajo").

La presencia de un conjunto numeroso de concavidades, conectadas en su funcionamiento hidrológico con los valles secundarios y principales es un rasgo característico en la dinámica del relieve del altiplano, no solo presente en el ASRO sino también en los otros altiplanos mas bajos.

La forma en planta de estas geoformas ("pera", "hongo", "anfiteatro") y el perfil convexo de sus flancos son los rasgos que inicialmente estimularon el interrogante acerca de su génesis, ya que ellos son difíciles de explicar con procesos de incisión fluvial remontante y ampliación lateral de las vertientes. La presencia sistemática de concavidades con un fondo plano de perímetro cerrado y circular, con un estrechamiento en su parte inferior y una ampliación máxima hacia "aguas arriba" es una configuración extraña a un mecanismo de modelado comandado por la dinámica fluvial.

En estas concavidades no existe ninguna manifestación activa significativa de dinámica fluvial, ya se trate de incisión-socavación, transporte activo de sedimentos detríticos o depositación fluvial. El fondo plano de la concavidad presenta condiciones hidromórficas asociadas con la surgencia de aguas subterráneas provenientes del cuerpo de la colina que la circunda. Por estas razones, se emplea el término "concavidades de primer orden" para su denominación, evitando el uso del término "valle de primer orden", el cual, contiene un significado genético muy específico. La naturaleza y características de los sedimentos recientes acumulados en los fondos planos confirman la ausencia de dinámica fluvial en ellas; los materiales más externos corresponden a acumulaciones de sedimentos orgánicos intercalados con capas de cenizas volcánicas en los cuales se desarrollan Histosoles y suelos con propiedades ándicas.

El desarrollo mórfico avanzado de las concavidades favorece la existencia de humedales muy estables con presencia permanente de un flujo laminar superficial y abundante.

El sistema de humedales del altiplano es bastante denso y de distribución homogénea; los humedales son sistemas abiertos formados por la confluencia de aguas subterráneas hacia el fondo plano de las concavidades, donde transcurren como un flujo laminar para transformarse en un flujo concentrado en la parte inferior de la concavidad y tributar a las corrientes de agua. La existencia de un humedal que precede a la formación de una corriente de primer orden puede constituir el factor más importante de regulación hídrica para las corrientes mayores en el ASRO, a pesar de un uso intensivo de los terrenos en actividades agropecuarias (Arias et al, 2002).

La importancia de los humedales como factor de regulación hídrica la reafirman su peso espacial y sus frecuencias; ellos representan el 18-20% del área de las cuencas dentro del altiplano; su distribución espacial es muy homogénea con una densidad del orden de 6-7 humedales/kms².

Desde el punto de vista del ordenamiento y manejo ambiental del territorio, estas concavidades configuran un sistema denso de humedales que almacena y regula la producción hídrica de las cuencas de los ríos Grande, Guadalupe San Andrés y Nechí, todos ellos utilizados intensamente para generación de energía y para abastecimiento de acueductos. El comportamiento hídrico de cada humedal consiste en captar la escorrentía y atraer el flujo hídrico interno de la colina para posteriormente entregarlo de manera regulada a la corriente concentrada que se inicia a la salida del cierre terminal de estas concavidades (Arias et al, 2002).

El manejo ambiental de la regulación hídrica de las cuencas mayores antes citadas supone una reevaluación del papel de los humedales, un aspecto al cual no se le ha dado la importancia que merece.

La población de concavidades de primer orden se encaja en los flancos de unas colinas, las cuales, son el resultado de la disección densa y de profundidad moderada de una superficie de erosión levantada. Los elementos mórficos de las colinas del altiplano representan adecuadamente las tres generaciones de modelado principal en el altiplano:

- Las cimas planas (rampas) corresponden a remanentes de un antiguo relieve ondulado.
- El sistema de colinas y valles representan la disección fluvial del relieve ondulado precedente, dando origen a flancos de colina donde predominan los segmentos convexos de vertiente.

- Las concavidades encajadas en los flancos de las colinas son la expresión del periodo de modelado efectivo más reciente en el altiplano. Ver Figura 1.

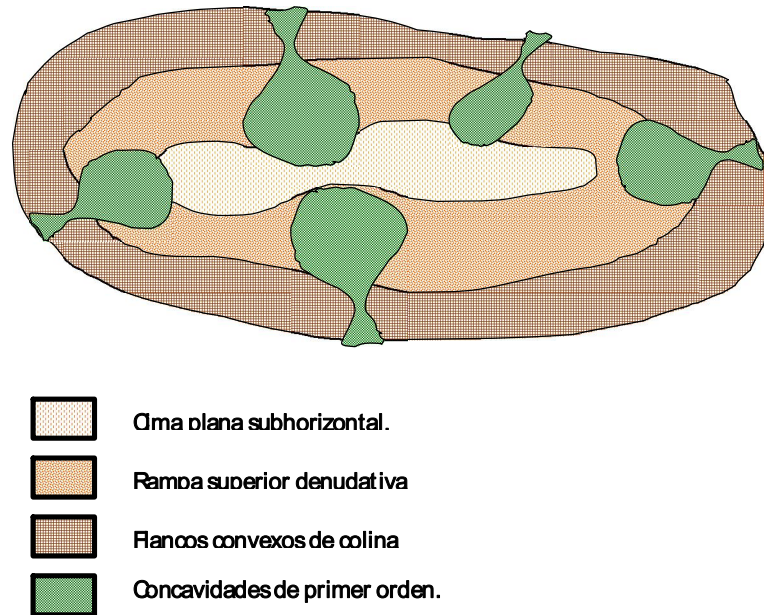


Figura 1. Elementos morfológicos mayores en las colinas del altiplano de Santa Rosa de Osos.

De este modo, la evolución morfológica del relieve altiplano, una unidad de relieve a la escala de 103 kms², queda registrada en las colinas, unidades de relieve en la escala de 10⁻¹-10⁻² kms². Otra manera de decir lo mismo: la historia del "todo" se expresa en la estructura morfológica de las "partes".

3. ESTRUCTURA MÓRFICA

Las concavidades de primer orden están constituidas por elementos morfológicos cuyos límites se expresan por quiebres abruptos de pendiente, tanto convexos como cóncavos. En ellas se pueden diferenciar los siguientes elementos morfológicos (Ver Figura N° 2):

- Rampa denudativa superior
- Flancos
- Fondo plano
- Cierre terminal.

La rampa denudativa superior es un elemento morfológico de las colinas en el cual se encajan las concavidades; en sentido estricto no es un elemento constitutivo de las concavidades pero sí un elemento de referencia fundamental para evaluar el mecanismo de desarrollo de ellas.

3.1. Rampa denudativa superior

Son superficies planas de inclinación muy suave (2°-5°) modeladas en un perfil de meteorización de cuarzodiorita muy evolucionado donde se presentan suelos residuales (IB) truncados; son el elemento morfológico de la parte superior de las colinas y corresponden a remanentes de un relieve ondulado precedente sometido a una disección fluvial densa de encajamiento moderado (30-70 metros). Ver Foto 5.

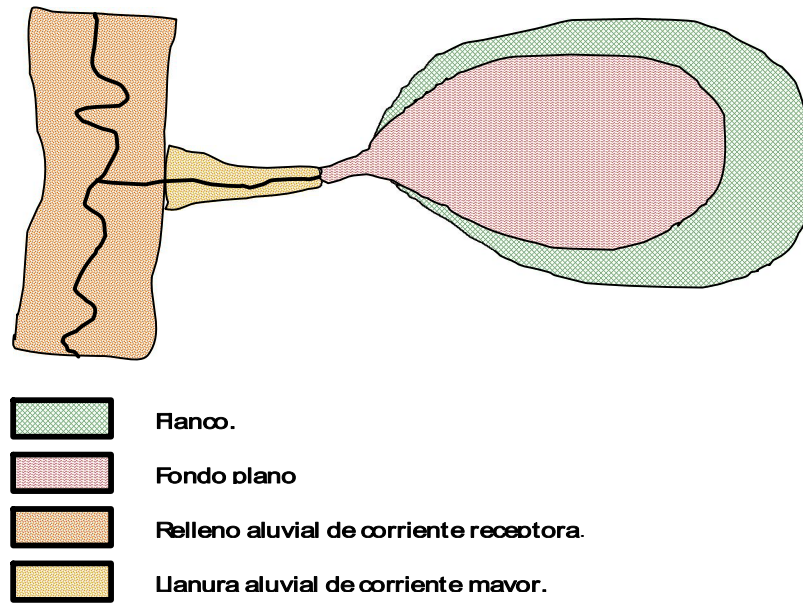


Figura 2. Elementos morfológicos de las concavidades de primer orden. Representación esquemática de una concavidad con forma de "pera".

Es la estructura morfológica precedente de referencia para el desarrollo de las concavidades. La destrucción de la rampa denudativa superior es simultáneamente la construcción de la concavidad de primer orden. La relación "destrucción-construcción" entre ambas geoformas se puede "monitorear" con base en la configuración y posición espacial de la línea limítrofe. La corona del flanco de las concavidades es una línea dinámica e histórica que expresa la evolución de dicha relación. La rampa denudativa superior circunda a la concavidad lateralmente y en su parte posterior.

3.2. Flancos

Corresponden al elemento morfológico de mayor inclinación (18° - 29°) de la concavidad. En ellos predominan los segmentos de vertiente convexos, los cuales pueden alcanzar pendientes de 31° - 35° en su parte inferior.

Los flancos de mayor inclinación se presentan en aquellas concavidades con un encajamiento significativo y el desarrollo de un fondo plano relativamente extenso y de gradiente muy suave.

Están modelados en perfiles de meteorización poco evolucionados, alcanzando a desarrollar suelos residuales IB (rojizos); sin embargo, en los sectores más inclinados se presentan saprolitos (IC). El rasgo característico de estos materiales es su textura franco arenosa y su alta porosidad.

Procesos de incisión fluvial remontante, resultado de hundimientos sucesivos alineados favorecen el desarrollo de franjas cóncavas estrechas que alcanzaron a llegar hasta la parte media del flanco. Una vez formados estos corredores, el perfil de meteorización allí presente alcanza a desarrollar suelos residuales IB (amarillos) de poco espesor (10-20 cms). Los corredores cóncavos encajados débilmente constituyen la fase embrionaria de desarrollo de concavidades de primer orden.

La posición espacial de las líneas de corona y base de flanco sintetiza el desarrollo y evolución morfológica de las concavidades. Ambas líneas avanzan diferencialmente desde la base de las colinas en dirección a sus cimas; la tasa diferencial de retroceso se expresa en la pendiente resultante de los flancos.

Ambas líneas son aproximadamente paralelas y en las concavidades con un desarrollo morfológico avanzado tienden a configurar una forma cuasi-circular, amplia en su parte superior y estrecha en su parte distal.

Aunque se puede diferenciar un flanco posterior y dos flancos laterales, no existe ruptura morfológica entre ellos; la primera percepción al observarlos es la de un elemento morfológico que evoluciona como un todo, en el sentido de la existencia de un mecanismo denudativo coordinado en todos los puntos.

En la corona del flanco posterior se desarrolla una zona transicional de reducción gradual de inclinación que conecta el segmento convexo de gran inclinación con la superficie planar de la rampa superior denudativa (4° - 6°). Esta zona transicional es modelada por erosión laminar; en otros casos se presenta un quiebre de pendiente convexo muy marcado.

En la parte inferior del flanco se desarrolla un quiebre de pendiente cóncavo pronunciado con el fondo plano denudativo perimetral. El quiebre de pendiente pronunciado entre dos elementos mórficos de naturaleza denudativa es el rasgo más sobresaliente del relieve de muchas concavidades; en otros casos la base del flanco se continúa con el fondo plano de acumulación, mientras la rampa denudativa se encuentra sepultada por materiales coluvio-aluviales.

3.3. El fondo plano

El fondo plano se presenta de dos maneras distintas. En la mayoría de ellas aparece un nivel único acompañado de una red ramificada de hundimientos que genera embrionariamente un nuevo nivel más bajo.

De corredores alargados y estrechos. En otros casos se presenta un sistema escalonado de niveles, muy común en las concavidades de mayor tamaño, sin ser un rasgo exclusivo de éstas. Ver Fotos 6 a 10.

El nivel principal de fondo plano corresponde a una superficie planar con una inclinación uniforme de 5° - 7° en los casos de mayor inclinación y de 3° - 4° en los de menor inclinación.

Varios de los fondos planos estudiados son de carácter denudativo en su parte superior y de acumulación en su parte media e inferior, sin ruptura de continuidad entre ellos.



Foto 5. Relación espacial entre rampas denudativas y concavidades de primer orden. El límite entre ambas geoformas corresponde a quiebres de pendiente convexos muy marcados. Tomada de Arias et al (2002).



Foto 6. Fondo plano escalonado por procesos de hundimiento remontantes. Aspecto de la concavidad, vista desde el sitio de cierre (estrechamiento) hacia aguas arriba. Desde el plano más lejano hacia el más cercano de la foto se identifican los siguientes elementos mórficos:

- Rampa denudativa superior (en perfil transversal), marcada por la línea de árboles
- Flanco posterior con segmentos de vertiente convexos y cóncavos.
- Fondo plano de la concavidad, el elemento dominante en la foto.
- Los subniveles del fondo plano (franjas bajo condición hidromórfica).



Foto 7. Hundimientos remontantes en fondo plano de concavidad. Fondo plano de acumulación afectado por procesos de hundimiento. El subnivel inferior presenta un ambiente hidromórfico permanente.



Foto 8. Geoformas transitorias locales producidas por hundimientos activos. Escarpe microescalonado que marca el frente de avance remontante del hundimiento. En planta, el escarpe corresponde a un arco de círculo de gran radio.



Foto 9. Concavidad con dos niveles de fondo plano. El nivel inferior se inscribe en un contexto hidromórfico activo; el nivel superior preserva testimonios de una condición hidromórfica reciente. Ambos niveles terminan abruptamente en un cierre terminal.



Foto 10. Sistema escalonado de fondos planos en una concavidad de gran tamaño.

El fondo plano principal de muchas concavidades presenta una disección en franjas alargadas y estrechas (5-10m) que avanzan remontantemente y bifurcándose, generando una estructura ramificada que genera embrionariamente un nuevo nivel localizado 1.0-3.0 metros por debajo. En este nivel se presenta un ambiente hidromórfico permanente alimentado por el afloramiento de aguas subterráneas y un comportamiento morfogenético de hundimientos muy activo. Ver fotos 6 a 10.

Según la naturaleza del material que modela el fondo plano se pueden diferenciar: un fondo plano de naturaleza denudativa, fondo plano de acumulación y fondo plano denudativo sepultado. Igualmente, en numerosas concavidades se identifica un sistema escalonado de fondos planos con la participación de los diferentes tipos.

Fondo plano denudativo

En varias concavidades se presenta una franja perimetral denudativa de inclinación suave (4°-5°) modelada en un suelo residual (IB) amarillo de cuarzodiorita recubierta por depósitos coluviales y de ceniza volcánica que alcanzan 0.5 a 0.8 m de espesor. Esta superficie se presenta bien definida en la parte perimetral superior y media del fondo plano y desaparece hacia la parte inferior donde se torna más estrecha la concavidad. Muchas concavidades carecen de esta superficie denudativa y en su lugar se presenta un fondo plano de acumulación único.

Fondo plano de acumulación

Corresponde a superficies planas con inclinación muy uniforme, de 4°-5°, modeladas por depositación de sedimentos aluviales.

Estos depósitos corresponden a secuencias relativamente espesas, del orden de 5-7 metros, constituidas por intercalaciones mal seleccionadas de arenas cuarzosas y arcillas. La distribución de tamaño de partículas en las capas arenosas determinan clases texturales predominantemente franco-arenosas y sus curvas granulométricas de frecuencia absoluta muestran un comportamiento unimodal con una moda dominante en el rango de arenas gruesas, las cuales representan entre 15% y 20% del total del material; en segundo orden de abundancia aparecen las arenas medias y las arenas muy gruesas. Desde el punto de vista mineralógico, el cuarzo y los seudomorfos de biotita (hidromicas) son las especies dominantes en estos materiales arenosos.

Los granos de cuarzo en las fracciones de arena y limo son angulares y para el caso de los seudomorfos de biotita es frecuente encontrar la agregación de numerosas láminas ("libritos"); estos datos brindan soporte sólido para afirmar que la mayor parte de la fracción arenosa de los depósitos proviene de la incisión de los flancos de la concavidad, única fuente posible de estos tamaños de minerales secundarios. La relación espacial entre morfología de perfiles de meteorización y elementos de relieve, establecida en estudios previos, permite afirmar que el afloramiento de suelos residuales (IB rojizos) y saprolitos (IC) con cantidades abundantes de seudomorfos de biotita en el tamaño de las arenas medias-gruesas-muy gruesas ocurre únicamente en los flancos de concavidades y flancos de colinas (Arias et al, 2002; Arias et al, 2000).

En varias concavidades de primer orden se presentan acumulaciones aluviales más antiguas cuyo espesor supera los 3-4 metros y desarrollan terraza planas inclinadas, localizadas por encima del fondo de acumulación reciente. La presencia de estos rellenos aluviales y el desarrollo de abanicos aluviales pequeños son los dos testimonios de la participación de la dinámica fluvial en el modelado de las concavidades.

El fondo plano de las concavidades, independientemente de la naturaleza de los materiales en que se encuentra modelado, presenta una dinámica activa y vigorosa de hundimientos remontantes que inducen la incisión de la superficie y la configuración de un nuevo subnivel, el rasgo mórfico más joven del altiplano. Ver fotos 6 a 8.

Sistema escalonado de fondos planos

En varias concavidades existe un sistema escalonado de 3-5 niveles de remanentes de fondos planos. Los remanentes más altos y por lo tanto más antiguos están modelados en alteritas de cuarzodiorita, presentan suelos residuales IB (amarillos) cuando están bien conservados o se encuentran modeladas en suelos residuales IB (rojizo) cuando su superficie ha sido modificada por procesos denudativos posteriores. En la mayoría de los casos, sobre el perfil de meteorización reposan depósitos peliculares de escorrentía de arenas cuarzosas recubiertas discontinuamente por cenizas volcánicas retrabajadas; el espesor de estos depósitos rara vez supera los 0.15 - 0.30 m.

Normalmente se encuentra uno (1) o dos (2) niveles de fondo plano y en aquellas concavidades de mayor tamaño se pueden identificar 4-5 niveles. En todas ellas, el nivel inferior corresponde a una superficie de acumulación con un relleno aluvial de 5-6 metros.

Fondo plano denudativo sepultado

Los estudios del subsuelo de los fondos planos de algunas concavidades indican que los rellenos aluviales reposan sobre superficies planares de inclinación uniforme (4° - 5°). Se trata de superficies denudativas que ocupan la parte central de la concavidad y continúan hasta el cierre terminal; esta superficie sepultada es modelada en saprolito (IC).

El número de perforaciones realizadas en estudios anteriores, aunque insuficiente para precisar la morfología de detalle de la superficie, permite inferir la presencia de una superficie planar de inclinación relativamente suave, muy uniforme, lo cual deja abierta la discusión en torno a la génesis de esta geoforma; puede corresponder a otro nivel de rampa denudativa inferior modelada por procesos de lavado laminar o corresponder a un modelado producido por incisión y ampliación fluvial (Arias et al, 2002).

Esta superficie fue sepultada por un relleno aluvial de 5-6 metros de espesor, cuyas características mineralógicas, texturales y de morfología de granos difiere de los sedimentos aluviales antiguos, localizados en las cimas planas y rampas superiores de las colinas. En todos los casos analizados se confirma la existencia de unos sedimentos mal seleccionados y de transporte mínimo; la presencia de minerales micáceos secundarios que conservan la estructura de agregado de láminas como indicador de un ambiente de energía muy bajo durante el transporte y otra característica a subrayar es la ausencia de gravas.

3.4. Cierre terminal

Las concavidades presentan un límite bien definido con los valles de las quebradas a los cuales tributan. Este límite corresponde a un cierre terminal, cuya estructura mórfica favorece la transformación del flujo laminar imperante en el fondo plano y lo convierte en un flujo concentrado en el corredor de cierre para transformarlo en una corriente de primer orden a su salida.

El cierre terminal marca el límite entre dos superficies planares de acumulación con características contrastantes:

- Una superficie semicircular amplía aguas arriba del cierre y una llanura aluvial alargada y estrecha aguas abajo.
- Un cambio abrupto de gradiente longitudinal, pasando de valores de 4° - 5° en la concavidad a valores de 2° - 3° en la llanura aluvial.

4. RELACIONES ENTRE ELEMENTOS MÓRFICOS

Los elementos mórficos descritos presentan relaciones entre sus atributos (pendiente, extensión, gradientes, forma del perímetro de los fondos planos).

Una primera relación directa se da entre la amplitud máxima del fondo plano y la inclinación de los flancos convexos. Mientras mayor es la amplitud del fondo plano en su parte superior ("aguas arriba"), más inclinado es el flanco posterior. Otra manera de expresarlo sería afirmando la relación directa entre área del fondo plano y pendiente general de los flancos; a mayor área, mayor pendiente.

Esta relación podría estar indicando un posible proceso de ampliación radial del fondo plano acompañado de un incremento en la inclinación de los flancos; esta relación se fundamentaría en un proceso de retroceso radial de la base de los flancos a una tasa mayor respecto al retroceso de la corona de ellos.

Una segunda relación de tipo inverso, en las concavidades con forma "de pera", se presenta entre "amplitud del fondo plano" y "grado de encajamiento". Las concavidades más amplias ocurren donde el grado de encajamiento es menor; en este sentido las concavidades de primer orden más amplias ocurren con más frecuencia en el bloque colinado "Llanos de Cuivá-El Chaquiro". Esta relación, sin embargo, está condicionada por la presencia de un terreno con relieve relativo

(?H) bajo, menor de 30-40 metros. El tipo de relación entre "amplitud" y "encajamiento" puede brindar elementos de reflexión importantes para comprender el proceso de desarrollo de estas geformas.

En los fondos planos de acumulación existe una relación directa entre sus gradientes longitudinales y los escalonamientos desarrollados por hundimientos activos. Los fondos planos más inclinados (5° - 6°) desarrollan con mayor facilidad uno o dos subniveles menores y el encajamiento de ellos en la parte inferior puede alcanzar un desnivel de 2-3 metros. Esta relación entre ambos atributos permite postular a nivel de hipótesis que los procesos de erosión interna en los rellenos se ven favorecidos por la gradiente hidráulica y por la concentración del flujo interno a lo largo de corredores específicos.

En los fondos planos existe una relación inversa entre su gradiente longitudinal y su extensión. Los fondos planos más extensos presentan menor gradiente y viceversa. Mas aún, los fondos planos con mayor gradiente tienden a desarrollar una estructura escalonada de superficies, quedando la zona hidromórfica reducida únicamente al nivel más bajo. En esta situación se encuentran concavidades pequeñas que presentan dos (2) niveles de fondo plano con desniveles de 2-4 metros; en estos casos la condición hidromórfica activa queda restringida al nivel inferior, aunque en el nivel superior persiste el registro (suelos orgánicos y rasgos redoximórficos) de una condición hidromórfica reciente (Arias et al, 2002).

Las observaciones de campo permiten postular la existencia de relaciones directas e inversas entre parámetros de forma de los diferentes elementos de las concavidades. Las relaciones identificadas son:

- Amplitud máxima del fondo plano vs. Inclinación de los flancos.
- Amplitud del fondo plano vs. Grado de encajamiento.
- Gradiente longitudinal del fondo plano vs. Desarrollo de estructura escalonada.
- Gradiente longitudinal y extensión de los fondos planos.

Estas relaciones podrían evaluarse estadísticamente; sin embargo, la ausencia de mapas topográficos con planimetría y altimetría pertinente impide llevarlo a cabo. El avance de la investigación geomorfométrica se encuentra supeditada a la disponibilidad de nuevos documentos con resolución espacial más detallada; los documentos disponibles se restringen a modelos digitales de elevación con una resolución espacial de 92 metros el píxel, los cuales no brindan la resolución espacial necesaria para confirmar o rechazar las relaciones postuladas.

5. MATERIALES

Los materiales presentes en las concavidades son de varios tipos:

- Perfiles de meteorización de cuarzodiorita.
- Rellenos aluviales.
- Cenizas volcánicas.
- Depósitos coluviales y de esorrentía.
- Sedimentos orgánicos.

5.1. Perfiles de meteorización

Las concavidades están modeladas en suelos residuales IB o en saprolitos IC, excepto el fondo plano de acumulación.

Los segmentos convexos de los flancos están modelados en saprolitos (IC) y en suelos residuales IB de color rojizo; ambos horizontes poseen texturas franco-arenosas con una porosidad y permeabilidad alta. Sobre ellos se desarrollan Entisoles e Inceptisoles, los tipos de suelos con menor desarrollo pedogénico.

En los segmentos cóncavos, la concentración y permanencia de aguas internas hacia la base del flanco, favorece el desarrollo de un horizonte de suelo residual IB amarillo franco arcilloso que llega a alcanzar 40 cms de espesor y que

pasa a un suelo residual IB rojizo franco arenoso. Este cambio de color y textural parece asociarse con una mayor permanencia de la humedad en estos sectores.

En distancias muy cortas, del orden de 5-10 metros, se configuran contrastes morfológicos y texturales en los perfiles de alteración, condicionados por las trayectorias del flujo hídrico interno.

En el fondo plano sepultado, el registro de las perforaciones indica sistemáticamente la presencia de saprolitos IC, con la litoestructura granular del material parental bien conservada; en algunas perforaciones, el saprolito perforado es bastante micáceo (seudomorfos de biotita), mientras en otras es rico en granos de cuarzo; las plagioclasas están caolinizadas y los motes de caolín son de color claro, es decir, no se encuentran manchados con óxidos de hierro. Estos materiales presentan una textura franco arenosa (media a gruesa).

5.2. Rellenos aluviales

Corresponde a una sucesión de capas arenosas y arcillosas mal seleccionadas que alcanzan espesores máximos de 6-7 metros. La fracción arenosa de las diferentes capas corresponde a granos de cuarzo, y a láminas micáceas, seudomorfos de biotita.

Los granos de cuarzo presentan tamaños desde "arena gruesa" hasta "arena muy fina" y "limo"; son angulares, con un brillo vítreo muy marcado y presencia muy marcada de microfisuras, todos ellos, rasgos heredados del mineral.

Las láminas micáceas presentan colores verde grasoso, bronceados y grises claros; sus tamaños van desde "arena muy gruesa" hasta "arena fina". Las láminas de mayor tamaño se encuentran en "libritos" mientras las más finas ocurren como láminas "individuales". Un rasgo especial de las láminas micáceas es presentar "perforaciones", es decir, orificios cilíndricos de sección circular perfecta que cruzan completamente a las láminas, cuyo origen no es muy claro al momento.

La presencia de gravas (> 2m.m.) es muy ocasional y cuando se las encuentra corresponden a gravas de cuarzo o a fragmentos irregulares de arenas cuarzosas cementadas y endurecidas con óxidos de Fe. En ningún caso se presentan gravas líticas de cuarzodiorita. Las pocas gravas detectadas en las perforaciones se encuentran redondeadas y no superan los 2-3 cms de diámetro y provienen de depósitos aluviales antiguos presentes en las cimas planas de las colinas.

Dentro de cada capa la selección granulométrica es muy pobre, de tal manera que los materiales totalmente arcillosos o las arenas con tamaño de grano muy uniforme están ausentes.

Hacia la parte media e inferior de los rellenos hay abundantes óxidos de Fe de color pardo y pardo oscuro que recubren los granos y se distribuyen en bandas, pero no producen cementación fuerte de los sedimentos.

5.3. Sedimentos orgánicos

La parte más externa de los materiales acumulados en el fondo plano corresponde a sedimentos orgánicos intercalados con capas de cenizas volcánicas de caída directa y capas retrabajadas por escorrentía. Estos materiales alcanzan un espesor de 1.0-1.5 metros.

Se presenta así, en la parte superior de la acumulación, un cambio drástico en el régimen de depositación, acorde con la ausencia de comportamiento fluvial activo en el fondo plano de las concavidades.

6. LOS SUELOS

Las concavidades presentan una gran diversidad de tipos de suelos en una extensión muy restringida. Ver Fotos 11 y 12.

En los flancos convexos se desarrollan Inceptisoles a partir del horizonte IB rojizo del perfil de meteorización de la cuarzodiorita. En la parte inferior de los flancos cóncavos y en el fondo plano denudativo perimetral se desarrollan Ultisoles con horizonte argílico y en algunos casos horizonte kándico.

Los Andisoles están presentes en aquellos sectores del fondo plano donde se acumulan espesores significativos de cenizas volcánicas; en las otras partes se desarrollan Inceptisoles sobre depósitos coluvio-aluviales.

La presencia de Histosoles se restringe a los subniveles de escalonamiento de fondo plano, donde predominan condiciones hidromórficas permanentes. La acumulación de materia orgánica (*Sphagnun sp*) permite el desarrollo de Saprist.



Foto 11. Perfil del suelo en el fondo plano de concavidad. Depósitos coluvio-aluviales con paleosuelos (A1) enterrados. Tomada de Arias et al, 2002.



Foto 12. Secuencia de capas de cenizas volcánicas de caída directa y depósitos orgánicos en el fondo plano hidromórfico de una concavidad de primer orden. Tomada de Arias et al, 2002.

7. COMPORTAMIENTO MORFOGENÉTICO

El término "comportamiento morfogénico" hace referencia a la dinámica actual del relieve en una espacialidad dada, ya sea una región extensa o un contexto local; este comportamiento constituye una cualidad emergente de la organización dinámica del sistema-relieve.

El comportamiento del relieve es la resultante de las interrelaciones entre numerosos procesos de naturaleza y características diferentes, interrelaciones que varían de una geoforma a otra e incluso entre elementos diferentes de una misma geoforma. No se trata de enumerar un agregado de procesos básicos para proceder luego a describir aisladamente el accionar de cada uno de ellos e inferir sus efectos modeladores.

Definir el comportamiento morfogenético implica identificar las interrelaciones entre diversos procesos que operan desde las divisorias de aguas hasta los lechos fluviales, los cuales se manifiestan superficial y subsuperficialmente. En el caso de una región permanentemente húmeda como el altiplano de Santa Rosa de Osos, los diferentes patrones de organización dinámica guardan una relación estrecha con las trayectorias espaciales del flujo hídrico.

7.1. El mecanismo de modelado

7.1.1. Fase de desarrollo interno

Desde el punto de vista hidrológico, el pie de vertiente de los flancos de las colinas es una franja estratégica: hacia ésta converge el flujo interno de aguas subterráneas, generando un corredor continuo o discontinuo de surgencia de manantiales. En estos sitios se presenta un flujo permanente de agua que se incrementa o disminuye en consonancia con el régimen de lluvias. La carga iónica de estas aguas es un indicador de la naturaleza de los procesos químicos activos de alteración en los perfiles de meteorización.

En los sitios de manantiales ("nacimientos de agua") se presenta un proceso de precipitación de óxidos de Fe que forma un gel abundante el cual, recubre la vegetación herbácea; la precipitación-acumulación de geles de óxido de Fe alcanza su máxima expresión hacia el final del "periodo de verano" que va de mediados de diciembre hasta finales de marzo.

La presencia persistente de sílice disuelta (SiO_2) en concentraciones de 1-5 ppm en las aguas freáticas es un testimonio de procesos de disolución de arcillas 1:1 (caolinitas); este proceso va acompañado de una acumulación de geles de aluminio y de gibsita en los perfiles de meteorización.

A la escala del perfil de meteorización, sus morfologías, granulometrías, porosidad, permeabilidad y mineralogías, permiten identificar dos mecanismos y dos trayectorias diferentes de alteración.

- Una trayectoria de alteración no-plasmogénica. Los minerales primarios se disuelven, especialmente las plagioclasas y ferromagnesianos produciendo un material residual rico en cuarzo y óxidos de Fe, con una porosidad y permeabilidad muy alta.
- Una trayectoria de alteración plasmogénica. Inicialmente se producen minerales arcillosos secundarios a partir de minerales primarios, ya sea por transformación o neoformación. Los materiales resultantes son de carácter arcillo-limoso y arcillo-arenoso. En algunos casos posteriormente a ello se genera la fase no-plasmogénica. Pedro (1984) citado en Thomas (1994).

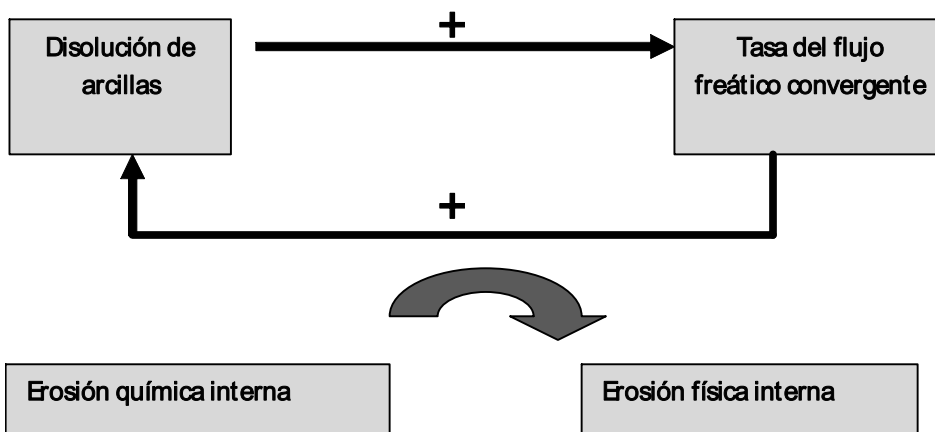
La configuración de una u otra trayectoria dentro del perfil de meteorización parece ser función de la tasa del flujo hídrico interno y de su persistencia temporal. La circulación hídrica interna, abundante y persistente, favorece la alteración no-plasmogénica.

Los productos de ambas trayectorias de alteración se distribuyen de un modo bastante irregular en el cuerpo de las colinas; mas aún, ambos tipos de materiales puede estar presentes en distancias muy cortas (10-20 metros).

Las trayectorias convergentes del flujo freático hacia la base de las vertientes generan contrastes en la eficiencia de los procesos de disolución, los cuales se pueden considerar como un mecanismo de "erosión química interna". De este modo, se configura un primer circuito de retroalimentación positiva entre "Disolución de arcillas" y "Flujo freático convergente".

La representación del fenómeno se puede explicar así: La disolución de arcillas en el perfil de meteorización induce cambios texturales, de porosidad y de permeabilidad en los materiales; estos efectos iniciales se convierten a su vez en causa estimuladora de la convergencia del flujo hídrico interno.

De este modo se configura un mecanismo de causalidad circular cuyos resultados "finales" son: el desarrollo de perfiles de alteración de textura arenosa con una porosidad-permeabilidad muy alta y un flujo freático interno condicionado en su trayectoria hacia los corredores donde se localizan estos materiales. Este circuito de retroalimentación positiva, por su propia naturaleza, es inestable y se rompe posteriormente. En otros términos, se alcanza un umbral cuyo cruce conlleva a una reorganización dinámica del sistema de alteración. Para el caso de las colinas del ASRO el cruce del umbral se expresa en la transformación de un mecanismo de "erosión química interna" en otro de "erosión física interna".



Umbral N°1:

En el nuevo contexto, el flujo hídrico interno pierde su carácter de flujo intergranular y se convierte en un flujo concentrado interno; este tránsito se consigue una vez se alcanzan ciertos valores de porosidad-permeabilidad de los materiales. A partir de este umbral, se presenta un proceso de erosión física interna o tubificación que genera túneles y chimeneas dentro de los perfiles de meteorización. Las manifestaciones de erosión interna (túneles y chimeneas) las identifican los pobladores de la región con el nombre de "troneras" y al proceso que las genera como "entroneramiento"; se presentan preferencialmente en los corredores cóncavos estrechos de los flancos de colina que presentan una gradiente longitudinal mayor. Ver Fotos 13 a 16.



Foto 13. Organización sistemática de chimeneas a lo largo de un corredor cóncavo en el flanco de una concavidad de primer orden.



Foto 14. Colapso de chimeneas a lo largo de un corredor cóncavo en los flancos de las concavidades de primer orden.



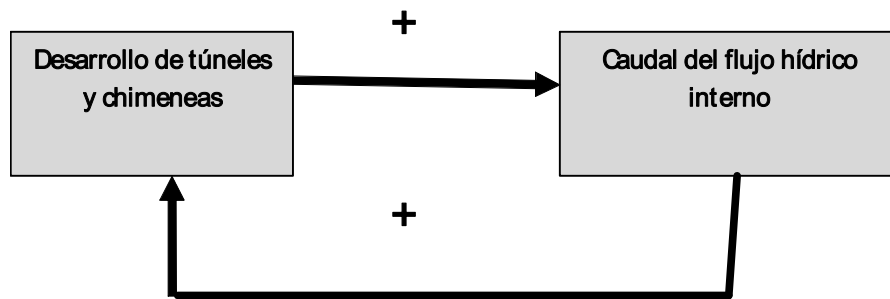
Foto 15. Sobretecho colapsado de chimeneas modeladas en materiales del perfil de meteorización de la cuarzodiorita del Batolito Antioqueño. Las fotos 18 a 19 son tomadas en el mismo sector.



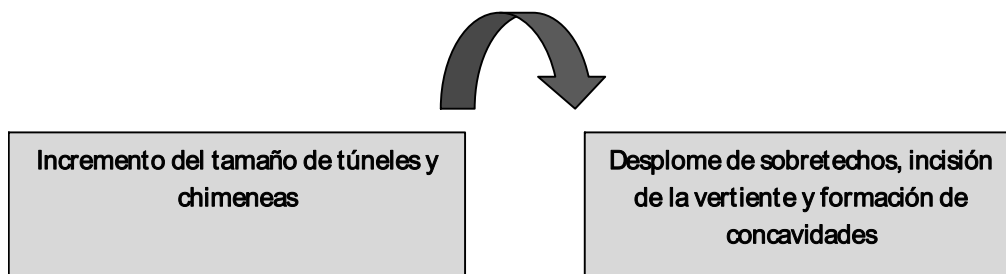
Foto 16. Desplome del sobretecho de una chimenea en el eje de una concavidad.

Algunos autores (Anhert, 1998), explican el origen de la erosión interna como un proceso condicionado por contrastes pronunciados de permeabilidad hidráulica en los materiales del subsuelo, permitiendo la concentración del flujo en el límite entre una zona superior permeable y una zona inferior poco permeable. Para el autor mencionado, el contraste de permeabilidad es una condición heredada y necesaria al proceso de tubificación; en el caso estudiado, los contrastes marcados de porosidad-permeabilidad son rasgos adquiridos durante el proceso de meteorización. (Phillips, 2001).

La fase de erosión física interna se organiza dinámicamente por medio de un nuevo circuito de retroalimentación positiva:



Umbral N° 2:



A través de este mecanismo, la formación inicial de túneles pequeños favorece la concentración del flujo hídrico interno lo cual, a su vez, cataliza el desarrollo de ellos. A medida que los túneles incrementan de tamaño se generan desplomes continuados del sobretecho dando origen a chimeneas. Ver Fotos 14 a 18.

Como en el caso anterior, este mecanismo es inestable y termina rompiéndose, tanto en su sentido literal como figurado. Cuando se alcanza un umbral de tamaño para los túneles y chimeneas, se generan desplomes y hundimientos con expresión en superficie.

El umbral N° 2 marca el cambio de efectos mórficos subsuperficiales (internos) al desarrollo de geoformas transitorias superficiales.

A partir de este estado, los mecanismos de modelado internos y externos se refuerzan mutuamente. El flujo laminar superficial y el flujo interno tienden a reforzar el mecanismo de incisión de las vertientes convexas generando corredores cóncavos, los cuales actúan como un atractor eficiente de las aguas superficiales e internas.

El mecanismo de modelado hasta aquí descrito requiere de varias precisiones. En primer lugar, los circuitos de retroalimentación positiva y los umbrales identificados se "reiteran" continuamente en sentido lateral y en sentido remontante, incrementando la amplitud y longitud de los corredores cóncavos en los flancos de las colinas. La descripción lineal del mecanismo de modelado no implica por lo tanto una dinámica natural lineal.

En segundo lugar es necesario establecer una diferencia entre geoformas transitorias y geoformas persistentes; como ejemplos del primer grupo se tienen: los hundimientos, los desplomes de sobretechos, los túneles, las chimeneas y la formación de puentes naturales pequeños en saprolitos. Las geoformas persistentes están asociadas con el desarrollo de corredores cóncavos en los flancos de las colinas, las concavidades de fondo plano y la presencia de colinas aisladas en estos fondos. Ver Fotos 17 a 20.



Foto 17. Sección circular de un túnel localizado en el eje de un corredor cóncavo estrecho, a 1.5 m de profundidad.



Foto 18. Distribución espacial de hundimientos de sobretechos de túneles y chimeneas en las vertientes. La vegetación arbustiva se ubica en los sitios de desplome del terreno.



Foto 19. Formación de puentes naturales pequeños a lo largo de corredores cóncavos estrechos.



Foto 20. Colina aislada en el borde de un fondo plano de concavidad.

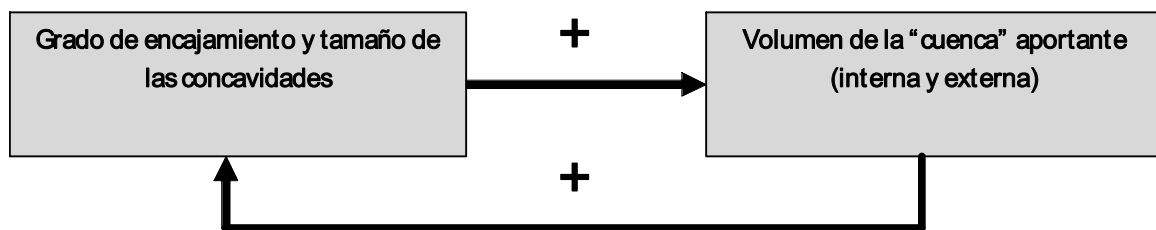
7.1.2. Fase de desarrollo externo

Las manifestaciones en superficie del mecanismo de modelado actúan como "atractores" del flujo hídrico superficial e interno, compitiendo en eficiencia con la red de valles principales y secundarios. Las concavidades se convierten en "estaciones de transferencia" entre las aguas que fluyen en superficie y al interior de las colinas y el flujo concentrado de las corrientes de agua.

Las concavidades presentan una gran diversidad de formas y tamaños, igualmente es diversa su ubicación espacial en los flancos de las colinas. Formas, tamaños y posición espacial pueden considerarse, a nivel de hipótesis, como estados mórficos diferentes de su desarrollo y evolución.

El grado de encajamiento y el tamaño condicionan la eficiencia para atraer el flujo hídrico de las colinas; las concavidades mas grandes y encajadas definen una "cuenca interna" de mayor volumen mientras las concavidades con encajamiento mínimo y de menor tamaño definen unas zonas de influencia superficial e interna de volumen modesto.

Durante la fase de desarrollo externo del mecanismo de modelado activo se configuran nuevos circuitos de retroalimentación positiva. Esta interrelación entre atributos de forma configura en los flancos de las colinas una situación de "competencia" entre las concavidades por la atracción del flujo hídrico superficial e interno; el "éxito" de unas concavidades para continuar rápidamente hacia fases avanzadas de desarrollo mórfico se consigue al "costo" de la disminución del ritmo e incluso la parálisis en las concavidades adyacentes.



Este circuito de retroalimentación positiva, a diferencia de los anteriores, involucra un cruce de umbral impuesto desde "afuera" por los niveles-base locales de las corrientes a las cuales transfieren las aguas. Ello implica una persistencia temporal duradera del circuito, lo cual constituye el soporte de la amplia diversidad de estados mórficos que presentan las concavidades. En estas circunstancias, las diferentes formas alargadas representan los estados mórficos tempranos e intermedios y las formas con tendencia circular las fases de desarrollo avanzado.

La tipología de las concavidades, con base en la forma en planta, constituye una propuesta esquemática de estados de desarrollo mórfico (ver numeral 8).

Existe una relación de las variables "grado de encajamiento", "tamaño" y "forma" de las concavidades con el valor de "relieve relativo" de las zonas donde se encuentran. En el sector del bloque colinado "Llanos de Cuivá-Chaquiro", donde el relieve relativo es del orden de 20-30 metros, el encajamiento es modesto y la ampliación lateral y radial es significativa; en otros sectores del altiplano con relieve relativo del orden de 70-150 metros las relaciones son más complejas. Existe una especie de valor umbral para el encajamiento, a partir del cual la ampliación radial de las concavidades se torna en la dinámica dominante.

7.2. Autocatálisis y autorregulación.

El desarrollo de geoformas superficiales involucra una dinámica de autoreforzamiento. El proceso de encajamiento y ampliación favorece el desarrollo de una condición hidromórfica en el fondo de ellas; en las concavidades alargadas de gradiente fuerte (8° - 13°) se configura un ambiente hidromórfico abierto-estacional, con presencia episódica de una lamina superficial de agua. En los estados mórficos avanzados, cuando se configura un fondo plano de gradiente suave (3° - 5°) se gesta un ambiente hidromórfico abierto con una lamina de agua superficial permanente.

Los caudales del flujo laminar superficial en las concavidades constituye un testimonio de la "eficiencia competitiva" por el flujo hídrico interno de las colinas.

Los procesos activos en la zona hidromórfica dependen del estado de desarrollo mórfico de las concavidades:

- En las concavidades alargadas de gradiente fuerte son comunes los túneles y chimeneas modelados en perfil de meteorización. Ver Fotos 13 a 16.
- En las concavidades circulares de gradiente suave se observa un patrón radial de hundimientos con centro en la franja más húmeda. Ver Fotos 6 a 8.

La configuración de uno u otro comportamiento parece estar condicionada por la cantidad y frecuencia del flujo hídrico y por la gradiente hidráulica.

El comportamiento hidrológico y el desarrollo mórfico de las concavidades están estrechamente relacionados. Las concavidades con menor desarrollo ejercen un papel modesto de atractor hídrico y de transferencia debido a sus gradientes, al carácter franco-arenoso de los materiales y al volumen modesto de ellos; en las concavidades con mayor desarrollo el papel de atractor se torna mas eficiente y se añaden nuevas funciones: el volumen de materiales arcillosos y arenosos y de sedimentos orgánicos y las gradientes suaves favorecen una función de almacenamiento temporal y regulación. La configuración de un sistema hidromórfico con una lámina de agua superficial y permanente, de flujo lento, parece ser la condición necesaria y suficiente para estimular el desarrollo radial del fondo plano de las concavidades.

Se pueden postular a nivel de hipótesis varias relaciones entre parámetros de forma, de materiales y procesos:

- Las gradientes fuertes de los corredores cóncavos estrechos favorecen un flujo hídrico interno rápido y el desarrollo de procesos de tubificación.
- En las concavidades de forma circular, la menor gradiente y el volumen y naturaleza de los materiales almacenados incrementan la retención hídrica y favorece una "erosión química interna" cuyo resultado es la configuración de

procesos de hundimiento muy activos con un patrón espacial radial.

La regulación hídrica que ejercen las concavidades mas desarrolladas es una cualidad emergente relacionada con la configuración de atributos de forma (gradiente, tamaño), de materiales (características granulométricas y mineralógicas de los sedimentos acumulados, presencia-ausencia de materiales orgánicos y volumen de depósitos almacenados) y procesos.

Estos parámetros pueden retomarse como referentes para establecer una clasificación de las concavidades de primer orden con base en su capacidad de regulación hídrica.

7.4. Patrón hidrológico y morfogénesis

En el relieve colinado del ASRO se pueden establecer relaciones entre los patrones espaciales del comportamiento hidrológico y del comportamiento morfogenético.

En las cimas planas y rampas superiores, la desintegración química de arcillas (caolinitas) en las partes externas del perfil de meteorización, genera un proceso de enriquecimiento residual de arenas cuarzosas; este proceso produce la transformación de un horizonte de suelo residual (IB) amarillo franco arcilloso o arcilloso en un horizonte (IB) franco arenoso o incluso arenoso franco. Desde el punto de vista pedogénico, se produce la transformación de Oxisoles en Ultisoles kándicos. Estos cambios en el comportamiento de la meteorización y la pedogénesis, sin embargo, no inducen cambios mórficos importantes en las rampas. Ver Fotos 21 y 22.

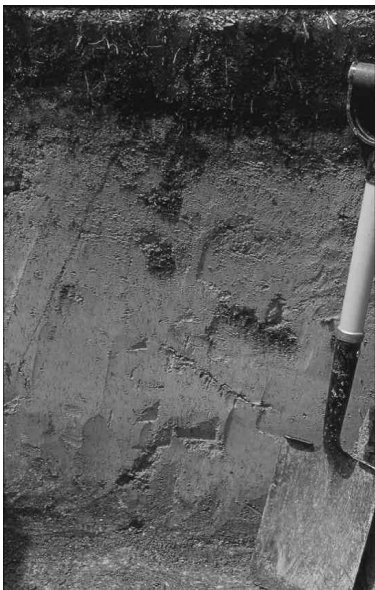


Foto 21. Ultisol kándico. Suelo característico de las rampas denudativas superiores de las colinas. Suelo desarrollado a partir del horizonte IB amarillo (10YR6/8) del perfil de meteorización; el contraste entre un horizonte superior arenoso y otro inferior más arcilloso, es un atributo adquirido, el cual constituye el horizonte Kándico. En la parte inferior un suelo residual (IB) rojizo del perfil de meteorización. En la parte superior del horizonte amarillo arenoso se desarrolla un horizonte plácico; el horizonte más externo (A1) se desarrolla en una capa de ceniza volcánica



Foto 22. Andisol y oxisol. En el perfil:

- Ceniza volcánica en la cual se desarrolla un horizonte pedogénico A1
- Suelo residual (IB) amarillo del perfil de meteorización donde se desarrolla un ultisol argílico.
- Suelo residual (IB) rojizo del perfil de meteorización, sin desarrollo pedogénico

Hacia la base de los flancos, donde confluyen y afloran las aguas subterráneas, los procesos y resultados son diferentes:

- La desintegración de las arcillas (caolinitas) parece ser más pronunciada, manifiesto en una textura arenosa fina y una porosidad excesivamente alta de los perfiles de meteorización, no producida por actividad biológica.
- La manifestación de procesos de erosión interna muy eficientes, tanto en perfiles de meteorización y depósitos derivados de ellos que no presentan contrastes texturales importantes. Estos fenómenos se manifiestan como túneles y chimeneas, visibles cuando sus techos colapsan. Estas manifestaciones de erosión interna se presentan en aquellas estructuras mórficas que favorecen la concentración de flujos superficiales e internos.

Ambas situaciones, generan cambios en la morfología de los perfiles de meteorización y nuevas geoformas. La combinación de una erosión química y física interna y el colapso de los sobretechos induce procesos de incisión de los flancos y el desarrollo de concavidades en ellos; este comportamiento morfogenético es el mecanismo embrionario modelador de las concavidades de primer orden.

De este modo, los patrones espaciales del comportamiento morfogenético activo están condicionados por las trayectorias del flujo hídrico interno; el dinamismo más pronunciado de este comportamiento ocurre en aquellos sectores donde afloran en superficie las aguas freáticas.

El modelado activo de relieve en el ASRO se centra en las concavidades de primer orden, especialmente en los fondos planos hidromórficos; la expresión más notoria es el hundimiento. En estas geoformas existe una correspondencia directa entre los patrones de distribución espacial de los hundimientos, las zonas hidromórficas y los ejes de flujo preferencial de las aguas.

Los patrones de distribución espacial podrían albergar la clave del mecanismo causal (sistema de procesos) que induce los hundimientos del terreno; "hundimiento", "condición hidromórfica" y "concentración superficial de flujo" se organizan en un mecanismo de retroalimentación positiva cuya expresión mórfica más evidente es el modelado de una estructura escalonada y encajada de niveles dentro del fondo plano de las concavidades. Ver Fotos 6 a 8.

Si los factores favorables a los hundimientos no guardan relación con contrastes texturales de los materiales, se puede postular, a nivel de hipótesis, un mecanismo de tipo químico y bioquímico de destrucción de arcillas en un ambiente hidromórfico con presencia abundante de materia orgánica (humus), el cual actúa en la zona más externa (1 - 2 m) de los depósitos. Se trataría de un mecanismo de erosión química interna que se auto-cataliza, es decir, que a medida que opera favorece el desarrollo de las condiciones que lo fortalecen (Raúl Zapata, comunicación personal).

La eficiencia del proceso de hundimiento genera desniveles de 0.2-1.0 m en las partes superiores y de 2.0-3.0 m en las partes inferiores de los fondos planos.

El proceso de hundimiento en las zonas hidromórficas no está acompañado de manifestaciones de procesos de flujo plástico en los materiales; todas las manifestaciones son de ruptura y hundimiento.

7.5. Encadenamiento de procesos

El mecanismo de modelado descrito se presenta como un encadenamiento de procesos de naturaleza diferente, organizados y condicionados por las trayectorias del flujo hídrico interno cuyo resultado persistente es el modelado de concavidades de primer orden. Los rasgos característicos de este mecanismo son:

- La importancia del flujo hídrico interno como motor de cambios mórficos.
- El papel de procesos de disolución de arcillas caoliniticas en el perfil de meteorización como catalizador de mecanismo de modelado de geoformas internas.
- La disección de las vertientes, en tanto expresión superficial, a partir de procesos internos; este mecanismo de modelado en materiales ricos en silicatos guarda cierta similitud con lo observado en terrenos calcáreos.

7.6. Síntesis

Los mecanismos de modelado activo se configuran como una acción solidaria entre procesos de naturaleza diferente (hidrológicos, químicos y físicos). La acción solidaria se expresa a través de circuitos de retroalimentación positiva; la naturaleza inestable de ellos favorece una reorganización dinámica mediada por el cruce de umbrales.

El trabajo necesario para alcanzar y cruzar los umbrales permite diferenciar entre geoformas transitorias y geoformas persistentes; para el primer caso se tienen los túneles, las chimeneas y los puentes naturales; para el segundo, toda la diversidad de concavidades, incluidas las colinas bajas aisladas en el fondo plano de ellas.

El umbral para el caso de las concavidades lo define el nivel-base local de las quebradas adyacentes; la cercanía a este umbral induce un cambio en el comportamiento activo de una situación de avance remontante longitudinal a otra de ampliación radial.

La cantidad de trabajo morfogenético necesario para cruzar un umbral y la temporalidad involucrada son los dos factores importantes que explican la gran diversidad mórfica de las concavidades en el altiplano. Esta diversidad se puede interpretar como un sistema de estados de desarrollo mórfico diferentes. Si esta interpretación es correcta, la disponibilidad de restitutiones topográficas detalladas abre un campo de investigación valioso en geomorfometría.

A partir de parámetros de forma pertinentes (relieve relativo, gradiente, pendiente de los flancos, forma y perímetro de los fondos planos y otros), se puede investigar cuantitativamente si en la población de concavidades se presentan tendencias de evolución convergente o divergente. Con la resolución espacial de los documentos disponibles actualmente no es posible llevar a cabo esta tarea.

La posibilidad de un mecanismo de disección de las vertientes asociado en su gestación con procesos químicos de disolución de arcillas que se transforma en su desarrollo posterior en procesos físicos de erosión física interna y hundimientos encuentra un soporte sólido en el conjunto de geoformas transitorias observadas en los ejes de las concavidades alargadas y en los fondos planos de concavidades circulares.

La eficiencia del mecanismo de modelado y las estructuras mórficas producidas guardan relación con la tasa del flujo hídrico interno y su persistencia.

El desarrollo de una estructura escalonada en el fondo plano hidromórfico de las concavidades es la geoforma activa más evidente. Ella se desarrolla por medio de una dinámica de hundimientos remontantes que actúan en depósitos con alto contenido orgánico (turberas) y cenizas volcánicas retrabajadas que conjuntamente alcanzan espesores de 1.0 - 1.5 metros, sobre depósitos aluviales.

En algunos fondos planos, el escalonamiento producido genera desniveles del orden de 1.0-2.0 metros en la parte inferior, el cual se va reduciendo gradualmente hacia la parte superior de ellas donde termina por desaparecer. Estos encajamientos cuando son superiores a 1.0 metros ejercen una función de drenado en la superficie del fondo plano principal, trasladando la condición hidromórfica a los nuevos niveles subyacentes en formación.

8. TIPOS DE CONCAVIDADES

El criterio principal de clasificación de las concavidades de primer orden es su configuración mórfica; ella es susceptible de una descripción cuantitativa empleando un conjunto adecuado de parámetros tales como: el grado de encajamiento, pendiente de los flancos, forma del perímetro del fondo plano, su gradiente y su extensión.

Las diferentes configuraciones pueden considerarse como estados diferentes de desarrollo mórfico. A partir de este

criterio, se pueden buscar relaciones con otras variables importantes como el espesor y características de los sedimentos acumulados y el régimen hidrológico de los humedales.

Con estos referentes, las concavidades se pueden clasificar en cuatro grupos:

- Concavidad alargada con forma "en punta de lanza"
- Concavidades alargadas con incremento gradual de su amplitud
- Concavidades con forma "de herradura alargada"
- Concavidades con forma "de pera".
- Concavidades mixtas

8.1. Concavidades alargadas con forma de "punta de lanza"

Presentan un incremento gradual de la amplitud de sus fondos, desde la parte superior hacia la parte inferior; la gradiente longitudinal del fondo es relativamente alta (6° - 12°) y su sección transversal es cóncava o plano-cóncava. En las concavidades con menor encajamiento, la gradiente alcanza valores cercanos al valor de pendiente de los flancos de la colina donde se emplazan. En algunos casos, no se presenta variación sistemática de la amplitud.

Están modeladas en perfil de meteorización y en su fondo se presenta ocasionalmente y de modo discontinuo una acumulación pelicular de sedimentos coluviales fino-granulares (limos arenosos) de espesor mínimo (0.10-0.15 m). En el fondo de ellas son comunes las manifestaciones mórficas de una erosión física interna (túneles, chimeneas).

Estas concavidades se distribuyen de dos modos diferentes:

- Formando grupos, con distribución paralela en los flancos de las colinas.
- Como prolongaciones en los flancos de otras concavidades.

8.2. Concavidades con forma "de herradura alargada"

Se desarrollan fundamentalmente en flancos de colinas adyacentes a los valles intermedios y de mayor tamaño. El segmento posterior (respaldo) del fondo es de tipo semicircular y las líneas laterales son aproximadamente paralelas. En las concavidades de menor tamaño el fondo es cóncavo-abierto y en las de mayor tamaño es plano.

La amplitud del fondo plano es constante a lo largo de su recorrido. Su rasgo distintivo es la ausencia de cierre terminal; este tipo de concavidad es de frecuencia media a baja en el altiplano. En los flancos de ellas se desarrollan frecuentemente concavidades alargadas con forma de "punta de lanza".

La relación "Amplitud/Alargamiento" en este grupo es de mayor valor con respecto al tipo anterior. En ellas se presenta una acumulación de sedimentos coluviales y aluviales, especialmente en la parte media-inferior. Dependiendo de la gradiente longitudinal del fondo se desarrolla una condición hidromórfica con lámina superficial de agua estacional o permanente.

8.3. Concavidades con forma "de pera"

El elemento mórfico dominante es un fondo plano, amplio y extenso con un perímetro semicircular; la mayor amplitud se presenta en la parte superior, es decir, en la parte "de aguas arriba". La amplitud disminuye gradualmente "hacia aguas abajo" hasta culminar en un cierre terminal que marca el límite inferior de la concavidad.

La línea perimetral del fondo plano es aproximadamente paralela con la línea que delimita la corona de sus flancos. Es el tipo más común en el altiplano de Santa Rosa de Osos.

El desarrollo de esta forma es independiente del grado de encajamiento; se la encuentra en concavidades con encajamientos de 10-20 metros y de 100-120 metros. La forma en planta permite postular un patrón de desarrollo radial que se

sobreimpone y predomina sobre un mecanismo de incisión vertical inicial que podría producirse por procesos de hundimiento conectados con erosión interna (química y física).

Las concavidades con forma "de pera" se encajan en los flancos de las colinas y su avance radial y remontante se produce a costo de la destrucción de las rampas superiores antiguas que marcan las divisorias laterales de las colinas. Esta configuración parece constituir una tendencia convergente de desarrollo de las concavidades; las estructuras mórficas alargadas se desarrollan en las fases tempranas y las estructuras de carácter circular en las fases tardías.

En unos pocos casos, se presentan concavidades con forma de "hongo", en las cuales, la depresión presenta una forma aproximadamente circular con una salida en forma de garganta o de valle "en V", muy estrecho y corto.

8.4. Concavidades compuestas.

Corresponden a combinaciones de los tipos anteriores; su modelado se puede interpretar en términos de generaciones sucesivas de uno a dos de los patrones antes mencionados.

La combinación de dos o más generaciones de concavidades con forma "de pera" representa el caso más común; se desarrolla una nueva generación de concavidad, de menor tamaño, en el respaldo posterior de otra concavidad precedente con forma similar. En otros casos, la conexión entre generaciones de concavidades "en pera" se realiza a través de corredores alargados y estrechos.

Las concavidades mixtas más comunes involucran dos generaciones de concavidades "en pera" y ocasionalmente tres (3); el perfil longitudinal por el eje central de concavidades sucesivas es homogéneo, es decir, no presenta estructura escalonada. En estos casos, el área del fondo plano es mayor en las generaciones de "aguas abajo" y menor en las generaciones ubicadas hacia "aguas arriba".

En los corredores cóncavos estrechos que conectan generaciones de concavidades "en pera", el proceso de erosión interna y colapso de los sobretechos, generando cárcavas remontantes es más intenso.

8.5. Escalonamiento del fondo plano

En las concavidades de mayor tamaño se presentan remanentes de fondo plano a diferentes alturas, adosados a los flancos; algunos de ellos son geoformas de acumulación con un depósito aluvial de varios metros (4-5 m) mientras en otros son geoformas denudativas modeladas en perfil de meteorización.

En estos remanentes son frecuentes las depresiones cerradas de 10-20 metros de diámetro y de 1-2 metros de profundidad; se pueden provisionalmente considerar como "seudo-dolinas" desarrolladas en perfiles de meteorización de cuarzdiorita. Ver Foto 23.

Estas geoformas al igual que los sistemas de túneles y chimeneas y los procesos muy activos de hundimientos son expresión de un sistema encadenado de procesos comandado por la disolución de arcillas caoliníticas.

8.6. Las concavidades de mayor tamaño

Se encajan en escarpes erosivos que marcan la separación entre bloques colinados con contraste importante de altura; igualmente se encajan en las colinas masivas de mayor tamaño. Todas ellas presentan forma "de pera" y un sistema escalonado de fondos planos, en los cuales se alcanzan a diferenciar entre 3-5 niveles.

Los niveles superiores se encuentran modelados en perfil de meteorización; tienden a perder su forma plana y ganar una morfología ondulada e incluso formación incipiente de colinas bajas. En los niveles más bajos las alteritas se encuentran recubiertas por capas de arenas cuarzosas. Ver Fotos 24 y 25.



Foto 23. Depresiones cerradas modeladas por procesos de disolución en perfiles de meteorización de cuarzodiorita en los fondos planos de concavidades de primer orden.



Foto 24. Sistema de fondos planos bajos (niveles 5, 4 y 3) en la concavidad "Malambo", margen derecha. Remanentes de fondo plano dentro de la concavidad, configuran flancos escalonados. Hacia la parte central un nivel de fondo plano de acumulación; al fondo, el cierre terminal.



Foto 25. Sistema de fondos planos altos (1, 2 y 3) en la concavidad "Malambo", margen izquierda. La superficie planar del fondo plano ha sido modificada por erosión laminar. Los materiales en que encuentran modelados es un suelo residual (IB) rojizo franco arenoso fino con una porosidad muy alta.

En la concavidad Malambo se identificaron cinco niveles de fondo plano cuya posición respecto al nivel superior de las cima plana de la colina se presentan en la Tabla N° 1.

En las concavidades mayores se combinan varios encajamientos sucesivos que suman 40-50 metros y una ampliación radial del orden de 300-400 metros.

9. EVOLUCIÓN MÓRFICA

La diversidad mórfica de las concavidades y su distribución espacial es susceptible de un ordenamiento temporal, como ejercicio hipotético, que estimule nuevas iniciativas de investigación. El ordenamiento temporal se puede delinear en cuatro fases.

Tabla 1. Niveles de fondo plano en la concavidad Malambo.

| Nivel | Altura por debajo de la cima de la colina, en metros. | Material |
|-------|---|---|
| 1 | 10-12 | Suelo residual IB. Material franco-arenoso con una porosidad muy alta. El fondo plano se transforma en una superficie ondulada de convexidades y concavidades amplias y suaves. |
| 2 | 20-25 | Rasgos similares al nivel anterior. |
| 3 | 40 | Materiales similares a los del nivel 1. La superficie plana original ha sido modificada por erosión laminar e incisionada por vaguadas pequeñas. |
| 4 | 50 | Corresponde a una superficie plana de acumulación modelada en arenas cuarzosas con intercalaciones de capas delgadas de arcillas. |
| 5 | 52-53 | Presenta una superficie plana no disectada en la cual se configura una condición hidromórfica permanente sostenida por la surgencia de aguas subterráneas. |

Fase embrionaria

Configuración de concavidades alargadas con gradiente longitudinal fuerte (10° - 15°) en los flancos de las colinas; el fondo de ellas presenta una sección transversal cóncava, modelada en perfil de meteorización. En esta fase son importantes los procesos de "erosión física interna" (tubificación); hay igualmente un desarrollo incipiente de una condición hidromórfica temporal en el fondo de ellas.

Fase temprana

En esta fase se incrementa el encajamiento y la ampliación lateral, conservándose la forma alargada. Se presenta igualmente una disminución de la gradiente longitudinal, a valores de 4° - 6° . El fondo de la concavidad cambia su sección transversal de cóncava a plana. En estas condiciones se configura un ambiente hidromórfico permanente con lamina superficial de agua estacional.

Fase de consolidación

El fondo plano alargado de la fase anterior cambia a un fondo plano de perímetro circular. Esta configuración parece expresar una ampliación radial del fondo y un retroceso simultáneo de los flancos. Asociado a la ampliación radial se desarrolla un cierre terminal pronunciado en la parte inferior de las concavidades.

Fase avanzada

Se presenta un avance remontante de la concavidad hacia el eje de divisoria principal de las colinas, conservando la forma circular del fondo plano. Este proceso favorece la configuración de unos flancos cada vez más inclinados, los cuales llegan a alcanzar pendientes de orden de los 27° - 31° .

Las diferentes fases postuladas están condicionadas en su desarrollo por las tasas de flujo hídrico convergente hacia ellas. Este flujo hídrico actúa como un catalizador durante las tres fases iniciales. En la fase avanzada, cuando la

corona del flanco posterior de la concavidad se acerca a la cima de la colina, el flujo hídrico actúa como un factor limitante y por lo tanto regulador al avance remontante de la concavidad.

10. DISCUSIÓN

El encajamiento de concavidades de primer orden en los flancos convexos de las colinas incorpora una nueva generación de rasgos en el relieve.

Las cimas planas y rampas denudativas superiores, los flancos y las concavidades de primer orden son los tres elementos mórficos de las colinas; ellos son el testimonio de las tres generaciones de relieve más significativas en la evolución mórfica del ASRO. De ellas, las concavidades son geoformas en proceso activo de formación.

El mecanismo modelador se fundamenta en procesos de disolución de arcillas, el cual aparece como una especie de "erosión química" muy eficiente, creadora de condiciones favorables para una erosión física interna (tubificación).

La originalidad del mecanismo de modelado postulado reside en su fundamento en procesos químicos que actúan sobre materiales no calcáreos y en la realización de un trabajo subsuperficial que posteriormente se manifiesta en superficie.

Sin embargo, el mecanismo postulado coexiste con mecanismos de disección de vertientes asociados a la erosión por escorrentía, carcavamientos y procesos de incisión fluvial remontante.

A nivel del sistema de meteorización, los patrones de alteración no-plasmogénica coexisten con patrones de alteración que producen minerales arcillosos secundarios.

La coexistencia de mecanismos de alteración y de modelado contrastantes plantean el interrogante acerca de las condiciones favorables a unos u otros; estas condiciones están asociadas con valores umbrales de tasas, frecuencias y persistencias del flujo hídrico en el interior de las colinas.

11. AGRADECIMIENTOS

Los reconocimientos de campo y algunas de las discusiones acerca de la evolución geomorfológica de las concavidades de primer orden contaron con la colaboración y participación del profesor Luis Hernán González S.; su colaboración en la configuración de los elementos centrales de este ensayo fue fundamental; las carencias y vacíos sin embargo, son responsabilidad exclusiva del autor.

Los evaluadores del artículo han contribuido con sugerencias para una mejor presentación. Igualmente han puesto de manifiesto algunos temas de debate importantes. Las concavidades de primer orden son el producto de un sistema diverso de procesos, en los cuales los procesos de disolución de arcillas juegan un papel importante en las fases iniciales del desarrollo, pero donde son importantes también los procesos superficiales de retroceso paralelo de los flancos; lo persistente en este comportamiento es el modelado de concavidades en los flancos de las colinas. El uso del término altiplano para describir unidades de relieve de mayor jerarquía o para describir relieves muy comunes en la cadena de los Andes amerita, como lo plantean los evaluadores, una discusión colectiva.

12. BIBLIOGRAFÍA

Anhert, F. 1998. Introduction to geomorphology. Arnold publishers. London.

Arias, L.A, Gonzalez, L. H., Zapata, R.D., Arias, G., Loaiza, J.C. 2002. Comportamientos y estructuras del relieve y los suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos (Antioquia). Documento universitario, 365 P. No publicado.

- Arias, L.A, González, L. H., Arias, G. 2000. Historia del relieve y los suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos. Antioquia-región El Vergel-. Documento universitario, 432 P. No publicado.
- Arias, L. A.1996. Altiplanos y cañones en Antioquia: Una mirada genética. En: Revista Facultad de Ingeniería: Universidad de Antioquia. N° 12; pp. 84-96.
- Arias, L. A.1995. El relieve de la zona central de Antioquia: Un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. En: Revista Facultad de Ingeniería: Universidad de Antioquia. N° 10; pp. 9-24.
- Bremen, H.1993. Etchplanation, Review and comments of Budel's model. En: Zeitschrift fur geomorphologie. Supplementband N° 92; pp. 189-200.
- Budel, J. 1982. Climatic Geomorphology. Princeton University Press. Princeton.
- Capra, F. 1998. La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos. Editorial Anagrama, Colección Argumentos. Barcelona.
- Brunsdon, D. 1990. Tablets of stone: toward ten commandments of geomorphology. En: Zeitschrift fur geomorphologie. Supplementband N° 79; pp. 1-37.
- Brunsdon, D, and Thornes, J. B. 1979. Landscape sensitivity and change. En: Translations of British geography. 4: pp. 463-484.
- Phillips, J. D. 2001. Inherited vs. Acquired complexity in east Texas weathering profiles. Geomorphology 40: pp. 1-14.
- Rosnay, J. 1979. The macroscope: A new world scientific system. Harper & Row Publishers. New York. Translated from the French by Robert Edwards.
- Thomas, F. M. 1994. Geomorphology in the Tropics: A study of weathering and Denudation in Low Latitudes. John Wiley and Sons. Chichester: 460 P.
- Tricart, J. 1981. Précis de geomorphologie. Tome III : Géomorphologie Climatique. Société D'édition D'enseignement supérieur. Paris V.
- Tricart, J. et Cailleux, A. 1974. Traite de geomorphologie. Tome V : Le modelé des régions chaudes. Forets et savannes. Société D'édition D'enseignement supérieur. Paris V.