

ESTUDIO MORFOTECTÓNICO DE UN TRAMO DEL RÍO HERRADURA ENTRE FRONTINO Y ABRIAQUÍ, CORDILLERA OCCIDENTAL DE COLOMBIA.

MORFOTECTONIC STUDY OF A SECTION OF HERRADURA RIVER BETWEEN FRONTINO AND ABRIAQUÍ, WESTERN COLOMBIAN CORDILLERAN.

SANTIAGO NORIEGA LONDOÑO

Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, santiageo@gmail.com

JOSÉ HUMBERTO CABALLERO

Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, jhcaball@unal.edu.co

ALBEIRO RENDÓN RIVERA

Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, arendonr@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 08 de Agosto de 2012 / Aceptación: 03 de Mayo de 2013 / Recibida versión final: 7 de Junio de 2013.

RESUMEN: Este trabajo compila, analiza e interpreta las características morfotectónicas de la cuenca media del Río Herradura, localizada sobre la cordillera occidental, en inmediaciones de los Municipios de Frontino y Abriaquí – Antioquia, sector donde aparecen marcadas expresiones geomorfológicas asociadas al sistema de fallas de San Ruperto. El objetivo de este estudio consiste en identificar y caracterizar indicios/evidencias de actividad tectónica reciente por medio de la aplicación de indicadores morfotectónicos, mediante el uso de metodologías que integran la interpretación fotogeológica, los análisis morfométricos a partir de modelos de elevación digital y la recolección directa de información en campo, para así construir una cartografía en escala 1:20.000 que sintetice las características geomorfológicas y morfotectónicas que indiquen actividad tectónica reciente. Las evidencias más claras se encuentran sobre el sector de Potrerros, donde fallas de rumbo con orientación N60°W y NNE afectan el cauce actual del río Herradura, además de presentarse basculamientos y levantamientos diferenciales sobre las terrazas adyacentes.

PALABRAS CLAVES: Morfotectónica, Geología del Cuaternario, Cordillera Occidental, Fallas Activas, Indicadores morfométricos, Río Herradura, Fallas ciegas, Sistema de fallas de San Ruperto.

ABSTRACT: This work compiles, analyzes and interprets the morphotectonic features of the middle basin of the Herradura River, located on the western cordillera of Colombia, in the vicinity of the Municipalities of Frontino and Abriaquí– Antioquia, where very pronounced geomorphological expressions associated with the San Ruperto fault system take place. The goal of this study is to identify and characterize recent active tectonic hints/evidences using morphotectonic indicators. Through the use of methodologies that integrate photogeological interpretation, morphometric analysis based on digital elevation models and data acquisition from field work, it was possible to build cartography at scale 1:20.000 that synthesize the geomorphological and morphotectonic features that indicate recent tectonic activity. The clearest evidence is located at the Potrerros zone, where strike-slip faults with orientation N60°W and NNE affect the present course of the Herradura River, in addition to tilting and differential uplifting when compared with the adjacent terraces.

KEY WORDS: Morphotectonics, Quaternary Geology, Western Cordilleran, Active Faults, Morphometric indicators, Herradura River, Buried Faults, San Ruperto fault system.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de Fallas de San Ruperto, ubicado sobre el eje de la cordillera occidental, entre los municipios de Frontino y Abriaquí (Figura 1), con orientación predominante N-S se encuentra cubierto por un conjunto de depósitos aluviotorrenciales y fluvio-glaciales que en general enmascaran las zonas de cizalla asociadas a este sistema en medio de las rocas sedimentarias Cretácicas

plegadas del Miembro Urrao. La configuración del paisaje muestra un desarrollo de geoformas anómalas como: basculamiento de terrazas, desplazamiento de drenajes y depósitos recientes; interpretadas en este trabajo como deformaciones tectónicas recientes. Este estudio nace de la necesidad de aportar información para mejorar la evaluación de la amenaza sísmica en el departamento de Antioquia.

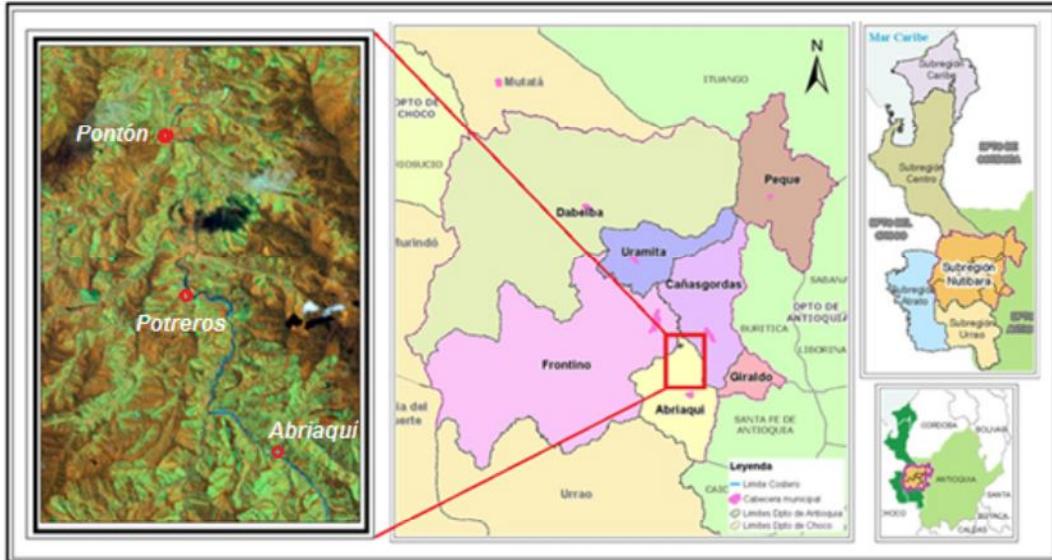


Figura 1. Localización del área de estudio. (Modificado de CORPOURABA, 2008).

2. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO

Las unidades litológicas del occidente antioqueño se disponen en franjas subparalelas de rocas oceánicas vulcano-sedimentarias Cretáceas en sentido N-S, definidas como Grupo Cañasgordas (Álvarez, 1971 en Ingeominas, 2001), este grupo a su vez puede dividirse en: i) *Formación Barroso*, conformado por vulcanitas tipo basaltos, espilitas, pórfidos y microgabros que afloran sobre el flanco oriental de la cordillera occidental; ii) *Formación Penderisco*, conformada por sedimentitas turbidíticas, dentro de la cual se han distinguido dos miembros, el primero denominado *Miembro Urrao*, en el que predominan paquetes de areniscas y arcillolitas, mientras que en el segundo predominan las sedimentitas biogénicas o químicas, formadas por liditas y calizas micríticas negras, llamado *Miembro Nutibara*. El contacto entre estos miembros no es neto y en algunos casos logra observarse un contacto gradacional.

Se han identificado diferentes cuerpos intrusivos clasificados como Stocks Diorítico/Monzoníticos (Ingeominas, 2001), que al intruír han interrumpido el buzamiento de las estructuras regionales y han generado aureolas de contacto con formación de cornubianitas. Este cinturón de cuerpos plutónicos se asocia al ciclo de actividad magmática que se extendió desde el Oligoceno medio al Plioceno temprano (Álvarez, 1983 en González, 2002) seguido de intenso tectonismo y vulcanismo.

Las formaciones superficiales están constituidas principalmente por depósitos aluviales, aluviotorrenciales y fluvio-glaciares que cubren una extensa porción del área de estudio y que se disponen hacia el fondo de los principales drenajes, cubriendo las expresiones superficiales de las estructuras que controlan el drenaje; también se han desarrollado abanicos aluviales y deslizamientos que parecen mostrar relación con los eventos sísmicos de la zona.

En la actualidad, los datos obtenidos por el proyecto GEORED, (Mora & López, 2011), además de los trabajos realizados por Kellogg & Vega (1995), Vargas-Jiménez, et al (2002), Pulido (2003), Toro-Ramírez (2005), Colmenares & Zoback (2003), Kennan & Pindell (2009), entre otros, logran establecer un acercamiento al estado actual de esfuerzos entre placas, microplacas y la deformación que estas inducen en el bloque andino, (Figura 2), y aunque aún quedan preguntas sin resolver e investigaciones futuras por desarrollar, se pueden comprender de manera parcial, cuales son los principales campos de esfuerzos activos sobre la margen occidental de los andes colombianos hacia una latitud media de 6° N.

En este trabajo se asume que la placa Nazca posee velocidades promedio de 50 mm/año en sentido W-E, induciendo un ascenso y acortamiento de la corteza oceánica por medio de plegamientos y fallas de vergencia al W, evidenciados por eventos sísmicos superficiales

e intermedios (Toro-Ramírez, 2005); la colisión de la placa Caribe y el bloque suramericano, induce desplazamientos sinistral, produciendo reactivación/inversión de fallas asociadas al sistema de Cauca-Romeral. Para el bloque Panamá-Chocó, se estiman velocidades promedio de 25 mm/año hacia el SES,

generando un empuje responsable de las estructuras de orientación NW con movimientos laterales izquierdos y componentes inversas, configurando finalmente una compleja interacción entre Placas, responsables de la sismicidad registrada en las últimas décadas.

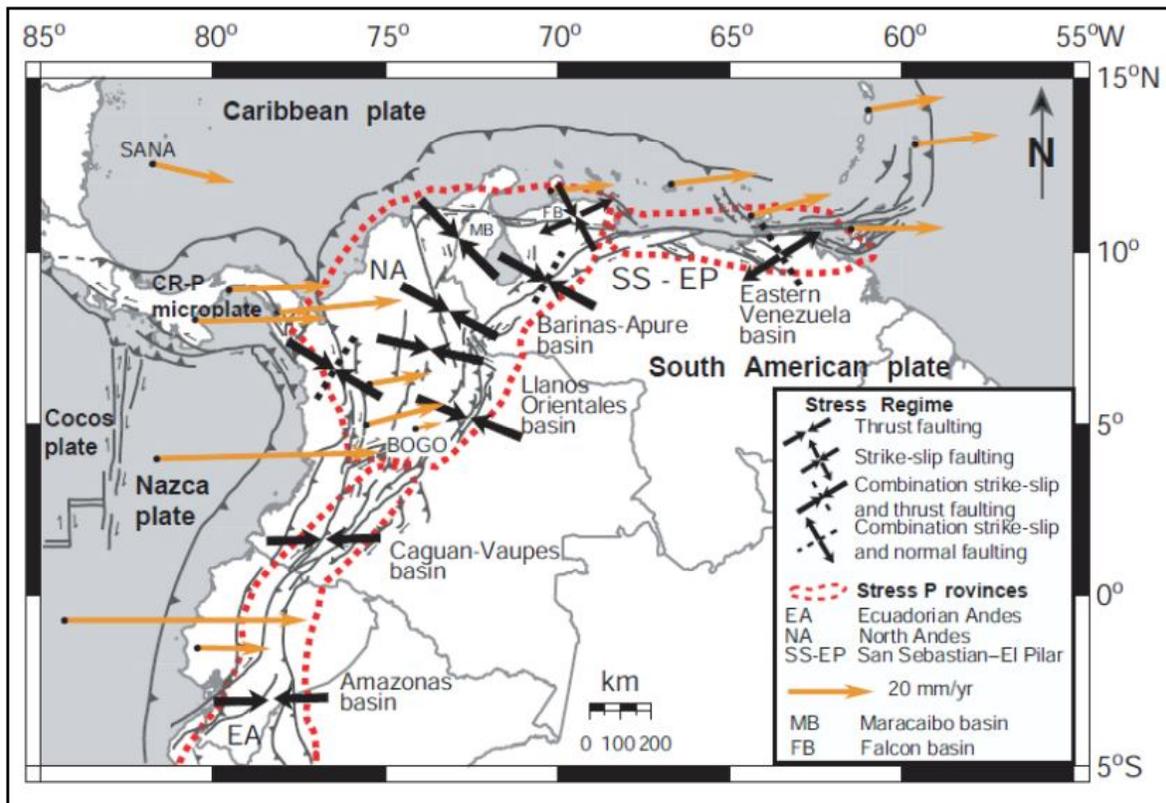


Figura 2. Esquema geotectónico del NW de Suramérica en el que se destacan los movimientos relativos de las placas y los bloques tectónicos, además de los sistemas de fallas activos en la actualidad y sus regímenes de esfuerzos; Nótese que para la zona de trabajo, el régimen de esfuerzo corresponde a una combinación de movimientos de rumbo con movimientos compresivos (Tomado de Colmenares & Zoback (2003).

3. METODOLOGÍA

Después de una búsqueda y recopilación de información secundaria, que permitiera construir el marco geológico y tectónico regional de la zona de estudio, se realizó una cartografía Morfotectónica a escala 1:20.000, por medio de sesiones de fotointerpretación con vuelos a escala aproximada 1:10.000, visitas a campo y tratamiento de datos a través de ArcGIS sobre un Modelo de elevación digital del terreno (DEM). La identificación y caracterización morfotectónica se realizó con base en los marcadores propuestos por Hack (1973), Bull & McFadden (1977), Keller & Pinter (2002), Scheidegger (2004) y Bull (2007). Finalmente con la integración y análisis de toda la información, se elaboró una

hipótesis de trabajo para la posterior ejecución de estudios más detallados.

4. RESULTADOS

4.1. Morfología del Valle del Río Herradura

La cuenca media del río Herradura morfológicamente puede segmentarse en tres tramos: 1) la parte sur, con una configuración típica de valle intramontano, medianamente ancho, de baja madurez morfológica, con vertientes en V definidas por laderas extensas y planas que configuran cuchillas alargadas en sentido N-S, E-W y N70°E, el fondo del valle

es plano y está relleno de sedimentos (Figura 3-a), no se presenta un desarrollo importante de depósitos aluviales y la llanura de inundación no supera los 300 m de ancho. 2) la zona central, que presenta una extensa apertura del valle con anchos de hasta 2,5 km, donde principalmente se ha dado lugar a la acumulación de sedimentos (Figura 3-b), hay incisión activa de los mismos, las cuchillas presentan una orientación preferente N60°W a E-W hacia los bordes de la cuenca y se ven limitados hacia los extremos más alejados por cuchillas de gran extensión con sentido N-S; 3) la zona norte, donde el valle cambia abruptamente y se encañona en medio de filos que le imprimen una geometría rectangular (Figura 3-c).

4.2. Marcadores lineales

4.2.1. Red de Drenaje

La red de drenaje posee una geometría irregular y compleja; al norte se exhibe un típico drenaje dendrítico subparalelo, con tributarios confluyendo a 30° sobre la margen izquierda (quebradas Nancuít, Piedras, y Pontona) y ángulos de 60 - 70° en la margen derecha (quebradas Morrogacho, Santa Teresa, La Antigua, Guamo y Pizarrito). La zona sur muestra una geometría sub-dendrítica que se observa en el Río Herradura, la quebrada La Porróna y la quebrada San Ruperto. Sumado a esto, hay sectores con anomalías locales y giros marcados como se nota en la desembocadura de las quebradas Piedras y Pontona.

4.2.2. Drenajes desplazados

Los más sobresalientes se encuentran en la parte baja de la quebrada Piedras, haciendo un giro de más de 90° a la derecha; en el sector de Potreros el río Herradura muestra desplazamientos en sentido sinistral por más de 1 km con orientación N60°W, allí se observa un movimiento de rumbo sinistral que desplaza el cauce principal y los sedimentos de la llanura de inundación con rumbo NNE. En este mismo sector 500 m aguas arriba, se encuentra un desplazamiento de aproximadamente 20 m sobre el cauce del río en sentido lateral izquierdo y orientación aproximada de N70°W. Sobre la quebrada la Nancuicita aparecen dislocaciones con orientación N80°E que desplazan el drenaje en sentido dextral. La quebrada La Pontona muestra deformaciones en sentido N-S con sentido sinistral. Afectaciones sobre el cauce actual del río Herradura y la llanura de inundación

con sentido sinistral, se pueden ver 200 m al Este de la confluencia de la quebrada San Ruperto sobre el río Herradura, en dirección a Abriaquí.

4.2.3. Escarpes indiferenciados

Coinciden con la tendencia espacial de los lineamientos. Se identificaron aproximadamente 66 escarpes, predominando hacia la zona sur. La mayor parte corresponde a escarpes erosivos. Se notan correlaciones con los trazos de los sistemas de falla N-S, como se ven sobre las márgenes de las quebradas La Peña, La Porróna, y Potrero grande; además, hacia la zona sur aparecen escarpes cortos de orientación E-W. Hacia la parte norte del sector de La Vuelta se encuentran pequeños trazos intermitentes de escarpes que poseen una orientación NNW, constituyendo remanentes de los sistemas de falla NS. Finalmente hacia el giro forzado de la quebrada Piedras se encuentra un escarpe de falla (?) de orientación NNE de aproximadamente 4.0m de desnivel (Figura 3-e).

4.2.4. Sag Pond

Aparecen en inmediaciones de las quebradas Pontona y Pontoncita hacia el frente de montaña con depresiones cerradas y extensas, asociados a lineamientos. También sobre la planicie levantada del sector sur de Potreros se encuentran depresiones con orientación N-S (Figura 3-f).

4.2.5. Lomos de obturación

Sobre el frente de montaña de la quebrada Pontona aparecen geoformas de este tipo, indicando movimientos sinistral de orientación N-S aproximadamente, también en el drenaje que sigue al Norte sobre este mismo frente de montaña aparece uno *más*. Todos con sentido NS. Hacia la parte alta de la quebrada Piedras aparecen con orientaciones NW. Sobre las quebradas la Muerte y Cerrazón, aparecen con orientaciones NNE sobre el frente de montaña de la margen derecha del río Herradura (Figura 3-g). En la quebrada La Celestina con orientación NW. En la quebrada la Mansa y Mansita con orientación NS donde se pueden observar diferentes cuchillas que atraviesan el drenaje mostrando dislocaciones en sentido sinistral. En el río herradura con orientación NW sobre el sector del Pontón.

4.3. Marcadores Planos

4.3.1. Terrazas Aluviales

En la zona se presenta una extensión de aproximadamente 12 km², donde las pendientes de las terrazas corrientemente siguen la orientación del flujo del río Herradura, estas muestran poca pendiente, con planos reversos, aunque en la parte baja de la quebrada Piedras y la margen izquierda de la quebrada Morrogacho, se presentan dislocaciones con inclinaciones y orientaciones anómalas (Figura, 3-h); más adelante se presentan detalles de estas geoformas.

4.3.2. Facetas Triangulares

Predominan las direcciones N-S, observadas sobre el Río Herradura, a la altura de la quebrada Cerrazón; en la margen derecha de la quebrada La Mansita; facetas aisladas en la margen izquierda de la quebrada Piedras, hacia la parte baja de la quebrada Potrero Grande sobre la margen derecha; y en la margen izquierda de la quebrada La Pontona. Con direcciones N20W, se encuentran conjuntos de 4 facetas triangulares entre las quebradas La Timotea y Pizarrito. Entre las quebradas Cerrazón hasta el límite sur del Río Herradura aparecen conjuntos de facetas con orientaciones N10-20E sobre ambas márgenes; también la quebrada Potrero Grande y la quebrada Morrogacho y la desembocadura de la quebrada El Rodeo. Con orientaciones N50W aparecen en la margen derecha de la quebrada la Pontoncita y sobre la desembocadura de la quebrada San Bartolo. Aparecen otras facetas triangulares aisladas con orientaciones N30E sobre la desembocadura de la quebrada Morrogacho y E-W hacia la desembocadura de la quebrada Peñas. Al norte de Potreritos aparecen facetas en ambas márgenes del río Herradura, mostrando los trazos de las fallas N-S que atraviesan los depósitos.

4.3.3. Cuchillas Alineadas

Sobre las quebradas La Porróna, La Peña y San Ruperto, al sur del área de trabajo, predominan cuchillas de orientación N-S, de morfologías alargadas, convexas y cerradas, que parecen mostrar relaciones con los sistemas de fallas presentes; estas parecen interceptar un conjunto de cuchillas de orientación N60°E ubicadas hacia los extremos laterales de este sector, mostrando

continuidad entre las quebradas de La Mansa y San Bartolo. Es importante observar como las cuchillas de la cuenca de la quebrada La Mansa, muestran una deflexión o curvatura hacia el NNE a medida que se acercan hacia el Río Herradura.

Desde el caserío de Potreritos hacia el norte, las cuchillas muestran una orientación preferencial W-E (Figura 3-i), generándose un filo delgado e irregular que conecta la planicie de la quebrada Piedras en la parte alta, con la planicie del sector sur de Potreritos. Al acercarse hacia la quebrada Morrogacho, las cuchillas de la margen derecha del río Herradura se tornan más rectas y continuas con leves cambios en la orientación que las ponen en sentido N70W (Figura 5-c), hasta el punto de marcar un cambio abrupto del curso del río hacia la Izquierda.

Sobre este sector, hacia la margen izquierda del río Herradura, entre las quebradas Potrero grande y Piedras, se encuentra una cuchilla de primera generación con orientación aproximada N-S a la cual, de manera simétrica, le siguen cuchillas de segunda generación con orientaciones W-E, indicando levantamientos de este sector en los cuales el sistema de drenaje se altera y de ser sub-paralelo pasa a ser sub-rectangular, además de marcar un cambio evidente en la geometría de las cuchillas (Figura 3-j); estos filos de segunda generación, presentan formas alargadas y rectas, sin escalonamientos, asimismo muestran una morfología comparables con las cuchillas que se presentan al sur de este sector.

4.4. Índices Morfométricos Que Evidencian Tectónica Activa

4.4.1. Sinuosidad del frente montañoso (J)

Definido como el índice que refleja el balance entre los procesos erosivos que tienden a formar abanicos o flujos sobre un frente montañoso, y los procesos tectónicos que tienden a formar frentes de montaña rectos coincidentes con bordes de falla activos (Keller & Pinter, 2002). El valor numérico se obtiene por medio de la relación entre la longitud de la línea que sigue la topografía L_j y la longitud de la línea recta que une los dos extremos del frente montañoso L_s , por lo tanto: $J = L_j/L_s$ (Bull, 2007).



Figura 3. Elementos morfológicos de la cuenca media del río Herradura. Nótese las diversas vistas del valle del río Herradura: a) Valle en V con fondo plano en la zona sur; b) Valle ancho con incisión en depósitos hacia la zona media; c) Valle en V de alto gradiente hacia la zona norte; d) Lineamiento N-S asociado al sistema de fallas de San Ruperto en la confluencia de la quebrada San Ruperto y el río Herradura; e) Escarpe de falla de aproximadamente 4.0 m ubicado hacia el giro forzado de la quebrada Piedras; f) Sag pond de orientación N-S en la parte alta del depósito colgado al sur de Potreros; g) Lomo de obturación que interrumpe un tributario del río Herradura sobre la margen derecha; h) Disposición anómala de las terrazas en el sector de Morrogacho y la Hacienda Potreros; i) Cuchilla asociada a la falla Abriaquí; j) Evolución morfológica de las cuchillas sobre la parte sur de Potreros, donde el levantamiento induce una segunda generación de filos con orientación W-E.

Comúnmente este valor es menor de 3.0 y alcanza un mínimo de 1.0. Así, mientras más cercano este J de 1.0, más expresión morfológica tendrá, puesto que será más

recto y definido, indicando que los procesos tectónicos predominan sobre los erosivos. En la tabla 1 se observan los valores de este índice para la zona estudiada.

Tabla 1. Índices de sinuosidad para los diferentes frentes de montaña.

Frente de montaña	Índice de sinuosidad (J)	Grado de actividad
Quebrada Pontona	1.744	Poco activo
Río Herradura – Oda. Timotea	1.036	Activo
Quebrada Pontoncita	1.083	Activo
Quebrada Potrero grande	1.064	Activo
Río Herradura – Oda. Cerrazón	1.125	Activo
Río Herradura – Oda. San Ruperto	1.173	Activo

4.4.2. Perfil longitudinal del río Herradura

En la Figura 4-a se presenta un perfil longitudinal del río Herradura a través del área de trabajo, allí puede observarse su geometría convexa no representativa de un perfil de equilibrio. Sobre la cota 1750 - 1800 msnm, aparece un aumento abrupto de la pendiente del río, este punto corresponde al sector de Potreros y la desembocadura de la quebrada Morrogacho, donde se observa un lineamiento de expresión clara asociado a la falla de mismo nombre.

Se puede ver además que entre los 1350-1450 msnm, aparecen una serie de quiebres de pendiente dentro de un trayecto del río relativamente corto, las variaciones de la pendiente son oscilantes, es decir, aumentan y disminuyen en aproximadamente dos sectores, situación que puede atribuirse a posibles deformaciones asociadas a fallas como El Guamo y San Ruperto.

4.4.5. Ancho del fondo del valle frente a la altura de la cuenca (V_f)

La relación numérica definida por Bull & McFadden (1977) como:

$$V_f = 2V_{fw} / [(E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})]$$

En las que se mide el ancho del fondo del valle (V_{fw}), la altura media de las divisorias de ambas márgenes del cauce (E_{ld} , E_{rd}) y la altitud de este (E_{sc}), constituye un factor que indica la capacidad de incisión del cauce del río, frente a la capacidad de erosionar en los extremos laterales por medio de sí mismo o sus tributarios, lo cual

se ve reflejado en la geometría misma de la cuenca, e indirectamente en su grado de actividad o madurez.

Los valores cercanos a cero corresponden a procesos de incisión vertical sobre el cauce, presentándose valles encañonados de típica geometría en V, mientras que valores altos de V_f indican acciones erosivas hacia las márgenes y frentes de montañas adyacentes, generando un ensanchamiento del valle. Se observa que la cuenca media del río Herradura presenta predominancia de procesos de incisión, aun en las zonas donde se tiene registro de intensos y continuos eventos de depositación aluviotorrencial y fluvio-glacial, como se observa hacia el norte de la Hacienda Potreros. Sobre el cauce se identifican puntos muy locales, como la desembocadura de la quebrada San Ruperto y Santa Teresa, donde los procesos dominantes son la erosión lateral y ampliación de los valles, correspondientes a los picos de la Figura 4-c.

4.4.4. Índice longitud-gradiente del cauce del río (SL)

Este índice, propuesto por Hack (1973), busca identificar anomalías morfométricas a través de perfiles longitudinales de cualquier drenaje y su correlación con factores controladores como litología o tectónica presente en el área; este indicador se calcula a partir del producto del gradiente ($\Delta H/\Delta L$) de un tramo recto del río herradura tomado de la figura 4-a, por la longitud total del río entre el centro del intervalo de interés hasta la cabecera del drenaje (L). Según Keller y Pinter (2002) se trata de un índice especialmente sensible a los cambios existentes en la pendiente del canal y que intenta cuantificar la capacidad erosiva del río.

En la figura 4-d, se observan los valores de $SL_{Intervalo}/SL_{Total}$ entre 2 y 10, considerados como anómalos de segundo orden según la clasificación de Seeber & Gornitz, (1983), correspondientes al sector de Potreros y la zona norte del Pontón, los cuales implican aumento del gradiente en tramos cortos, probablemente debido a fenómenos tectónicos que inducen deformación y aumentan la intensidad de los regímenes de erosión.

4.4.6. Basculamiento de terrazas

Alzate (1995), realizó una descripción detallada de los depósitos que se encuentran entre la desembocadura de la quebrada Morrogacho y el sector de la Vuelta, según

su análisis en las secciones transversales es corriente encontrar terrazas aluviales y/o fluvio-glaciales a altitudes diferentes, en ambos márgenes del fondo o bien a un solo lado de ellas, estando la otra ausente, encontrando así zonas donde aparecen valles asimétricos como el valle recto de la quebrada Morrogacho, indicando intervención de procesos tectónicos como moldeadores de estas geoformas. Sobre ambos márgenes de la quebrada Herradura hacia el sector de Potreros y sobre la quebrada Nancuú, se encuentran diversos conjuntos de terrazas en las que se observan irregularidades respecto a la dirección de flujo y los ángulos de inclinación, estas características se resumen en la tabla 2.

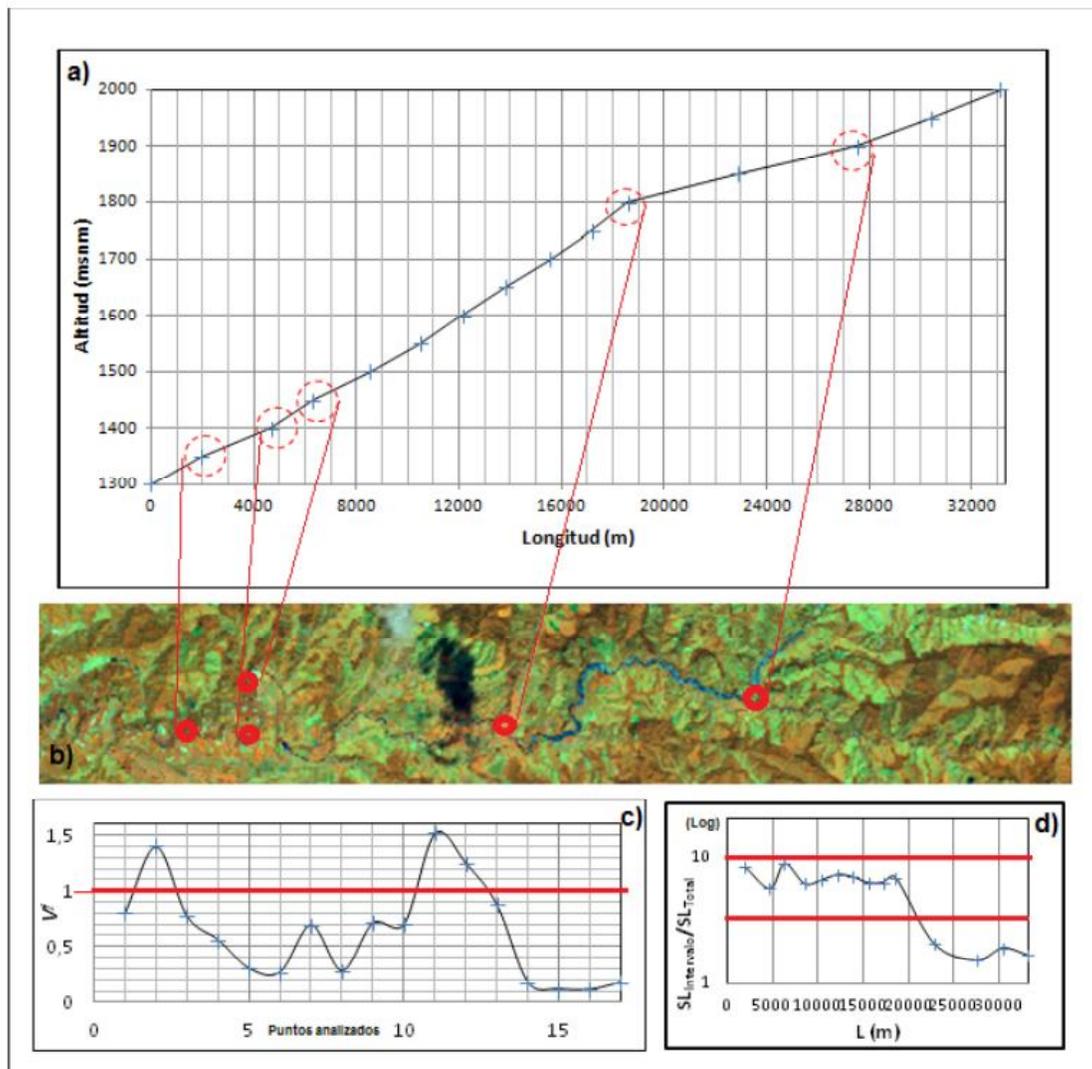


Figura 4. Representación de los indicadores morfométricos. a) Perfil longitudinal del río Herradura, nótese las variaciones en el gradiente; b) correspondencia entre los puntos anómalos en el perfil y el curso del río Herradura, c) Valores obtenidos para el índice V_f , d) Curva obtenida para el índice $SL_{Intervalo}/SL_{Total}$.

Tabla 2. Orientación de las terrazas y grado de basculamiento. (Modificado de Alzate, 1995).

Nombre	Ubicación	Orientación	Inclinación
Qf1	Giro de la quebrada Piedras	S 60° E	15°
Qf1, Qf3	Margen derecho Río Herradura – Qda. Morrogacho	NNW	3°
Qf2	Margen derecho Río Herradura – Qda. Morrogacho	Este	4°
-----	Margen izquierdo Qda. Morrogacho	Oeste	3° (?)
QfN1	Flujo de la quebrada Nancuí	N45° W	4°

4.4.7. Valles y depósitos colgados

Se identificaron dos valles colgados principales: i) En la margen izquierda de la quebrada Piedras justo sobre el giro forzado que hace hacia el sector de Potrerros, aparece una superficie plana hacia la cima (Figura 5-b) con fragmentos de litología diversa que asemeja a un antiguo flujo de

escombros; siguiendo hacia el norte por el antiguo valle aparecen escalonamientos y una vaguada bien definida sin flujo de agua; ii) al sur del caserío de Potrerros, en un área de menos de 500 m², elevada con respecto al río Herradura por más de 200 m, en este aparecen vestigios de corrientes que drenan al norte y que aún se conservan sin disectarse.

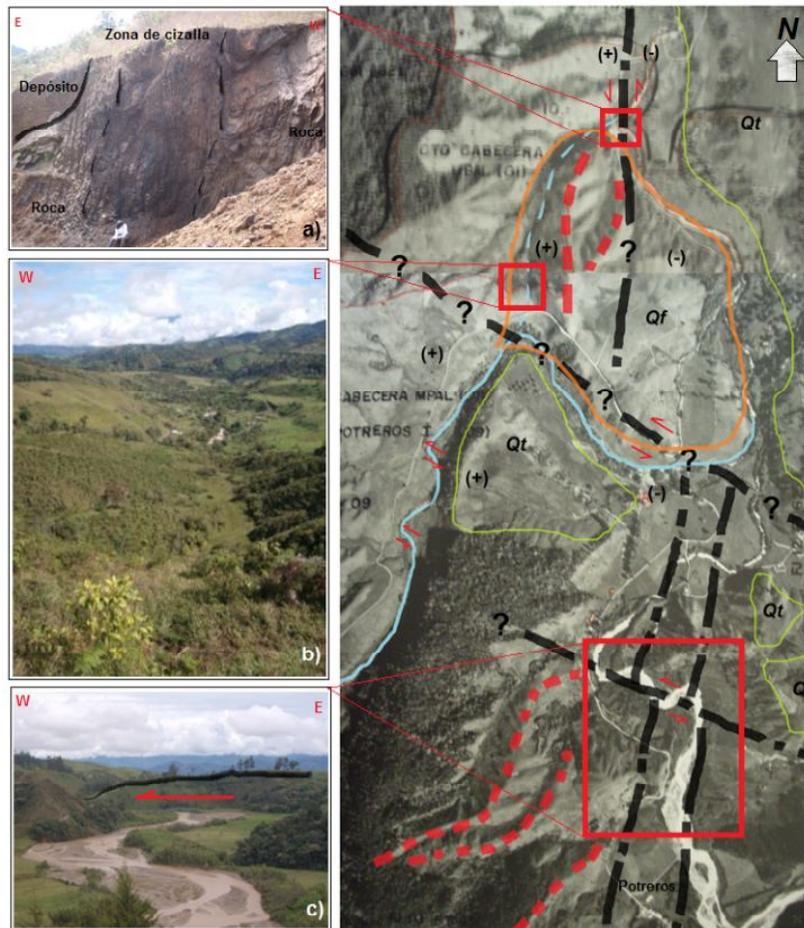


Figura 5. Caracteres morfotectónicos del sector de Potrerros. a) Zona de cizalla de orientación NS/subvertical perteneciente al sistema de fallas de San Ruperto, ubicado en la parte baja del flujo de lodos y escombros (Qf), el bloque W se levanta respecto al bloque E; b) Valle colgado el río Piedras, con orientación NNE y morfología escalonada; c) Vista de las cuchillas N70°W que interceptan y desplazan el río Herradura en sentido sinistral. Nótese que a pesar de dislocarse el río hacia el W, el basculamiento del sustrato induce la migración de las aguas hacia el E.

5. DISCUSIÓN

Un primer elemento que llama la atención como indicio de actividad tectónica reciente en la cuenca media del río Herradura, es el marcado contraste morfológico entre los sectores norte y sur. El sector norte se caracteriza por presentar una morfología amplia y larga, con distintos niveles de terrazas bien preservados, con un avance gradual del frente de meteorización que da lugar al desarrollo de saprolitos espesos que no permiten ver los macizos subyacentes, además del predominio de incisión del río; mientras

que en el sector sur las vertientes son más inclinadas y marcadas, los cañones más cerrados, con presencia de suelos saprolíticos reducidos y frecuentes movimientos en masa, además de la disminución de la capacidad de transporte del río, evidenciada en su morfología trezada con importantes volúmenes de sedimentos acumulados en el lecho. Este contraste morfológico entre tramos del valle de río Herradura parece corresponder a un proceso de levantamiento diferencial que actúa con mayor intensidad hacia el bloque sur, donde se cuelgan y disectan los depósitos previamente acumulados (Figura 6).

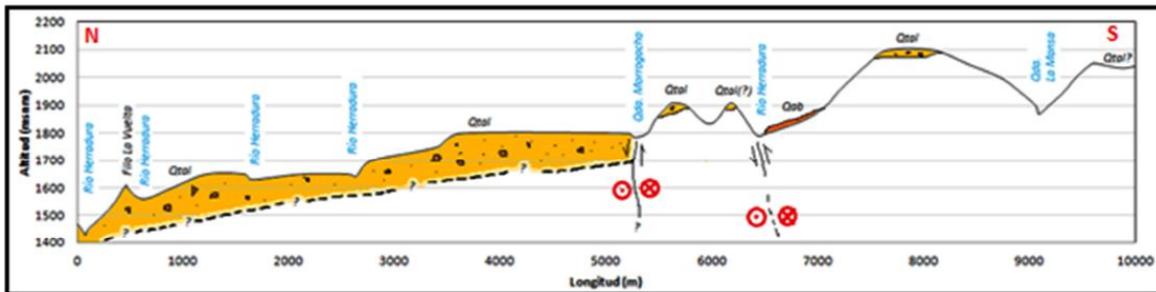


Figura 6. Perfil esquemático N-S, en el que se muestra el contraste en la disposición de las terrazas al norte y al sur del área de trabajo (*Qtal*). Nótese que el punto de contraste o transición está dominado por fallas de sentido sinistral con componente inversa, desplazando y levantando el sector sur a una tasa mayor en relación al sector norte, con subsecuente desarrollo de suelos saprolíticos de los depósitos hacia el norte, mientras al sur aparece disección y remoción de materiales por medio de movimientos en masa.

Un corte transversal de este sector, en el que aparecen terrazas basculadas de las quebradas Piedras y Morrogacho, hacia el E y el W respectivamente, muestra la presencia de fallas que por efectos compresivos provenientes del occidente y cizallantes provenientes del NNW, dislocan y deforman los bloques producto de la intersección de sistemas de fallas de sentido N-S y NW; se debe notar que hacia el oriente, sobre la cuchilla ubicada entre la quebrada Morrogacho al norte y el río Herradura al sur, los depósitos presentan escasos desarrollos y aparecen como relictos de terrazas colgadas (Figura 7).

La zona de transición se ubica hacia los alrededores del caserío de Potreritos. Estos contrastes morfológicos coinciden con: 1) cambios de pendiente del río Herradura, 2) dislocaciones sucesivas N60°W en sentido sinistral afectando el cauce del río Herradura, 3) filos alargados y alineados con este tramo del río, 4) lineamientos y controles tectónicos de los drenajes tributarios, 5) facetas triangulares y silletas dispuestas de manera colineal que se orientan según los sistemas de fallas; estos elementos constituyen los marcadores morfotectónicos más claros presentes en la zona.

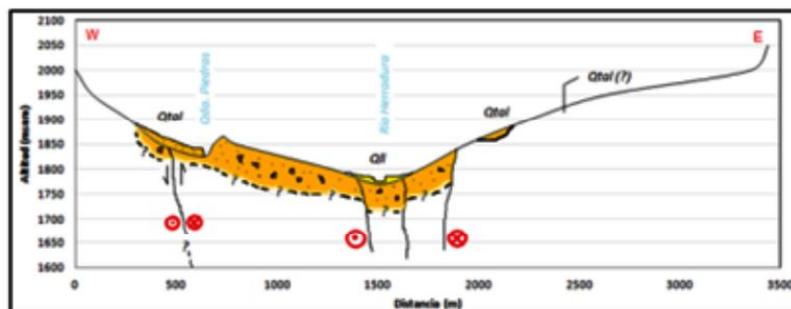


Figura 7. Perfil transversal del sector de Potreritos atravesando los depósitos basculados de las quebradas Piedras y Morrogacho. Nótese las variaciones en la presencia de depósitos hacia los dos bordes, además de los efectos tectónicos que los basculan.

La relación existente entre lineamientos, zonas de cizalla, control de la red de drenaje, facetas triangulares, cuchillas alineadas, escarpes, además de la distribución, ubicación y basculamiento de los depósitos constituyen indicios de actividad tectónica reciente. Vemos además que el índice V_f muestra predominio de incisión en una gran porción de la cuenca, exceptuando las zonas de confluencia de tributarios donde naturalmente el aporte de sedimentos implica una disminución de la capacidad de transporte del río. También el índice SL muestra variaciones importantes sobre el sector de Potreros con prolongación al norte, donde ocurre un aumento considerable del gradiente del río, probablemente inducido por el levantamiento del bloque inmediatamente al sur de este caserío. Finalmente los índices J indican predominancia de procesos tectónicos frente a fenómenos erosivos o denudativos. Los resultados de la aplicación de estos índices muestran valores que corresponden a actividad tectónica moderada.

Las fallas de orientación N-S, con movimientos sinistral que desplazan corrientes y controlan el cauce principal de la cuenca corresponden a estructuras reactivadas por el movimiento del bloque Panamá-Chocó y la placa Caribe hacia el SES colisionando con la placa suramericana que posee una tendencia a moverse hacia el NWN, lo que genera una inversión tectónica de estructuras heredadas, dinámica que se observa de manera similar en fallas como Uramita y el sistema Cauca-Romeral.

El régimen compresivo que ejerce la migración conjunta hacia el Este, de la placa de Nazca y el bloque Panamá-Chocó induce un fallamiento de sentido $N60-70^\circ W$ sobre latitudes mayores a $5^\circ N$, de sentido sinistral inverso el cual intercepta y desplaza las estructuras N-S además de inducir un acortamiento que se ve reflejado en el basculamiento de las terrazas y el levantamiento del valle. (Figura 8).

La identificación de fallas geológicas superficiales en el sector norte del área posee diversas dificultades, entre ellos la espesa cobertura de depósitos que impide obtener evidencias directas de su presencia; debido a esto, en este trabajo se infiere su continuidad en sentido N-S, siguiendo la tendencia que se observa en lugares donde aflora y basándose también en la deformación de depósitos hacia los alrededores del sector de La Vuelta y las quebradas Nancu y El Guamo, sin descartar que

allí su comportamiento sea completamente diferente, lo cual podría aclararse por medio de métodos geofísicos que podrían mostrar la naturaleza de la cizalla en profundidad y la relación depósito/basamento.

Los depósitos más representativos de la zona de trabajo, correspondientes a los flujos aluviotorrenciales de la quebrada Piedras y el depósito fluvio-glacial colgado del sector de Potreros, poseen fragmentos de hasta 80 cm de rocas graníticas pertenecientes a los cuerpos monzoníticos y dioríticos que afloran en la zona, a los cuales Botero (1975) les asigna una edad de 11 Ma por K/Ar, de manera que estos deben poseer edades máximas correspondientes al Mioceno superior-Plioceno. Sumado a esto, Alzate (1995), reporta la ocurrencia de cenizas volcánicas sobre las terrazas más altas ubicadas en cercanías de la quebrada Morrogacho con espesores de 0,25 m, las cuales han sido correlacionadas con las capas de ceniza producidas por los eventos volcánicos de la cordillera Central, con edades entre 4.3 y 1.3 Ma (Restrepo, 1991); por otro lado, Parra (1987) reporta ignimbritas y cenizas asociadas a eventos volcánicos de la caldera La Mosca en el páramo de Frontino, con edades que se prolongan hasta el Pleistoceno (entre 750 - 500 Ka). Aun no se tiene claro la procedencia de estos materiales volcánicos, y no se puede descartar una fuente asociada al vulcanismo Combia.

Según esto los flujos y depósitos que constituyen las terrazas, se estuvieron depositando de manera periódica entre el Plioceno – Pleistoceno y posterior a este, puesto que las terrazas más altas y por lo tanto más antiguas, están acotadas por dichas cenizas volcánicas, mientras que las más jóvenes no lo presentan. Si lo anterior se enmarca dentro del comportamiento climático al que estuvo sometido este sector de la cordillera occidental en el Pleistoceno-Holoceno propuesto por Parra (1995) y Velásquez, et al (1999), en el que se producen alternancias periódicas de los regímenes climáticos con variaciones en los volúmenes de agua que por fusión de los casquetes glaciares y subsecuente ablación, se introducen a los sistemas fluviales además de grandes cantidades de materiales como fragmentos de roca o escombros que finalmente constituyen los diversos flujos de lodos, escombros y depósitos aluviotorrenciales y fluvio-glaciares que se distribuyen en la región. De manera que puede estimarse una

edad de las terrazas correspondiente al Pleistoceno-Holoceno.

Hipótesis y futuros estudios. Con base en los resultados obtenidos en esta investigación se plantea que las estructuras asociadas al sistema de fallas de San Ruperto y otras estructuras menores como los lineamientos de Morrogacho, Potrerros, Santa Teresa y El Guamo, son responsables de la deformación de los depósitos recientes localizados en el área de estudio, de presunta edad cuaternaria. El desarrollo de cartografía a escala 1:5000, junto con levantamientos estratigráficos y topográficos detallados de las geofomas deformadas, además del uso de la geoelectrica como herramienta para identificar variaciones en la configuración del basamento, en cercanías al sector de Potrerros y sus alrededores, son claves para el entendimiento de la dinámica y evolución de los fenómenos tectónicos recientes para este sector del departamento.

6. CONCLUSIONES

La zona media de la cordillera occidental entre Frontino y Abriaquí corresponde a una región dominada por desplazamientos y levantamientos diferenciales que afectan los sistemas fluviales activos, tanto en su dinámica actual, como su registro sedimentológico reciente. Las evidencias más claras de estos fenómenos se encuentran sobre el sector de Potrerros, donde fallas de rumbo con orientación N60°W y NNE afectan el actual cauce del río Herradura; además, los actuales regímenes de esfuerzos derivados de la interacción de las placas Caribe, Nazca, el bloque Panamá-Chocó y el bloque andino coinciden con el desarrollo y comportamiento estructural de los sistemas de fallas N-S y N60°W ambas con componente sinistral inversa, los cuales son responsables de la deformación en los depósitos aluviales y fluvio-glaciales concentrados sobre las quebradas Morrogacho, Piedras y Nancuá

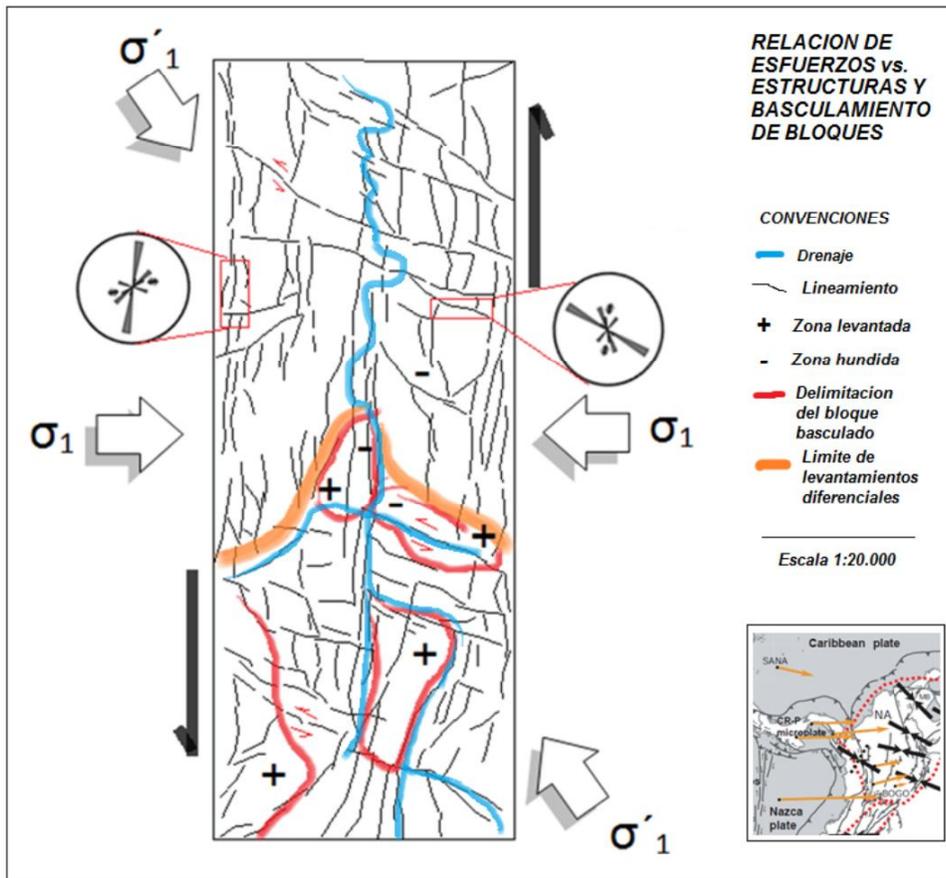


Figura 8. Relación de los sistemas de falla y los sistemas de esfuerzos regionales. σ_1 asociado al empuje de la placa de Nazca, generando fallas de orientación N60-70°W y movimiento sinistral-inverso; σ'_1 asociado al empuje del bloque Panamá-Chocó y la placa Caribe responsables del reactivamiento de los sistemas de fallas N-S con movimiento sinistral y componente inversa. (Localización en el contexto geodinámico inferior derecho modificado de Colmenares, 2003).

Se establece un escalonamiento de depósitos en tres niveles principales: el primero, y de menor altura corresponde al sector norte entre La Vuelta y la quebrada Morrogacho, el segundo, de altura media e intensa disección entre la quebrada Morrogacho y el caserío de Porteros y el tercero, de mayor altura, hacia el sector sur de potreros que se extiende hacia la vereda el Edén y los depósitos de la parte alta de la quebrada Piedras. A su vez, las diferencias en intensidad de avance de los frentes de meteorización y erosión entre los tres sectores definidos indican levantamientos recientes.

Otros sectores con indicios de actividad tectónica se localizan sobre la quebrada Nancuá, El Guamo y en la confluencia de la quebrada San Ruperto al río Herradura, estos no se consideraron con detalle puesto que el sector de Potreros muestra en orden de importancia, la mayor cantidad de indicios; dichos sitios quedan pendientes para la realización de posteriores estudios. Se identifican zonas con mayor potencial para estudios detallados en el futuro en: i) giro de la quebrada Piedras, ii) valle de la quebrada Morrogacho y iii) terrazas aluviales y llanura de inundación del caserío de Potreros.

BIBLIOGRAFÍA

- Álzate, M. 1995. Neotectónica de la Falla de San Ruperto – Municipio de Frontino. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Trabajo de Grado. 103 P.
- Botero, G. 1975. Edades radiométricas de algunos plutones colombianos. Medellín - Colombia. Revista Minera. Vol. 27, N° 169-178. 10 P.
- Bull, W. 2007. Tectonic Geomorphology of mountains: A new approach to paleoseismology. Blackwell publishing. Oxford, UK. pp. 117 - 164.
- Bull, W. & Mcfadden L. 1977. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In: Doehring D.O. (Ed.), Proceedings of Eighth Annual Geomorphology Symposium, Geomorphology in Arid Regions. State University of New York, Binghamton. pp. 115–138.
- Colmenares, L. & M. D. Zoback, 2003, Stress field and seismotectonics of northern South America, *Geology*, v. 31, pp. 721-724.
- CORPOURABA. 2008. Localización de los Municipios correspondiente a la Subregión Nutibara. [en línea]. [Consulta Noviembre 2011]. <http://www.corpouraba.gov.co>.
- González, H. 2002. Monzonita del Cerro Frontino. Catalogo de Unidades litoestratigráficas de Colombia. Comisión estratigráfica de Ingeominas. Bogotá DC – Colombia. 16 P.
- Hack, J. 1973. Stream profile analysis and stream gradient index. U.S. Geological Survey Journal Research Exploration, Athens, vol. 1, pp. 421–429.
- INGEOMINAS. 2001. Memoria explicativa del Mapa Geológico de Antioquia. Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear. Bogotá DC – Colombia. 241 P.
- Keller, E. & Pinter, N. 2002. Active tectonics: Earthquakes, uplift and landscape. Prentice Hall, Inc. Segunda edición. Upper Saddle River, N.J, 362 P
- Kellog, J. & Vega, V. 1995. Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: constrain for global positioning system geodetic studies and gravity. Geological society of America. Special Paper 295. 16 P.
- Kennan, L. & Pindell, J. 2009. Dextral shear, terrane accretion and basin formation in the Northern Andes: best explained by interaction with a Pacific-derived Caribbean Plate. The geology and evolution of the region between North and South America, Geological Society of London, Special Publication. 58 P.
- Mora, H. & López, S. 2011. El proyecto GEORED del INGEOMINAS: Instrumentación orientada a las investigaciones espaciales para el estudio de la dinámica terrestre en Colombia. XIV Congreso Latinoamericano de Geología. Medellín. pp. 150.
- Parra, N. 1987. El Vulcanismo Pleistoceno en la cuenca de Santa Fé de Antioquia: Formación El Llano. Memorias del Seminario ‘Gerardo Botero’ sobre la Geología de la cordillera Central de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pp. 135-151.
- Parra, N. 1995. Geología glacial del páramo de Frontino. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 44 P.
- Pulido, N. 2003. Seismotectonics of the northern Andes (Colombia) and the development of seismic networks. Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 2003 Special Edition. pp. 69-76.
- Restrepo, J. 1991. Datación de algunas cenizas volcánicas por el método de trazas de fisión. AGID Report N°16: Environmental Geology and Applied Geomorphology in Colombia. Universidad EAFIT. Medellín. pp. 147-157.

SCHEIDEGGER, E. 2004. *Morphotectonics*. Department of Geodesy and Geophysics. Springer. Vienna –Austria. 135 P.

Seeber, L. & Gornitz, V. 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, v. 92, pp. 335-367.

Toro-Ramirez, A. 2005. Esquema de subducción del Pacífico colombiano. Proyecto RG: levantamiento, compilación y generación de información Geodinámica. Ingeominas. Bogotá. pp. 105.

Vargas-Jimenez, C., Pujades, L., Ugalde, A. & Canas, J. 2002. Estado de deformación y esfuerzos en el territorio colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*. 26 (100). pp. 337-391.

Velasquez, C. et al. 1999. Tardiglacial y Holoceno del norte de la cordillera occidental de Colombia. Universidad Nacional de Colombia – Universidad de Antioquia – Instituto de ciencias Naturales. Medellín. 235 P.