

EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL VALLE DE ABURRÁ Y SUS IMPLICACIONES EN LA OCURRENCIA DE MOVIMIENTOS EN MASA

EDIER ARISTIZÁBAL

MSc, Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

SHUICHIRO YOKOTA

PhD, Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japón

edier.aristizabal@metropol.gov.co

Recibido para evaluación: 09 de Septiembre de 2008 / Aceptación: 04 de Noviembre de 2008 / Recibida versión final: 07 de Noviembre de 2008

RESUMEN

La historia antigua y reciente del valle de Aburrá se ha caracterizado por la ocurrencia de numerosos movimientos en masa, los cuales han causado grandes pérdidas económicas y humanas. En el presente estudio se examina la relación existente entre la evolución del paisaje y la ocurrencia de los movimientos en masa. El objetivo planteado fue evaluar la dinámica y mecanismos de las laderas del valle de Aburrá para entender la ocurrencia actual de los movimientos en masa. Para esta investigación se realizaron análisis topográficos, cartografía geomorfológica, geocronología de los depósitos de vertiente (Carbono 14 y Huellas de Fisión), correlación de terrazas, y perfiles longitudinales del río Medellín y algunos de sus afluentes.

Los resultados encontrados permiten proponer la quebrada La Iguaná como una amplia zona compuesta de diferentes knickpoints, los cuales convergen aguas abajo al río Medellín. Las superficies de terrazas divergen aguas abajo y se proyectan directamente a los knickpoints que se propagan aguas arriba. La evolución de la quebrada La Iguaná está controlada por el mecanismo de migración de knickpoints aguas arriba. La evolución geomorfológica del valle de Aburrá en los últimos millones de años ha sido determinada basada en este mecanismo y la clasificación geomorfológico de las laderas del valle. Se propone que episodios tectónicos han bajado el nivel base del río Medellín, formando los knickpoints, los cuales migran aguas arriba de los tributarios del río Medellín como pulsos de incisión, erosionando las secciones más altas y más viejas. La incisión de los afluentes aguas arriba aumenta las pendientes de las laderas cambiando el régimen morfogenético de estabilidad general a inestabilidad potencial. Finalmente los movimientos en masa se generan como respuesta del sistema para restablecer las condiciones previas formando nuevas superficies suaves en una posición más baja.

PALABRAS CLAVES: Evolución del paisaje, Migración de knickpoints, Movimientos en masa, Valle de Aburrá, Colombia.

ABSTRACT

The ancient and recent history of the Aburrá Valley has been characterized by the occurrence of numerous landslides. Those have caused great economic losses and casualties. In this study, a survey was carried out in the Aburrá Valley to examine the link between landscape evolution and landslide occurrence. The objective of this investigation was to unravel the dynamic and mechanism of the valley slopes for understanding

contemporary landslide occurrence. Topographic analyses, geomorphological mapping, slope deposit geochronology (^{14}C , fission track), terrace correlation, and stream longitudinal profiles were carried out.

The Iguaná Stream is a broad knickzone composed of many separate knickpoints which a common downstream origin, the Medellín River. Terrace surfaces diverge in the downstream direction and project directly to knickpoints that

are propagating upstream. Long-term evolution of the Iguaná Stream is controlled by the mechanism of knickpoint

upstream migration. Evolution of the Aburrá Valley during the last millions years has been determined on the basis of this mechanism and the geomorphological classification of the Aburrá Valley slopes; tectonic episodes may have lowered

the base level of the Medellín river, forming knickpoints. These knickpoints migrate upstream through the Medellín

River tributaries as pulses of dissection, eating back into the higher and older sections. Stream incision initiates upward slope overstepping, changing morphogenetic regime from general slope stability to potential instability. Finally, mass movements are generated to reestablish gentler surfaces, forming a new staircase level in a lower position.

KEY WORDS: Landscape evolution, Knickpoint migration, Landslides occurrence, Aburrá Valley, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis geomorfológico es una herramienta esencial para el entendimiento de la ocurrencia de movimientos en masa, por lo que las formas del terreno y los procesos que ocurren sobre las vertientes tienen que ser plenamente entendidos.

La ocurrencia de movimientos en masa es el resultado de la evolución del paisaje como un sistema controlado por procesos exogénicos y endogénicos (Scheidegger, 1998). Estos procesos sobre las vertientes son parte integral de la dinámica geomorfológica, como variables que controlan la evolución del paisaje en el largo plazo. El análisis de las actuales geoformas representa entonces la mejor y más adecuada herramienta para entender y caracterizar la relación entre los procesos de vertiente y la configuración morfológica, generando la base para un modelo de evolución de paisaje, que ofrezca la mejor explicación de la susceptibilidad de los elementos del paisaje a la intervención antrópica (Brunsden, 2001).

Otra herramienta importante es el análisis de los perfiles longitudinales y la correlación de terrazas, ya que permite relacionar la tectónica con los procesos superficiales, así como evidenciar los mecanismos que han modificado el paisaje (Maddy, 1997; Mayer et al., 2002; Stokes and Mather, 2003; Griffiths et al., 2002). Igualmente, los valles de

los ríos proveen un primer acercamiento que relaciona la deformación tectónica con la respuesta del paisaje a estas deformaciones (Maddy et al., 2000; Howard et al., 1994; Bull, 1990) para lo cual las quebradas son definidas como elementos de sensibilidad estructural de primer orden, y las vertientes en contacto con estas quebradas son de segundo orden (Brunsden, 2001).

Numerosos movimientos en masa han ocurrido en el valle de Aburrá (Aristizábal y Yokota, 2006; Aristizábal y Gómez, 2007), los cuales han generado cuantiosas pérdidas humanas y económicas. La generación de nuevos asentamientos urbanos sobre las partes altas de las vertientes, en su mayoría, ha producido degradación ambiental incrementando los niveles de vulnerabilidad y riesgo en las últimas décadas. Actualmente, el valle de Aburrá tiene una población estimada de 3.4 millones de habitantes, de los cuales, solo en Medellín existen 112.697 que habitan zonas de alto riesgo no recuperable (DANE, 2005; SIMPAD, 2005). Arias (1996) resalta la importancia de esclarecer la dinámica y evolución del relieve de los Andes colombianos como un elemento fundamental para un programa serio y bien estructurado en torno al manejo y prevención de desastres.

El presente artículo presenta los resultados de un proyecto de investigación cuyo objetivo fue examinar la relación existente entre la evolución geomorfológica del valle de Aburrá y la ocurrencia de los movimientos en masa a lo largo de la historia, y establecer como dichos elementos del paisaje han jugado un importante papel durante el origen y modelación del valle a lo largo de su historia, y no sólo como elementos recientes de dicha historia. Utilizando como herramientas el marco tectónico local, la sensibilidad de los perfiles longitudinales de los ríos y quebradas, la correlación

de terrazas, y dataciones con carbono 14 y huellas de fisión, se logró reconstruir y proponer un modelo de evolución que responde a los objetivos perseguidos.

2. MARCO GEOLÓGICO Y MORFOLÓGICO

El valle de Aburrá está localizado al norte de la cordillera Central; está compuesto de un basamento metamórfico paleozoico, rocas ígneas ultrabásicas, una secuencia volcánico - sedimentaria, cuerpos graníticos intrusivos y depósitos de vertiente y aluviales (Maya y González, 1995). El basamento metamórfico, conformado esencialmente por secuencias intercaladas de esquistos, anfibolitas y gneises, fue obducido durante el Cretácico por cuerpos alargados de composición dunítica, basaltos y sedimentos de origen marino, fuertemente afectados tectónicamente (Restrepo y Toussaint, 1984). Adicionalmente, tonalitas y granodioritas cretácicas y triásicas de composición ácida a intermedia, intruyeron este complejo cuerpo metamórfico (McCourt et al., 1984; Kerr et al., 1996). La Figura 1 muestra el mapa geológico del valle de Aburrá y los depósitos de vertiente asociados al origen y conformación del valle.

El valle de Aburrá tiene un área de 1152 km² con una longitud de 65 km. Morfológicamente, es definido por Arias (2003) como una depresión con orientación sur-norte de fondo plano, localizada en la parte alta de la cordillera Central, Evolución geomorfológica del valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa - Aristizábal & Yokota. Limitada por respaldos laterales muy inclinados en roca y cubiertos en la parte baja por flujos de lodos. Las alturas del fondo del valle varían entre 1000 y 3000 msnm hacia su nacimiento. El interior del valle es caracterizado por terrazas, llanuras aluviales a lo largo del río Medellín y depósitos aluvio-torrenciales que forman abanicos a lo largo de sus principales tributarios.

Tres grandes sectores pueden identificarse en el valle. La parte central que consiste en un valle amplio, limitado al oriente y occidente por valles tributarios de la quebrada Santa Elena y La Iguaná, respectivamente, de gran extensión y evolución, mientras que los sectores norte y sur consisten en un estrecho valle asimétrico limitado por vertientes con fuertes pendientes.

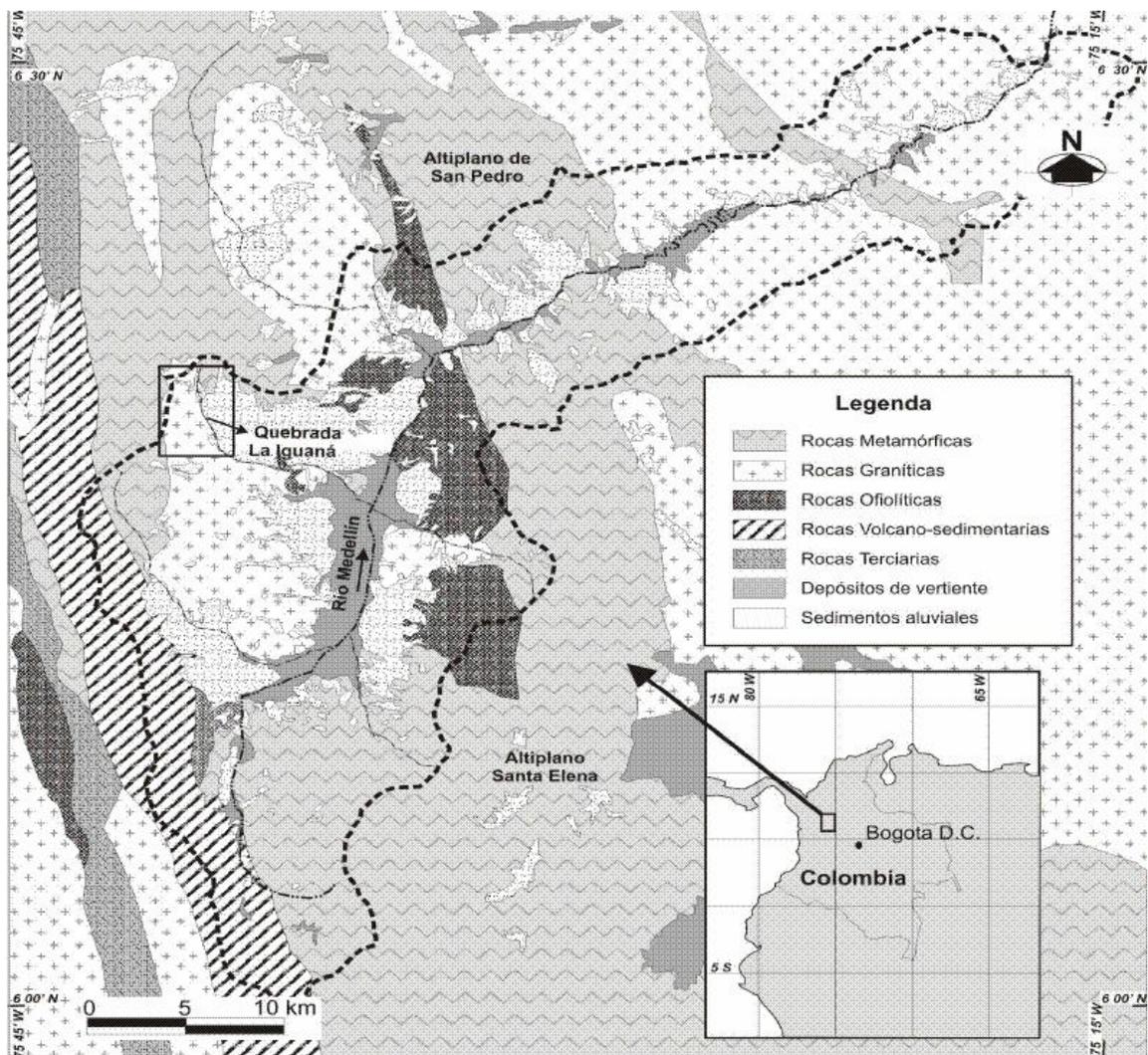


Figura 1. Mapa geológico simplificado del valle de Aburrá. La línea discontinua marca el borde de la cuenca del valle. En la parte superior izquierda: valle tributario de La Iguaná.

Antiguos altiplanos desarrollados por tres generaciones de superficies de erosión caracterizan el paisaje de la parte central de la Cordillera Central, donde se encuentra enmarcado el valle de Aburrá (Arias, 1996). El altiplano de Santa Elena (2750 m.s.n.m.) y San Pedro (2800 m.s.n.m) limitan el valle hacia el oriente y norte, pero desaparecen en el sector suroccidental donde se encuentra el frente de erosión del valle de río Cauca (Arias, 1995).

La región del valle ha sido tectónicamente activa por millones de años (AMVA, 2002). Anomalías en los drenajes y zonas de cizalla han sido reportadas en la última década, reflejando reciente actividad tectónica a lo largo de los sistemas estructurales principales (AMVA, 2002; Ortiz, 2002; Yokota y Ortiz, 2003). Uno de los principales sistemas de fallas regionales que afectan el valle de Aburrá es el Sistema Romeral, con evidencias regionales de movimientos dextrales y sinestrales (Ego et al., 1995), y tren de dirección NNW- SSE.

3. METODOLOGÍA

Bajo el marco de un valle de origen tectónico (Rendón (2003)), se desarrolló un modelo de evolución usando análisis topográficos, mapeo geomorfológico, correlación de terrazas, perfiles longitudinales y dataciones por medio de análisis de huellas de fisión y carbono 14.

Fueron utilizadas y analizadas 250 fotografías tomadas entre 1980 y 2000, con el objeto de obtener una perspectiva de la totalidad del valle a escala 1:30 000. Posteriormente, se realizó un estudio detallado sobre la parte centro occidental del valle, específicamente a lo largo del valle tributario de la quebrada La Iguaná. A lo largo de este valle se analizó el perfil longitudinal en detalle y se mapearon y caracterizaron las terrazas para su posterior correlación. Para la evaluación de las características morfológicas de esta área, fueron utilizados mapas topográficos en escala 1: 2000 y 1:5000 con curvas

de nivel con intervalo de 5 m y fotografías aéreas 1: 5000 ~ 1: 10 000. Los gradientes de las quebradas fueron utilizados para identificar y evaluar el significado de los knickpoints, los cuales son definidos como puntos de quiebre

en el perfil longitudinal. Las terrazas fueron cartografiadas y correlacionadas según su altura relativa sobre el cauce de la quebrada, el grado de disección y la pendiente. Esta correlación adicionalmente se soportó en numerosos perfiles perpendiculares al eje de la quebrada, los cuales suministraron una dimensión adicional al mapa topográfico. Los datos de elevación de los cauces y de las terrazas fueron proyectados ortogonalmente en un plano vertical construido tomando como eje central el cauce del valle.

Con el objeto de determinar la edad de los depósitos del valle, mediciones por huellas de fisión y carbono radiogénico (^{14}C) fueron obtenidas a partir de horizontes de cenizas y fragmento de madera encontrados sobre y como parte de la matriz de algunos depósitos a lo largo del valle de Aburrá.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis de los perfiles longitudinales del río Medellín y la quebrada La Iguaná

Los knickpoints son definidos como cambios marcados en la pendiente de los perfiles longitudinales de ríos (Gardner, 1983). Estos cambios pueden ser interpretados como cambios litológicos o de resistencia del material, o como respuesta al desequilibrio del sistema debido a la caída del nivel base (Hack, 1973; Howard et al., 1994; Bishop et al., 2005).

Dos características sobresalen en el perfil longitudinal del río Medellín. La primera de ellas son los marcados knickpoints a lo largo del perfil y segundo los quiebres de pendiente están sistemáticamente localizados exactamente en la intersección del valle con los más importantes sistemas de fallas que cruzan el valle (Figura 2). Estas fallas son descritas por Rendón (2003) como asociadas al origen del valle de Aburrá.

De sur a norte, el primer knickpoint coincide con la falla San Jerónimo. Esta falla es una de los principales ramales del Sistema Romeral, con una tendencia $\text{N}20^\circ - 30^\circ \text{W}$ con desplazamientos predominantemente de rumbo y desplazamientos Evolución geomorfológica del valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa - Aristizábal & Yokota. de rumbo los cuales fueron estimados por Yokota y Ortiz (2003). El segundo knickpoint es coincidente con la falla Iguaná-Boquerón; esta estructura es definida como la traza más oriental del Sistema Romeral. Finalmente, se puede establecer una correlación del knickpoint en el sector de Ancón Norte con la falla de Belmira Occidental.

De igual forma, hacia el norte del valle los knickpoints están probablemente relacionados con los sistemas de fallas asociados a los cuerpos plutónicos; sin embargo estudios más detallados deben realizarse para caracterizar esta área.

De esta forma los sistemas estructurales están marcados por los knickpoints sugiriendo que la actividad tectónica ha controlado las variaciones en los gradientes del valle. El primer sector presenta un gradiente de 0.7° . Desde el primer knickpoint, el río adquiere una mayor pendiente hasta alcanzar un 1° a lo largo de 7 km hasta el segundo knickpoint. Posteriormente el río presenta un gradiente de 0.28° ; y decrece a 0.19° hasta el cuarto knickpoint, e incrementa de nuevo hasta 0.64° hasta el último knickpoint. En el último sector del río Medellín, cambia fuertemente alcanzando un gradiente de 2 % por una corta longitud, para reducirse nuevamente.

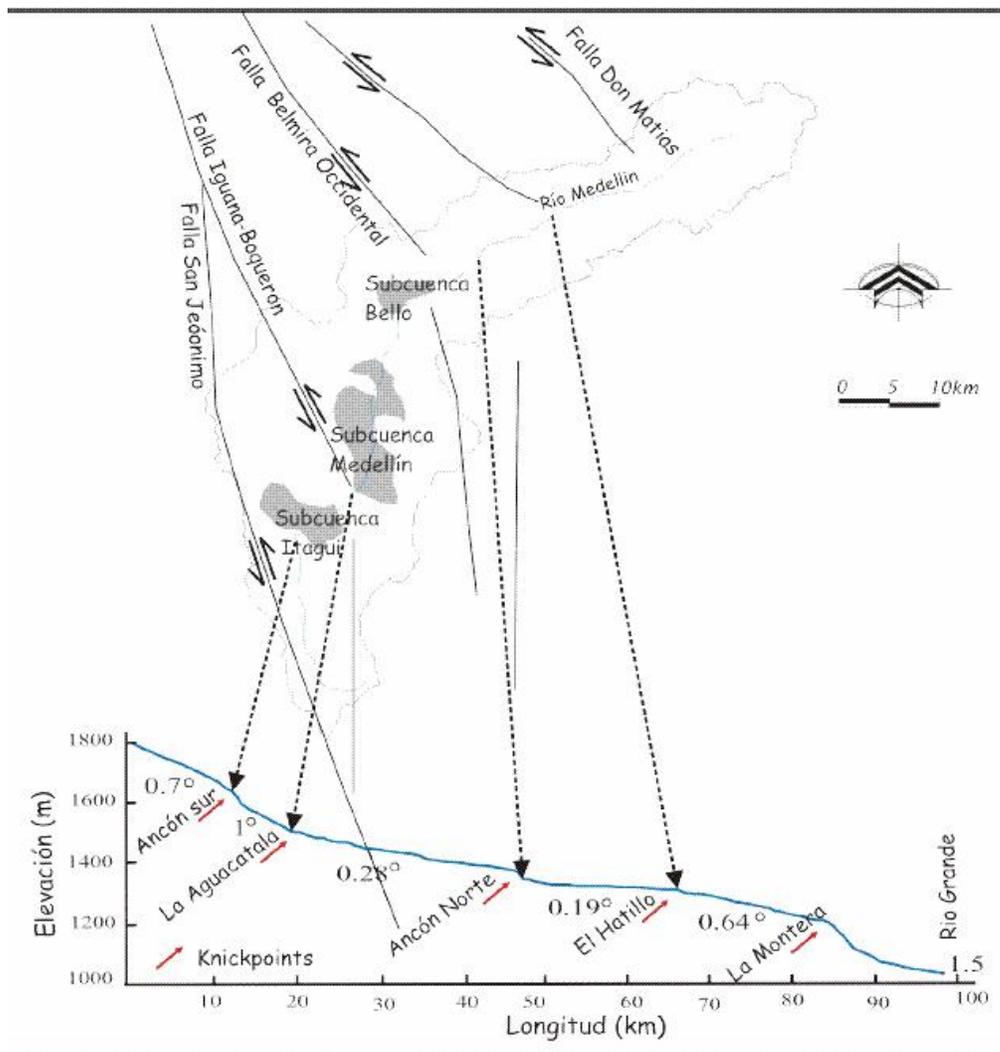


Figura 2. Perfil longitudinal del río Medellín. Los marcados knickpoints coinciden con los más importantes sistemas de fallas que generaron las subcuencas que dieron origen al valle de acuerdo a Rendón (2003).

La segunda característica del perfil longitudinal es la presencia de sectores con una tendencia convexa, claramente observable en el primer sector, y en el sector entre el segundo y el último knickpoint. La convexidad en el perfil longitudinal es inusual. Los perfiles son típicamente cóncavos, representando perfiles en equilibrio. Desviaciones de un perfil suavizado cóncavo pueden indicar que el sistema fluvial está en un estado transitorio para ajustarse a una perturbación tectónica (Holbrook & Schumm, 1999; Chen et al., 2003). La forma convexa del perfil aguas arriba de los knickpoints sugieren que no está en un estado estático, y por el contrario se encuentra en un proceso de desequilibrio.

La quebrada La Iguaná, uno de los tributarios más importantes del río Medellín, drena la margen occidental del centro del valle. A lo largo del perfil longitudinal de La Iguaná una situación similar al perfil del río Medellín se presenta. El perfil tiene una forma cóncava con fuerte pendiente. A partir de los 1885 m muestra un segmento con una pendiente muy suave. El perfil cambia a ligeramente cóncavo con un pendiente entre 3° hasta los 1970 m; a partir de esta elevación, el perfil presenta un knickpoint y continúa con un segmento convexo. Desde este punto hasta los 2200 m, la quebrada presenta un gradiente de 6°, con un marcado knickpoint a los 2100 m. el último segmento presenta una fuerte pendiente de 14° que forma un importante knickpoint a los 2200 m.

Numerosos knickpoints fueron identificados a lo largo de los drenajes tributarios de La Iguaná, los cuales coinciden típicamente con los knickpoints de La Iguaná definiendo zonas de knickpoints. Esta zonas son reconocidas a lo largo de los perfiles entre los 1970 -2050 m, 2179 - 2280 m, y 2480 - 2590 msnm. En todos los casos los segmentos que siguen a estas zonas son convexos.

4.2. Correlación de terrazas

Watchman y Twidale (2002) definen el término geomorphological land surfaces como geoformas planas o de pendientes muy suaves, las cuales pueden ser clasificadas genéticamente como erosivas o de acumulación. Estas geoformas originadas por procesos fluviales son llamadas específicamente terrazas. Estas últimas se dividen en terrazas de acumulación (fill) o terrazas de erosión (strath) de acuerdo a la presencia o ausencia de sedimentos fluviales sobre la superficie de baja pendiente, respectivamente (Mayer et al., 2003; Cheng et al., 2002). Las terrazas de erosión y terrazas de acumulación son geoformas genéticamente conectadas, donde cada terraza de erosión corresponde a una terraza de acumulación a la misma altura relativa.

De esta manera, geoformas planas o de muy baja pendiente fueron cartografiadas a lo largo del valle alto de la quebrada La Iguaná. Estas geoformas pueden separarse en superficies formada en rocas metamórficas y superficies formadas en depósitos de vertiente. Las geoformas planas formadas en depósitos de vertiente fueron subdivididas en tres niveles escalonados. El nivel I se encuentran entre los 2400 m - 2700 m s.n.m.; el nivel II entre 2300 - 2500; y el nivel III, entre en nivel base de la quebrada La Iguaná hasta los 2300 msnm, las cuales son subparalelos al canal actual de la quebrada. Continuos escarpes dividen los niveles conformando laderas escalonadas. En la parte alta las geoformas planas están desarrolladas en rocas metamórficas sobre 2700 m de elevación. Este sector está caracterizado por fuertes pendientes ($>30^\circ$), longitud moderada entre 50 - 200 m, y fuertemente disectadas (>20 m). Las superficies en depósitos de vertiente del nivel I presentan fuertes pendientes entre 15° - 25° , largas y profundamente disectadas (20 - 30m). El nivel II presenta pendientes moderadas y disectadas entre 10 to 20 m. Las superficies del nivel III están formadas por superficies con bajas pendientes, ligeramente incizadas, alcanzando un relieve local de máximo 10 m. Se caracterizan estas últimas por la presencia de morfologías asociadas a movimientos en masa con claros escarpes asociados.

Las superficies del nivel III fueron posteriormente analizadas en detalle, dividiéndolas en terrazas de acumulación y terrazas de erosión. Las primeras de ellas son conformadas por sedimentos aluviales de la quebrada La Iguaná; en tanto las terrazas de erosión están conformadas sobre depósitos de vertiente a lo largo el flanco derecho y de rocas graníticas en la margen izquierda. La mayoría de las terrazas son impares, solo algunas de ellas se preservan en ambos lados de la quebrada.

Un total de 16 superficies de terrazas fueron reconocidas (Tabla 1). Estas terrazas permiten registrar la historia de la incisión a largo plazo de la quebrada La Iguaná, de tal forma que progresivamente se incrustan en las vertientes del valle tributario, donde las terrazas mas altas típicamente equivalen estratigráficamente a las mas viejas.

Los seis niveles mas bajos preservan un mejor registro de la evolución de la quebrada ($T_1 \sim T_6$), y proveen una excelente referencia para correlacionar los niveles superiores o mas altos. Estas presentan una excelente correlación entre las terrazas de acumulación y de erosión. Las superficies son casi planas, regulares y de bajo relieve (<1 m). Estos niveles de terraza como referencia se encuentran entre alturas de 6 a 60 m sobre el actual cauce de la quebrada. Las diferencias de altura entre las terrazas alcanzan de 6 a 18 m. Estas terrazas están distribuidas a lo largo del perfil entre los 0 a 2.5 km, que corresponde a una elevación de 1820 a 1950 m. Las terrazas de acumulación se presentan típicamente entre los niveles T_1 y T_5 , conformadas por material aluvial gravo arenosos estratificado y con facies de grano fino, compuesto principalmente por bloques de roca graníticos y metamórficos redondeados. Estas terrazas han desarrollado horizontes muy finos de suelo.

Tabla 1. Niveles de terrazas identificadas y sus características. Un total de 16 terrazas fueron identificadas. Los autores numeraron de la 1 a la 16 en función de la altura relativa al cauce actual.

NIVELES	Terrazas		Material	Knickpoint		
	Altura relativa al actual cauce	Grado de disección		Distancia desde el origen (km)	Gradiente (grados)	
T_1	4	Bajo (<1 m)	Aluvial	0.6	9.5	
T_2	4 ~ 16		Aluvial	1	5.7	
T_3	10 ~ 24		Aluvial, regolito granítico, flujos de escombros	1.5	promedio 3.2	5
T_4	2 ~ 34		Aluvial, regolito granítico, flujos de escombros	2.8		7
T_5	2 ~ 52		Aluvial, regolito granítico, flujos de escombros	2.2		9.4
T_6	2 ~ 60		Aluvial, regolito granítico, flujos de escombros	2.5	7	
T_7	20 ~ 78	Moderado (1 - 5 m)	Flujo de escombros, regolito granítico	3.2	8.3	
T_8	8 ~ 66		Flujo de escombros, regolito granítico	3.7	7	
T_9	16 ~ 92		Flujo de escombros, regolito granítico	4.2	Promedio 5.8	9
T_{10}	20 ~ 106		Flujo de escombros, regolito granítico	4.5		8
T_{11}	32 ~ 124		Flujo de escombros, regolito granítico	5.1		8.9
T_{12}	34 ~ 140		Flujo de escombros, regolito granítico	5.2	13.5	
T_{13}	34 ~ 146	Alto (hasta 10 m)	Flujo de escombros, regolito granítico	5.4	Promedio 15.2	14.5
T_{14}	74 ~ 188		Flujo de escombros	5.8		12
T_{15}	50 ~ 200		Flujo de escombros	6		20
T_{16}	136 ~ 216		Flujo de escombros	6.2		17

Los niveles de terrazas intermedios ($T_7 \sim T_{12}$) corresponden estrictamente a terrazas de erosión. Las superficies son generalmente de pendientes suaves, cortas e irregulares, con relieve local entre los 2 ~ 3 m. Se puede lograr una buena correlación, siguiendo tendencias similares a los niveles de terrazas más bajos. Se encuentran entre los 2.5 a 5 km del perfil longitudinal de la quebrada La Iguaná que corresponde a elevaciones de 1950 a 2240 m. Esta terrazas se encuentran a alturas entre los 12 a 80 m sobre el actual cauce de la quebrada.

Los niveles de terrazas mas altos ($T_{13} \sim T_{16}$) se conservan pobremente en la parte alta de la cuenca. Estas terrazas presentan una muy débil correlación. Las terrazas tienen pendientes moderadas,

relativamente largas y muy irregulares, con relieves locales entre 7-10 m. Se encuentran a alturas entre los 40 – 150 m del actual cauce, y se distribuyen a lo largo de los 5 km del perfil longitudinal de la quebrada, lo que corresponde a una elevación de 2240 m.

4.3. Datación de depósitos de vertiente y material aluvial

Con el objeto de enmarcar los periodos de sedimentación de los depósitos, tanto aluviales como de vertiente, en el valle de Aburrá, se dataron materia orgánica y horizontes de cenizas en varios sitios por carbono 14 y huellas de fisión.

El material fue obtenido de sedimentos aluviales en la parte sur del valle de Aburrá. Este consistió de dos fragmentos, y fue encontrado en horizontes orgánicos con gravas y arenas del río Medellín. En la parte alta de la columna estratigráfica se encuentra un depósito de vertiente, caracterizado por grandes bloques de forma angular y completamente meteorizados.

El depósito cubre una amplia área, descendiendo desde la parte sur occidental del valle (Aristizábal et al., 2005).

Los análisis de carbono 14 fueron realizados en los Laboratorios de Geociencias de la Universidad de Shimane en Japón. La edad convencional carbono 14 fue calibrada usando el programa INTCAL 98 (Stuiver et al., 1998). La edad encontrada fue acotada con la edad convencional del método de carbono y excede el mínimo del método (>39,090 BP).

Cenizas volcánicas cubriendo depósitos de vertiente fueron tomadas en el sur occidente del valle. Estas muestras fueron datadas por el método de huellas de fisión en el Departamento de Geociencias de la Universidad de Shimane (Japón). Las edades obtenidas fueron 0.19 +/- 0.02 Ma basada en la lectura de 62 cristales y 0.22 +/- 0.05 Ma basada en 22 cristales de circón (Aristizábal et al., 2005).

De esta forma los fragmentos de madera datados en sedimentos aluviales del río Medellín sugieren edades muy antiguas para el material de lleno de la cuenca. De acuerdo con lo anterior, 40 ka puede ser interpretado como una edad mínima para los depósitos de vertiente cubriendo la columna aluvial. Este flujo de escombros en la parte superior, corresponde al mismo material datado por Ortiz (2002), el cual alcanza una edad de 0.62 Ma. Consecuentemente, depósitos de vertiente en la parte baja alrededor de esta área fueron datados entre 0.62 Ma y 40 ka. La edad de las muestras de cenizas volcánicas, las cuales cubren depósitos de vertiente, representa una edad mínima (Pleistoceno) para la depositación de estos sedimentos. Las cenizas volcánicas en este estudio corresponden a la depositación reciente sobre el valle de Aburrá, iniciada alrededor de los 0.44 Ma de acuerdo con Silva (1999). Estos resultados sugieren que los depósitos de vertiente en el sureste y noroccidente corresponden a periodos previos de la depositación reciente. Esto probablemente significa que la depositación de los depósitos de vertiente es incluso más vieja que los 0,44 Ma, Plioceno-Pleistoceno.

4.4. Reconstrucción del perfil de la quebrada La Iguaná

Las terrazas de erosión y acumulación reflejan, entre muchos otros aspectos, los cambios en el nivel base de depositación (Cheng et al., 2002). Esto depende de los movimientos tectónicos y sus efectos en el sistema fluvial o alteraciones climáticas (Plakht et al., 2000). La relativa homogeneidad del sustrato donde se localizan los knickpoints permite definir una formación similar y evolución de las terrazas en la quebrada La Iguaná. Sin embargo es necesario suponer algunas condiciones que permitan realizar dichas correlaciones: un gradiente constante de la quebrada, una respuesta uniforme de la quebrada a los cambios externos, y una altura de las terrazas como función de la incisión del valle.

La Figura 3 presenta la reconstrucción del paleo-perfil de la quebrada basado en la correlación propuesta de las terrazas. Este paleo-perfil representan la evolución histórica de la quebrada. Aunque algunas terrazas fueron completamente destruidas o erosionadas, es posible reconstruir su posición previa con un análisis geomorfológico por extrapolación del análisis de las terrazas remanentes. Las terrazas de erosión y las terrazas aluviales constituyen un par y deben ser entendidas como elementos morfológicos ligados temporal y genéticamente. El resultado de la correlación de todas las terrazas produce un perfil longitudinal de la terraza que parece ser paralelo uno al otro. El tendencia de la reconstrucción de las terrazas aguas arriba converge a los knickpoints, en tanto los niveles de terrazas divergen aguas abajo a partir de dichos knickpoints.

Evolución geomorfológica del valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa - Aristizábal & Yokota.

Tradicionalmente la migración de knickpoint usualmente se relaciona con los cambios del nivel base, y han sido válidos para integrar los drenajes y la evolución de las vertientes. La relación genética entre las zonas de knickpoints y las terrazas está fuertemente indicando la propagación aguas arriba de caídas en el nivel base. Esta característica encontrada sugiere que los cambios en el nivel base son los responsables de la formación de las zonas de knickpoints.

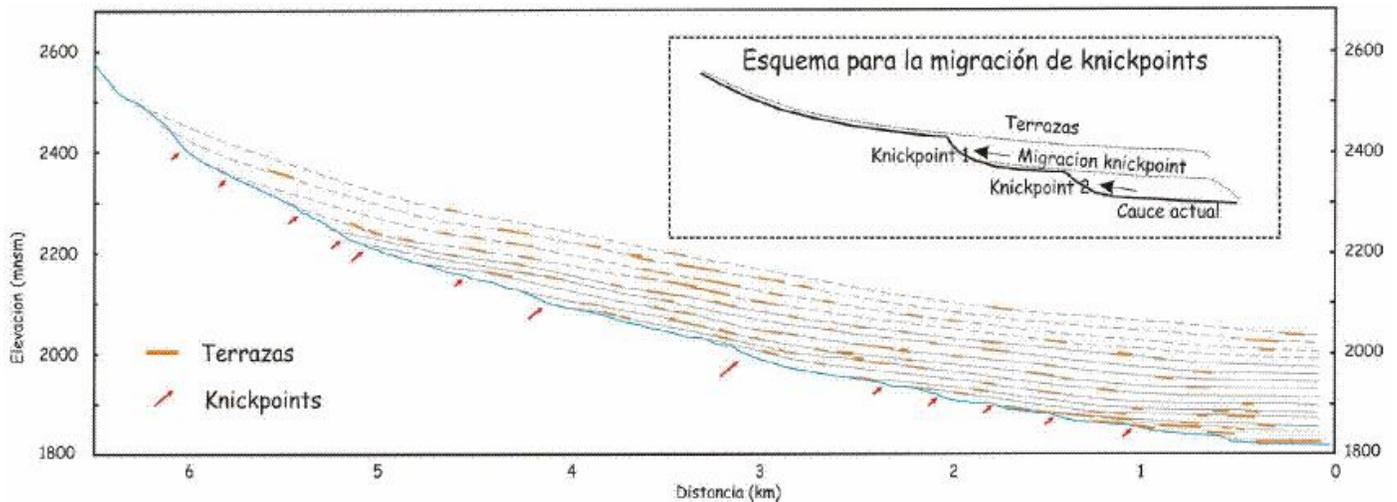


Figura 3. Reconstrucción del paleo perfil de la quebrada La Iguaná basado en correlación propuesta de las terrazas. En la parte superior izquierda modelo esquemático de la generación y migración de los knickpoint.

Este proceso que ha afectado el valle tributario de La Iguaná ha generado la caída de su nivel base de depositación local, propagándose y reclinándose aguas arriba sobre sus tributarios.

5. DISCUSIÓN

5.1. Modelo de evolución geomorfológica del valle de Aburrá

Diversas hipótesis han sido propuestas para explicar el origen del valle de Aburrá (Hermelin, 1982; Rendón, 2003), sin embargo una hipótesis tectónica para la génesis de la cuenca es ampliamente aceptada hoy en día. Esta idea ha sido apoyada por evidencias tectónicas observadas en diferentes estudios (Yokota y Ortiz, 2003; AMVA, 2002; Rendón, 2003), sin embargo los procesos erosivos han jugado un papel muy importante en la actual configuración del valle, evidenciado en los grandes depósitos de vertientes que cubren las laderas del valle. Arias (2003) define el valle de Aburrá como un basin intramontañoso poligenético, el cual difícilmente podría explicarse a partir de un comportamiento morfogenético único. En esta forma el valle de Aburrá debe ser visto como el resultado de eventos tectónicos e intensos procesos erosivos.

Basándose en análisis de perfiles longitudinales y correlación de terrazas es posible entender parcialmente la evolución geomorfológica del valle de Aburrá y proponer un modelo evolutivo, sin embargo el presente estudio solo estudia en detalle la cuenca de la quebrada La Iguaná y sus resultados, sumados con evidencias regionales de estudios previos son extrapolados para todo el valle, por lo que estudios similares o utilizando nuevas herramientas deberán realizarse en diferentes cuencas tributarias del valle con el objeto de verificar o rechazar las hipótesis planteadas. Dicha evolución, además que a el movimiento tectónico, está íntimamente asociada a la evolución del río Medellín. Los niveles o superficies escalonadas identificados a lo largo del valle tributario de La Iguaná permiten entender la evolución de dichas laderas como resultado de la combinación de periodos estáticos con el avance de frentes erosivos. Estos periodos de incisión fueron inducidos por los cambios en el nivel base

originados en el río Medellín, que se propagaron agua arriba en forma de knickpoints a lo largo de los valles tributarios, tal como lo sugiere el caso de La Iguaná. Los knickpoints representan cambios marcados durante la evolución del valle, reflejado finalmente en la configuración de las laderas como vertientes escalonadas. La evolución de las laderas representa una generación sucesiva de incisión y movimientos en masa. La cuenca tributaria de la quebrada La Iguaná está dividida en vertientes escalonadas formadas en roca y en depósitos, directamente asociadas a la evolución del valle. Los niveles en depósitos están subdivididos en tres escalones geomorfológicos, lo que sugiere al menos tres caídas o cambios marcados en el nivel base y periodos de incisión que afectaron el valle de La Iguaná. La primera está marcada por la generación de movimientos en masa y depósitos que conformaron el escalón I, el nivel II marca un segundo periodo de incisión y depositación, y las superficies en depósitos de vertiente III representan las más recientes condiciones de la quebrada. En esta forma, las superficies I corresponden a las más antiguas, generadas en las primeras etapas de la formación del valle, en tanto las superficies III representan la última etapa de evolución del valle.

La Figura 4 presenta la evolución del valle de Aburrá basado en la configuración geomorfológica escalonada de las vertientes y la propagación de knickpoints a lo largo de sus tributarios. La evolución geomorfológica del valle de Aburrá está relacionada directamente con los cambios en el nivel base y la ocurrencia de los movimientos en masa. Ambos procesos están marcados en la morfología de las laderas y en el perfil longitudinal del río y sus afluentes. Analizar ambas condiciones permite entender la evolución geomorfológica del valle. Un valle estructural como el valle de Aburrá presenta numerosas características estructurales a lo largo de su configuración topográfica. Los knickpoints en el perfil longitudinal corresponden a movimientos tectónicos, los cuales han generado cambios en el nivel base, controlando la dinámica de los frentes erosivos en los valles tributarios. La mayor densidad en la distribución de los depósitos de vertiente coincide exactamente entre los principales knickpoints en el río Medellín.

Estos cambios en el nivel base generaron frentes de erosión a través de knickpoints que se propagaron aguas arriba de los tributarios. Estos procesos generaron sobre las laderas mayores pendientes y consecuentemente cambios en la dinámica de las vertientes, las cuales en su proceso natural de alcanzar nuevas condiciones de estabilidad, se generan movimientos en masa que le permite encontrar nuevas superficies con vertientes más suaves y estables que se ajustan a las nuevas condiciones impuestas. La forma de vertientes escalonadas refleja la generación sucesiva de eventos de movimientos en masa sobre las laderas. Estos procesos han dado una configuración de superficies escalonadas distribuidas no solo a lo largo del valle de La Iguaná, sino en todo el valle de Aburrá. Al menos tres periodos de depositación asociados al mismo número de zonas de knickpoints han sido identificados para el valle.

6. CONCLUSIONES

Análisis geomorfológicos, correlación de terrazas, perfiles longitudinales, y dataciones de huellas de fisión y carbono 14 han sido utilizadas para entender parcialmente la evolución geomorfológica del valle de Aburrá y la distribución de los depósitos de vertiente.

La antigua y reciente historia del valle se ha caracterizado por la ocurrencia de numerosos movimientos en masa. Estas áreas se caracterizan por la inapropiada intervención humana y la degradación ambiental. Sin embargo, la mayoría de estas áreas corresponden a áreas con un alto grado de remobilización de depósitos de vertiente asociados al origen y conformación del valle, lo que sugiere que la intervención humana no ha sido el único factor en la generación de los recientes movimientos en masa; y por lo tanto, la dinámica y evolución de las vertientes del valle juegan también un papel esencial.

Evolución geomorfológica del valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa - Aristizábal & Yokota.

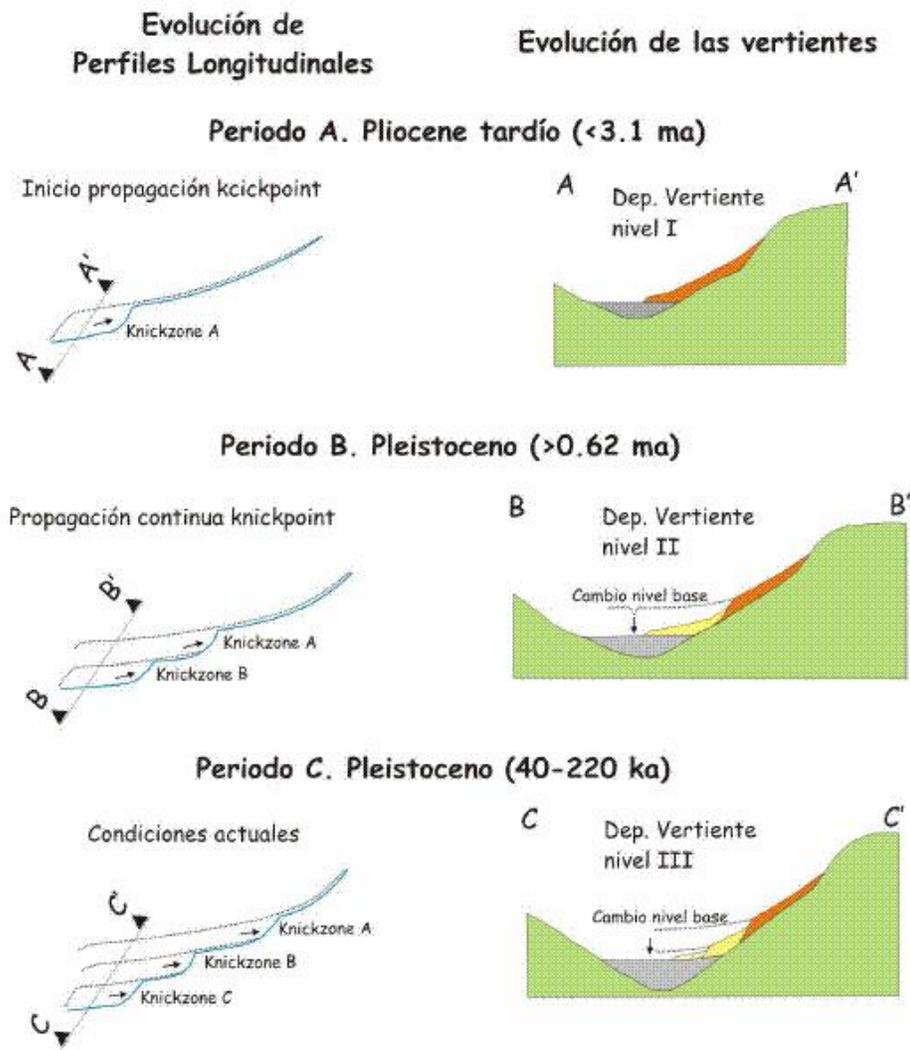


Figura 4. Modelo propuesto de evolución geomorfológica del valle de Aburrá de acuerdo al análisis de los perfiles longitudinales.

El valle de la quebrada La Iguaná, en el centro occidente del valle, fue seleccionado para un estudio mas detallado. Diferentes knickpoints fueron identificados a lo largo del perfil longitudinal de La Iguaná y sus tributarios. Los cuales coinciden sugiriendo una migración aguas arriba. La quebrada La Iguaná es una amplia zona compuesta de knickpoints con un origen común aguas abajo, que corresponde al río Medellín. Las superficies escalonadas del valle de Aburrá sugieren que la evolución de las vertientes representa una combinación de periodos estáticos y periodos de incisión y erosión. Los periodos de incisión fueron inducidos por los cambios en el nivel base del río Medellín, y estos migraron aguas arriba a lo largo de sus tributarios como knickpoints. Resumiendo, episodios tectónicos asociados al origen del valle de Aburrá generaron cambios en el nivel base del río. Estos cambios migraron aguas arriba como pulsos de disección, a través de knickpoints erodando hacia las partes más altas y antiguas secciones formadas por las quebradas. Las vertientes formadas por recientes frentes de erosión son jóvenes, menores pendientes y mas estables, conformando una nueva superficie en escalón en una posición mas baja a la anterior.

La presente investigación solo estudia en detalle la cuenca de la quebrada La Iguaná y sus resultados, sumados con evidencias regionales de estudios previos, son extrapolados para todo el valle, por lo que estudios similares utilizando nuevas herramientas deberán realizarse en diferentes cuencas tributarias del valle con el objeto de verificar o rechazar las hipótesis planteadas. Adicionalmente existen muchos otros elementos que evidentemente han incidido en la actual configuración del valle, los cuales no fueron considerados en el presente estudio. Finalmente existen aun mas preguntas que respuestas sobre los detalles de los procesos

planteados en este trabajo, entre los más importantes están la correlación genética de las terrazas de erosión con el actual cauce y explicar el dominio de los retrocesos erosivos sobre los perfiles longitudinales de los tributarios en contraste con el dominio tectónico sobre el perfil longitudinal del río Medellín.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo -IDB- y el Gobierno Japonés al primer autor como parte Programa de Becas Japón-IDB.

REFERENCIAS

Área Metropolitana del Valle de Aburrá -AMVA-, 2002. Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá. Reporte Interno. Medellín.

Arias, A., 1995. El relieve de la zona central de Antioquia: un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. No. 10, pp. 9-24.

Arias, A., 1996. Altiplanos y Cañones en Antioquia: una mirada genética. Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. No. 12. pp. 84-96.

Arias, A., 2003. La diversidad del relieve y de los suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos (Antioquia): sus significados ambientales. Boletín Ciencias de la Tierra. No.15, pp. 51-72.

Aristizábal E., Yokota S., Ohira H. & Hagai J., 2004. Dating of slope sediments and alluvial deposits in the Aburra Valley, Colombia. Geoscience Rept. Shimane Univ. 23, pp. 85-88.

Aristizábal, E., Roser, B., & Yokota, S., 2005. Tropical chemical weathering of hillslope deposits and bedrock source in the Aburrá Valley, northern Colombian Andes. Engineering Geology. N. 81, p. 389-406.

Aristizábal, E. & Yokota, S., 2006. Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburrá. Revista Dyna Vol.149, pp. 5-16.

Aristizábal, E. & Gómez, J., 2007. Inventario de emergencias y desastres en el valle de Aburrá: originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007. Revista Gestión y Ambiente, Vol. 10 No. 2, pp. 17-30.

Bishop p., Hoey T. & Irantzu L., 2005. Knickpoint recession rate and catchment area: The case of uplifted rivers in Eastern Scotland. Earth Surface. Processes of Landforms V. 30, p. 767-778

Bull, W.B., 1990. Stream-terrace genesis: implications for soil development. Geomorphology, Vol. 3, pp. 351-367.

Brunsdon, D., 2001. A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. Geomorphology Vol. 99, pp. 99-123.

Chen, Y., Sung, Q. & Cheng, K., 2003. Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis. Geomorphology Vol. 56, pp. 109-137.

Cheng, S., Deng, Q., Zhou, S., Yang, G., 2002. Strath terraces of Jinshaan Canyon, Yellow river, and Quaternary tectonic movements of the Ordos Plateau, North China. Terra Nova V. 14, N. 4, p. 215-224.

Ego F. Sébrier M. & Yepes H., 1995. Is the Cauca-Patia and Romeral Fault System Left or Rightlateral?. Geophysical Research Letters, Vol. 22, No. 1, pp. 33-36.

Gardner T.W., 1983. Experimental study of knickpoint and longitudinal evolution in cohesive, homogeneous material. *Geological Society of America Bulletin* Vol. 94, pp. 664-672.

Griffiths J.S., Mather A.E. & Hart A.B., 2002. Landslide susceptibility in the Rio Aguas catchment SE Spain. *Quart J Engng Geol* Vol. 35, pp. 9-17.

Hermelin, M., 1982. El origen del valle de Aburrá: evolución de ideas. *Boletín Ciencias de la Tierra*, No. 7-8.

Holbrook, J. & Schumm, S.A., 1999. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics* 305, pp. 287-306.

Howard, A.D., Dietrich, W.E. & Seidl, M.A., 1994. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. *J. Geophys Res* Vol. 99, pp. 13971-13986.

Hack J.T., 1973. Stream profile analysis and stream gradient index. *United States Geological Survey Journal of Research* Vol. 1, pp. 421-429.

Kerr, A.C., Tarney, J., Marriner, G.F., Nivia, A., Saunders, A.D. & Klaver, G.Th., 1996. The geochemistry and tectonic setting of Late Cretaceous Caribbean and Colombian volcanism. *J. South. Amer. Earth Sci.* Vol. 9, pp. 111-120.

Maya M. & González H., 1995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Bol. Geol., INGEOMINAS* Vol. 35 No. 2-3, pp. 44-57. Bogotá.

Mayer L.; Menichetti M.; Nesci, O. & Savelli D., 2003. Morphotectonic approach to the drainage analysis in the North Marche region, Central Italy. *Quaternary International* Nos. 101-102, pp. 157-167.

Maddy, D., Bridgland, D.R. & Green, C.P., 2000. Crustal uplift in southern England: evidence from the river terrace records. *Geomorphology* Vol. 33, pp. 167-181.

Maddy, D., 1997. Uplift-driven valley incision and river terrace formation in southern England. *Journal of Quaternary Science* Vol. 12 (6), pp. 539-545.

McCourt, W., Aspden, J. & Brook, M., 1984. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *J. Geol. Soc.* Vol. 141, pp. 831-845.

Ortiz, E., 2002. Evaluation of neotectonic activity of The Cauca-Romeral Fault System near western Medellín, Colombia. *Graduate Thesis, Shimane University*, 119 P.

Plakht J., Patyk-Kara N. & Gorelikova N., 2000. Terrace pediments in Makhtesh Ramon, central Negev, Israel. *Herat Surface Processes and Landforms*. Vol. 25, pp. 29 - 39.

Rendón, D. A., 2003. Tectonic and sedimentary evolution of the upper Aburrá Valley, northern Colombian Andes. *Master thesis Shimane University. Japan*. 124 P.

Restrepo, J. & Toussaint, J., 1984. Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. *I Conferencia de Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá*, pp. 1-27.

Stuiver, M., Reimer, P., Bard, E., Warren-beck, J., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., van der Plicht, J. & Spurk, M., 1998. INTCAL 98 Radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon* Vol. 40, pp. 1041 - 1083.

Silva, D.L., 1999. Datación por trazas de las tefras depósitadas en los alrededores del Valle de Aburrá. *Trabajo de grado, Departamento de Geología, Universidad EAFIT*, 60 P.

Stokes M. & Mather E., 2003. Tectonic origin and evolution of a transverse drainage: the Río Almanzora, Betic Cordillera, Southeast Spain. *Geomorphology*. Vol. 50, pp. 59-81.

Yokota, S. & Ortiz, E., 2003. ^{14}C dating of an organic paleosol covering gravel beds distributed along the San Jerónimo Fault, Western Medellín, Colombia. *Geoscience Rept. Shimane Univ.* Vol. 22, pp. 179-182.