

PROBLEMA GEOTÉCNICO DEL KM 6 DE LA AUTOPISTA MEDELLÍN-BOGOTÁ: ANTECEDENTES, CAUSAS Y SOLUCIONES ALTERNATIVAS

GEOTECHNICAL PROBLEM OF THE KM 6 ON THE MEDELLÍN-BOGOTÁ HIGHWAY: BACKGROUND, CAUSES AND ALTERNATIVE SOLUTIONS

WILMER GIRALDO RAMÍREZ

Est., Ingeniería Geológica, Universidad Nacional de Colombia. wegirald@gmail.com

OSWALDO ORDÓÑEZ CARMONA

PhD., Geólogo, Universidad Nacional de Colombia, oswaldo.geologo@gmail.com

Recibido para evaluación: 24 de Mayo de 2013 / Aceptación: 15 de Noviembre de 2013 / Recibida versión final: 02 de Diciembre de 2013

RESUMEN: En el kilómetro 6 de la Autopista Medellín-Bogotá se presenta un problema de descenso de la bancada, el cual se agudizó en los últimos 5 años y ha requerido una inversión de más de 30.000 millones de pesos en muros de contención, tensores, taludes, reubicación de la calzada y drenajes, sin lograr una solución definitiva al problema, tan solo dos meses después de la entrega de los últimos trabajos (Mayo de 2012) fue evidente la persistencia del problema geotécnico y el deterioro en las obras. El problema es agravado por movimientos en masa que han afectado comunidades, causando pérdidas materiales y conflictos legales entre el consorcio DEVIMED y la comunidad de la zona. Con base en fotointerpretación y trabajo de campo en geología y geomorfología, es posible identificar y delimitar la cicatriz de un antiguo y gran movimiento en masa. Este movimiento es reactivado por las fuertes lluvias presentadas en la zona, presentando reptación y deslizamientos más pequeños que afectan la vía y las construcciones aledañas. En tal sentido, se deben plantear mejores estudios geomorfológicos para la realización de construcciones en zonas de ladera del Valle de Aburrá y alternativas como viaductos y túneles para una solución definitiva al problema geotécnico en la vía pues las medidas tomadas hasta ahora han sido ineficaces.

Palabras Clave: Autopista Medellín-Bogotá, Geotecnia, Deslizamiento de tierra, DEVIMED, Kilómetro 6.

ABSTRACT: In the kilometer 6 of the Medellin-Bogota Highway is present a problem of descent of the bench, which is sharpened in the last 5 years and has required an investment of more than 30.000 million of Colombian pesos in retaining walls, tensors, slopes, relocation of the road and drainage, without reaching a final solution to the problem, just two months from delivery of the last works (May of 2012) was evident the persistence of the geotechnical problem and the deterioration in works. The problem is aggravated by landslides that have affected communities, caused material losses and legal conflicts between the consortium DEVIMED and the community in the zone. Based on photo interpretation and field work in geology and geomorphology, is possible to identify and delineate the scar of an ancient landslide. This landslide is reactivated by the heavy rains in the area, showing creeping and smaller landslides which affect the highway and surrounding buildings. In that sense, should be raised best geomorphological studies to perform constructions on slopes of the Aburrá valley and alternatives as viaducts and tunnels for a definitive solution to the geotechnical problem in the highway because the measures taken to date had been ineffective.

Key words: Medellin-Bogotá Highway, Geotecnic, Landslide, DEVIMED, Kilometer 6.

1. INTRODUCCIÓN

La autopista Medellín-Bogotá es una de las principales conexiones viales de Colombia, comunica por vía terrestre las dos principales ciudades de Colombia y tiene una longitud de 414 km (INVIAS, 2006). Desde Medellín hasta el municipio de Puerto Triunfo la autopista se encuentra bajo concesión del consorcio DEVIMED S.A.. En su primer peaje, a la altura del

municipio de Copacabana, la autopista presenta en sus 4 carriles un flujo diario de más de 13000 vehículos (13318 como promedio entre 2006 y 2009 (PROCOPAL S.A., 2009)) los cuales representan un recaudo promedio mensual de cinco mil millones de pesos.

Los primeros kilómetros de esta concesión atraviesan las laderas del valle de Aburrá, valle con un área de 1150 km² y una longitud de 65 km. Morfológicamente,

es una depresión con orientación surnorte de fondo plano, localizada en la parte alta de la cordillera Central, limitada por respaldos laterales muy inclinados en roca y cubiertos en la parte baja por flujos de lodos (Arias, 2003). Geológicamente el valle está compuesto por un basamento metamórfico permo-triasico (Restrepo & Toussaint, 1988), rocas ígneas ultrabásicas, una secuencia volcanosedimentaria, cuerpos graníticos intrusivos y depósitos de vertiente y aluviales. Los suelos en las laderas del valle son producto de la meteorización química en un ambiente tropical de estas rocas, estos suelos son frecuentemente cubiertos por flujos de lodos o escombros provenientes de las partes altas de la ladera, flujos constituidos por suelos limo-arcillosos de colores pardos con o sin fragmentos y bloques de rocas en distintos grados de meteorización.

El valle presenta una precipitación media anual de 1.431 mm con un comportamiento bimodal (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2010), las lluvias anuales son dominadas por el fenómeno de Oscilación del pacífico sur (el niño), generando años más lluviosos y más secos en ciclos de aproximadamente cuatro años. Debido a las altas precipitaciones son abundantes las aguas subterráneas que contribuyen al desarrollo de laderas inestables.

Un importante problema geotécnico para la autopista Medellín-Bogotá es un descenso en la bancada ubicado en el kilómetro 6, un kilómetro antes del peaje de Copacabana (Figura 1). Este lugar ha presentado evidencias de daños en la vía desde inicios del año 2008, daños que han evolucionado hasta convertirse en un problema crítico con un descenso en la banca de la autopista de más de 4 metros, afectando así el tránsito por dicho sector, generando cierres parciales por reparaciones y grandes inversiones monetarias para disminuir sus efectos pero sin poder lograr una solución definitiva a este.

Adicionalmente, en el mismo sector y ladera abajo del descenso en la bancada de la autopista se presentó un deslizamiento, el cual afectó varias propiedades y ha generado una disputa legal entre la comunidad y el consorcio DEVIMED, esto debido a que la comunidad afectada atribuye el deslizamiento al problema geotécnico en la vía y a una mala intervención de este por parte del consorcio.

Debido a la naturaleza privada del consorcio encargado del mantenimiento y reparación de la vía y los procesos legales adelantados por la comunidad, el problema no ha sido discutido en un ámbito académico y hacen muy difícil el acceso a información que permita dicha discusión. Para realizar esta se hace un estudio independiente y basado principalmente en lo observable en campo sobre las características de la zona, la naturaleza del problema geotécnico, los trabajos de mitigación realizados y las fallas que se presentaron en estos.

Nuestra discusión busca llegar a conclusiones que permitan esclarecer las causas del problema geotécnico y la relación de este con el deslizamiento que afecto la comunidad aledaña a la autopista, además, resaltar la necesidad de mejores estudios geotécnicos en un departamento montañoso como Antioquia y con gran cantidad de vías construidas y por construir para así evitar que problemas como este se repitan.

2. METODOLOGÍA

El primer paso para entender y delimitar el problema geotécnico fue una reconstrucción histórica de este, se buscó conocer desde cuando se presenta y como se ha manifestado a lo largo del tiempo. Para tal fin se consultaron 3 fuentes de información:

- Fotografías aéreas de las oficinas de Catastro Departamental de Antioquia y Catastro Municipal de Copacabana, se analizaron fotografías en el intervalo desde 1985 hasta el 2012, la mayoría de ellas son de los últimos 5 años pues es en este periodo de tiempo que se ha observado más claramente el problema y sus consecuencias en las obras civiles y privadas de la zona.
- Imágenes satelitales de multitemporales disponibles en Google Earth.
- Consultas con contratistas de DEVIMED, personas encargadas del mantenimiento de la vía y que participaron en las obras, por motivos de confidencialidad se mantendrán sus nombres en privado. También se tuvieron en cuenta los testimonios de los viajeros frecuentes de la autopista.

Como segundo paso se realizó trabajo de campo en la zona, este se realizó parte en época de verano y parte en época de invierno para poder comparar las condiciones del lugar, este trabajo se centró principalmente en:

- Observar los daños que ha causado el problema geotécnico, tanto en la autopista Medellín-Bogotá como en las distintas propiedades de la zona, analizar las obras actuales y los restos de las obras pasadas.
- Estudiar la geomorfología de la zona y los rasgos

de las laderas en la zona.

- Determinar las condiciones geotécnicas mediante la caracterización del macizo rocoso y el perfil de meteorización del lugar.

Para entender el problema geotécnico se analizaron cuidadosamente los factores que generan el problema, las soluciones que se adoptaron y la razón por la cual estas no han sido suficientes, adicionalmente, se analizan los costos de soluciones alternativas al problema.

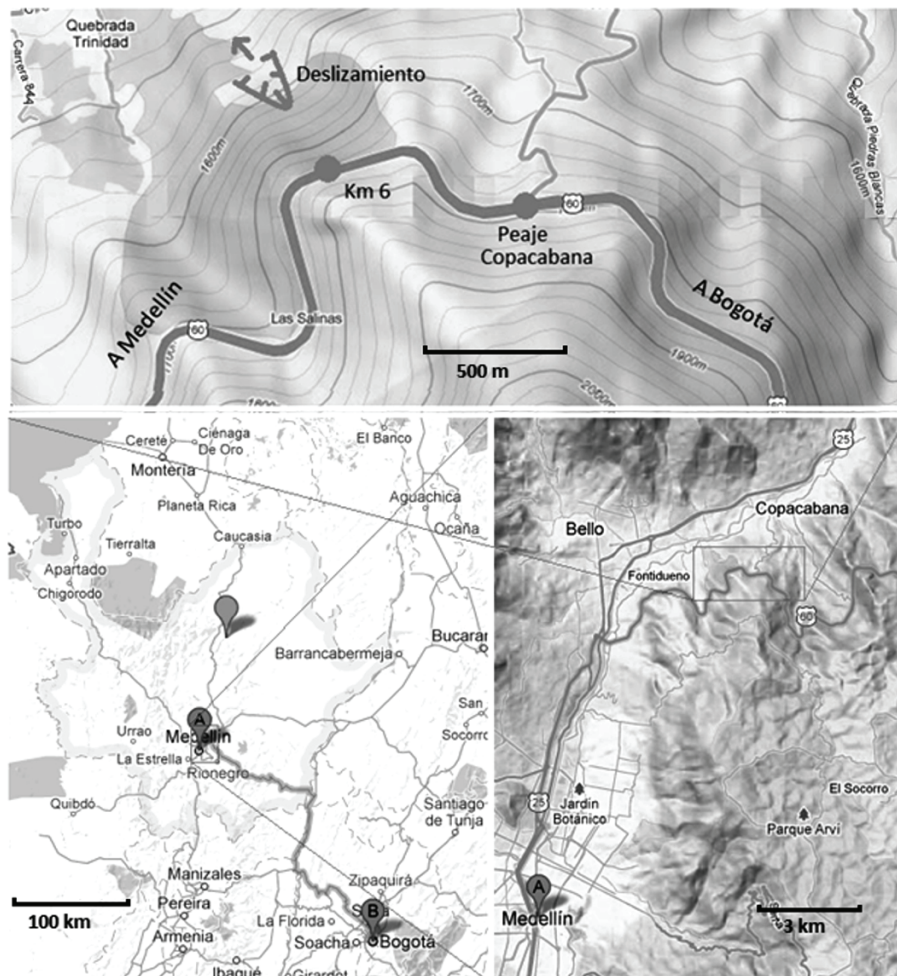


Figura 1: Ubicación del Km 6 en la autopista Medellín-Bogotá (Modificado de Google Maps).

3. EVOLUCIÓN DEL PROBLEMA

A principios del año 2008, accidentalmente y durante un trabajo de campo realizado con otro fin, fueron observadas algunas grietas en la zona superior de la parcelación “Loma de los Duque” y la zona aledaña. Debido a la ausencia de otras evidencias o reportes de inestabilidades en el área estas grietas no fueron analizadas.

Simultáneamente comenzó un lento pero continuo descenso en la banca de la autopista Medellín-Bogotá a la altura del Km 6 y por un tramo de aproximadamente 200 m. Este descenso se manifestó inicialmente como pequeñas grietas en la capa asfáltica, y para mediados del 2008 la banca de la autopista ya presentaba un descenso de aproximadamente 20 cm, este fue mitigado con pequeñas nivelaciones y repavimentaciones que

disminuían al mínimo los efectos del problema. Para mediados de 2009 se instalaron resaltos para reducir la velocidad de los vehículos que transitaban por el tramo afectado y se continuó con las repavimentaciones periódicas.

Para el 2010, el movimiento en la bancada continuaba y se hacía evidente que este movimiento en masa tenía una fuerte relación con las lluvias y la abundante presencia de aguas subterráneas en la zona. Debido a que los daños se manifiestan hasta esa fecha solo en la autopista, se creía que se trataba de un problema puntual y se decidió tomar pequeñas medidas para mitigar y controlar sus efectos sobre dicha estructura.

Inicialmente, se trató de controlar la infiltración de aguas lluvias en los suelos del tramo afectado, esto mediante la construcción de una capa de concreto reforzado con maya y un sistema de drenaje adicional en los taludes afectados, adicionalmente, se construye una línea de pilotes de concreto y acero, con diámetro de 1 m y una separación entre pilotes de 2 m. Estos se ubicaron a lo largo del borde inferior de la calzada para intentar detener su descenso.

Dos meses después se observó cómo estas medidas fueron insuficientes para controlar el descenso en la bancada, la cobertura de concreto fue totalmente destruida por el lavado del suelo bajo esta, esto debido a que el agua que afectaba la estabilidad del talud no era el agua superficial proveniente de las lluvias, si no las aguas subterráneas que se infiltraban por las diaclasas y fracturas del macizo, adicionalmente, los pilotes cedieron debido a que se apoyaban en materiales que también se estaban moviendo (hecho desconocido en ese momento).

Se dio inicio a una nueva etapa de soluciones, se intentó nuevamente controlar las infiltraciones de aguas en la parte superior e inferior de la calzada y se construyeron nuevas y mejores obras de contención para frenar el descenso de la bancada. Se construyó un muro de contención de concreto y acero reforzado, este fue cruzado por dos vigas de acero en “I”, amarradas con 76 anclajes pretensados a 150 toneladas y una profundidad de hasta 25 metros (Comunicación oral privada) (Figura 2).



Figura 2: Muro de contención, vigas de refuerzo y tensores en el Km 6 (Marzo del 2012).

Durante y después de la construcción de estas obras se presentó un fuerte aumento en las precipitaciones, esto debido a la presencia del fenómeno de la niña, generando un agravamiento en el problema geotécnico y de nuevo las obras realizadas se vieron incapaces de controlar el problema, el muro cedió, los tensores fueron rotos, el descenso continuó y aumentó su velocidad llegando a picos de hasta 5 cm en un día y

se alcanzó un descenso acumulado de la bancada de cerca de 3 m (Comunicación oral privada).

Durante la madrugada del 27 de abril del 2011, se presentó un deslizamiento que destruyó 10 casas en los sectores de la Loma de los García y la Loma de los Duque en el municipio de Copacabana (Duque, 2011). El deslizamiento se presentó en la parte media

de la ladera y las viviendas afectadas se encontraban justo abajo del problema del Km 6, esto dio lugar a una demanda por parte de la comunidad afectada contra el consorcio DEVIMED pues la comunidad atribuye a este la responsabilidad de lo ocurrido.

A 2012, la rasante tenía un descenso acumulado de 4 m, muestra contundentemente del fracaso de los correctivos adoptados hasta el momento, debido a esto se optó por nuevas obras que fueron finalizadas en el primer trimestre del 2012 con un costo aproximado de 30.000 millones de pesos Colombianos (Comunicación oral privada), estas obras fueron:

- Trasladar la calzada aproximadamente 10 m hacia la ladera, intentando fundar el nuevo trazado sobre terreno rocoso con la construcción de nuevos taludes y nuevas obras de contención para la banca.
- Instalar una nueva red de drenaje que capte en una zona más amplia y dirija las aguas a contrapendiente hacia una quebrada vecina, adicionalmente, se realizan obras de captación y canalización de aguas en la zona media de la ladera, zona donde se

originó el deslizamiento que afectó las viviendas en la zona baja.

4. RESULTADOS

Durante el trabajo de campo (2012) se analizó el estado de las últimas obras realizadas, fue evidente que estas no han podido solucionar definitivamente el problema geotécnico y se encuentran deterioradas después de tan solo 45 días de finalizadas. Se observan grietas y rupturas en la calzada y en las distintas obras de contención, hay movimientos de tierra y grietas de tensión en las masas de suelo que se encuentran en las partes altas de los taludes.

Algunas evidencias de reactivación de los movimientos son el desarrollo de grietas, con aperturas variables desde algunos mm hasta un par de cm, ubicadas en la zona asfaltada y los suelos próximos a esta. Las grietas se encuentran alineadas y presentan un patrón de media luna (Figura 3a), la zona encerrada estas se encuentra algunos centímetros por debajo de la zona fuera de ellas, lo que evidencia que el descenso de la bancada continua.



Figura 3: a) grietas que evidencian la reactivación del movimiento, vista desde arriba de parte de la calzada (Marzo del 2012). b) unidad de depósito de vertiente fresco (martillo geológico como escala).

La zona presenta manifestaciones de aguas subterráneas, estas se infiltran por las diaclasas y fracturas del macizo rocoso hacia la superficie de los taludes en roca y el interfaz suelo-roca, este flujo en la interface suelo-roca es el que afecta considerablemente la estabilidad de la zona. Las masas de suelos presentan una humedad

muy baja, consecuentemente, los drenajes instalados en este no cumplen función alguna y se encuentran secos.

Geológicamente se encuentran 4 unidades, estas son: macizo rocoso, depósito de vertiente meteorizado, depósito de vertiente fresco y depósito antrópico.

- El macizo rocoso compuesto por Anfibolita y Gneis aflora principalmente en los taludes realizados para la construcción de las calzadas, aunque estos presenten varias zonas de cizalla paralelas, varios sistemas de diaclasas y flujo de agua a través de estas, su condición geotécnica y geomecánica es muy buena pues estos sistemas presentan gran separación entre ellos y por su disposición geométrica no representan riesgo de inestabilidad. Al calcular los factores de seguridad de estos taludes se encuentran valores tan altos como 12, así, las zonas de autopista construidas sobre el macizo rocoso y los taludes en roca no presentan problemas de inestabilidad. Los perfiles de meteorización desarrollados sobre esta unidad son delgados, se trata de suelos limo-arcillosos producidos por meteorización química y de menos de 3 metros de espesor, presentan un horizonte orgánico de menos de 30 centímetros.
- La unidad de depósito de vertiente meteorizado se encuentra sobre el macizo rocoso y sus suelos derivados, esta unidad es clasto soportada, con bloques angulares de anfibolita completamente meteorizados, de tamaños promedios de unos 40 centímetros, con una matriz de suelo de color pardo verdoso muy blando, esta unidad se encuentra frecuentemente saturada de agua, principalmente cerca al contacto con el macizo rocoso.
- La unidad de depósito de vertiente frescos (Figura 3b) se encuentra estratigráficamente sobre la unidad de depósito

de vertiente meteorizado, esta es matriz soportada, con bloques angulares de Anfibolita y Gneis, de frescos a medianamente meteorizados, con un promedio de 20 centímetros, la matriz es de suelo medianamente duro, de color pardo rojizo y una humedad baja.

- El depósito antrópico se encuentra constituido principalmente por suelos y materiales de relleno transportados para la construcción de algunas secciones de la autopista, en la zona afectada.

Observando la geomorfología y las fotografías aéreas, es posible identificar en la ladera la geoforma característica de una gran cicatriz de deslizamiento (Figura 4), con una corona semicircular, la cual está solo algunos metros arriba de la calzada de la autopista. Los límites laterales descienden a lo largo de la parte alta y media de la ladera y se caracteriza por presentar escarpes de un par de metros. Adicionalmente, en la parte media y baja de esta cicatriz se observa el inicio de algunos drenajes, algunos secos y otros activos, los cuales se alinean frecuentemente con los límites laterales de la cicatriz.

Existe una clara relación espacial entre la cicatriz y los problemas geotécnicos actuales. Las grietas y los límites de la zona de la bancada descendente coinciden con la corona de la cicatriz, adicionalmente, los deslizamientos y reptación que han afectado las parcelaciones y la zona de la autopista se ubican siempre en el interior de esta cicatriz.

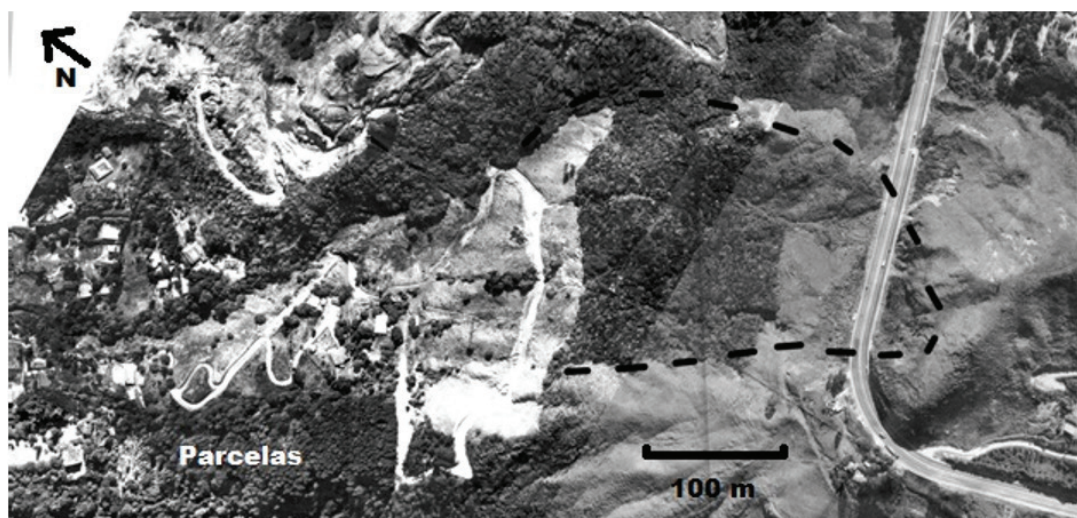


Figura 4: Mosaico de fotografías aéreas (2005) de la ladera afectada en la cual se muestra la autopista Medellín-Bogotá, la cicatriz de deslizamiento (resaltada en línea punteada) y las parcelaciones Loma de los García y Loma de los Duque en el municipio de Copacabana (Catastro municipal de Copacabana).

5. DISCUSIÓN

Las evidencias geológicas y geomorfológicas demuestran la existencia en el pasado de un gran deslizamiento, el cual afectó gran parte de la ladera y es el que controla las características geotécnicas actuales. Los problemas de estabilidad se ubican al interior de la cicatriz o de los depósitos de vertiente generados por dicho deslizamiento, esto permite inferir una relación entre el deslizamiento antiguo y los eventos de inestabilidad ocurridos recientemente.

Los problemas en esta cicatriz de deslizamiento y zonas aledañas son detonados por presencia de agua. Los deslizamientos, descensos de la banca y las reptaciones ocurrieron durante o inmediatamente después de fuertes periodos de lluvias. Los planos de deslizamiento actuales son la superficie heredada del paleo-deslizamiento, superficie saturada con agua.

Las aguas que detonan estos eventos son aguas subterráneas que afectan la masa de suelo desde abajo, aportadas por las fuertes lluvias que se infiltran desde la parte alta de la montaña, se transportan por las diaclasas y las fracturas en el macizo rocoso y afloran en el contacto suelo-roca para saturar los primeros metros de suelo y generar la inestabilidad. No se encontraron evidencias de que las aguas que afectan la estabilidad tengan alguna relación con la autopista Medellín-Bogotá o alguna de sus obras.

Los problemas generados, tanto en la Autopista como en las parcelaciones ubicadas en la parte baja de la montaña, se pudieron prever o identificar al momento de la construcción de la Autopista con un trabajo geológico y geomorfológico detallado, seguramente se hubiese detectado la clara cicatriz presente en la ladera y se consideraría como este proceso podría afectar la estructura vial. Actualmente y bajo reglamentaciones como la NSR-10 (CAPRCSR, 2010) y la Norma para la Intervención de Laderas (Caballero, et al., 2012), estos estudios son obligatorios para realizar la construcción de parcelaciones como las afectadas, estos podrían haber identificado la cicatriz y considerado los problemas que este fenómeno podría traer a las construcciones civiles en la zona.

Debido a las características de la zona inestable se debe evitar la construcción de viviendas y obras civiles en

esta, un estudio geotécnico recomendaría no intervenir las laderas y buscar alternativas para la construcción de las obras proyectadas. En el caso de la Autopista se deberían considerar alternativas como la construcción de un viaducto o un túnel que permitiera eludir el problema.

Desafortunadamente las obras en la vía y zonas adyacentes no han garantizado la estabilidad de taludes y difícilmente garantizaran la estabilidad de la rasante en el futuro. La ingeniería civil colombiana deberá reorientarse y modernizarse para hacer estudios geológicos aplicados, que le permitan entender los problemas como camino a plantear la solución más acertada en cada caso.

6. SOLUCIONES ALTERNATIVAS

Para calcular los costos de este problema geotécnico se debe tener en cuenta que entre 2011 y 2012 se invirtieron cerca de 30.000 millones de pesos en las obras realizadas, a esto debe de ser sumado al dinero invertido en reparaciones anteriores (monto no especificado), los dineros no percibidos por concepto de peajes, las pérdidas económicas y los sobrecostos debido a los cierres temporales por reparaciones parciales y el aumento en los tiempos de desplazamiento para los vehículos de pasajeros y carga que circulan diariamente por la vía.

Si desde el inicio el problema geotécnico se hubiese entendido, las obras se habrían concentrado en buscar una solución definitiva. Algunas alternativas pudieron ser:

- Reubicación de la calzada: esta fue la opción que finalmente se adoptó pero la calzada no fue desplazada lo suficiente, pues, aunque el problema disminuyó su magnitud y el segmento de la calzada que ahora se encuentra afectado es muchísimo menor, el problema aun persiste y continua afectándola y generando problemas.
- Construcción de un viaducto: esta opción fue considerada y se intentó pero la construcción de las pilas para fundar el puente debía atravesar la masa que se desplaza, esto generó un aumento en el descenso de la bancada y su construcción fue interrumpida. Un viaducto para solucionar este

problema debe fundarse sobre terrenos estables, esto se conseguiría con aproximadamente 150 metros de luz, distancia existente entre los macizos rocosos aflorantes y en buen estado, ubicados a lado y lado de la zona inestable.

- Construcción de un túnel: las condiciones del macizo rocoso en la zona son bastante buenas, eso hace posible la construcción de un túnel en la zona con buenas condiciones y una inversión sostenible.

Sobre esta última posibilidad se analizó la configuración de la vía y se pueden observar distintos trazados que incluyan túneles y eviten el problema de estabilidad

presentado en el Kilómetro 6; una muy buena opción consiste en desarrollar un túnel de aproximadamente 650 metros (Figura 5).

Este trazado atraviesa por un macizo rocoso con fracturas de baja densidad, poca persistencia y buena disposición de sus discontinuidades estructurales respecto al túnel (Figura 5b), lo que preliminarmente permite calificar el macizo con buenas condiciones geomecánicas. El túnel sugerido (de 4 carriles) tendría una pendiente máxima del 5%. La experiencia de los autores indica un precio promedio de 380 millones de pesos por metro avanzado para un túnel de estas características, así, para un túnel de 650 metros se estima un costo de 247.000 millones de pesos.

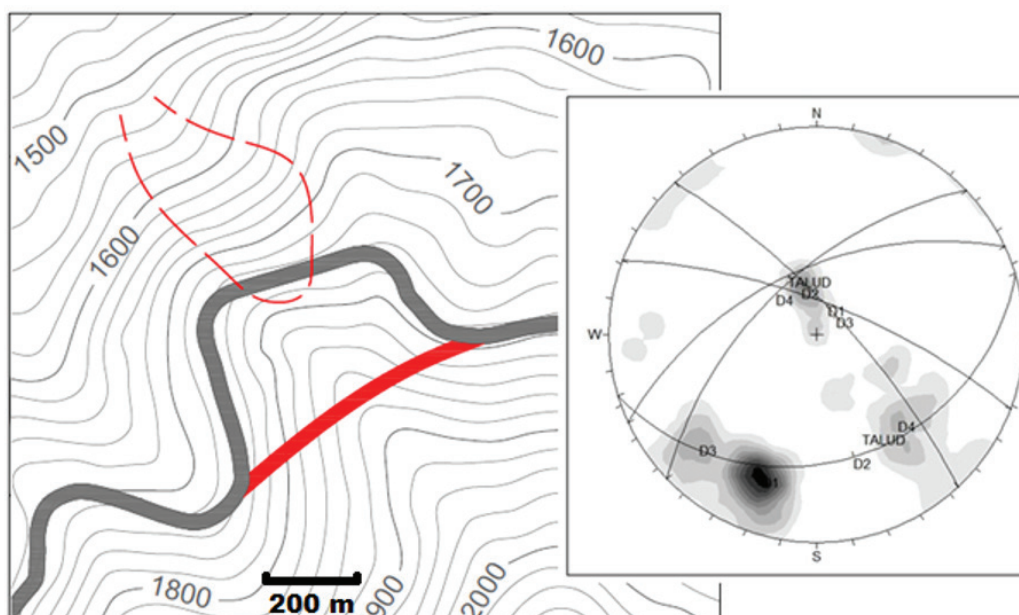


Figura 5: trazado del túnel propuesto con respecto a la actual configuración de la autopista y disposición de las discontinuidades en el macizo rocoso que cortara el túnel. Ambas figuras se encuentran alineadas respecto al Norte.

7. CONCLUSIONES

Los problemas geotécnicos que actualmente se presentan en la zona del kilómetro 6 de la autopista Medellín-Bogotá y las parcelaciones de la Loma de los Duque y los García se debe a la reactivación de un deslizamiento antiguo, esta reactivación es detonada por la infiltración de aguas subterráneas que llegan a la base de la masa de suelo a través de las diaclasas y fracturas en el macizo rocoso.

No existen evidencias geológicas que responsabilicen al consorcio DEVIMED por el deslizamiento ocurrido

en abril del 2011 en las parcelaciones de la Loma de los Duque y los García, las evidencias indican que el factor detonante para esta evento fueron las fuertes lluvias asociadas a condiciones preexistentes que hacían a la ladera más propensa a deslizamientos.

Las características del problema geológico no fueron estudiadas y entendidas correctamente, esto llevó a malas decisiones en lo referente a las medidas para la solución del problema. De entender correctamente el problema se habría optado por buscar soluciones, que aunque mucho más costosas, podrían dar fin al problema que afecta la vía.

En la actualidad el problema geotécnico en la autopista Medellín-Bogotá está sin solución, el descenso de la bancada continua y a pesar de las grandes inversiones realizadas no se observa una solución definitiva en un futuro cercano.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 2010. Atlas Metropolitano, Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- [2] 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.
- [3] Caballero, H., Montoya, J. D., Mesa, M. I., Rendón, A., Hincapié, J. G., Rendón, D. A., y otros. 2012. Metodología para la Elaboración de Estudios Geológicos y Geomorfológicos Asociados a la Intervención de Laderas en el Valle de Aburrá. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT, Universidad de Medellín, Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- [4] Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sísmo Resistentes. 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sísmo Resistente. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- [5] Duque, J. G. 28 de 04 de 2011. La loma de Los Duque se vino abajo y siembra temor. El Colombiano.
- [6] Google Earth. 2013. Google Earth. Recuperado el 26 de 11 de 2013, de earth.google.es/
- [7] Google Maps. 2013. Google Maps. Recuperado el 26 de 11 de 2013, de maps.google.es/
- [8] Instituto Nacional de Vías INVIAS. 2006. Red Vial Nacional. Recuperado el 22 de 11 de 2013, de http://www.invias.gov.co/images/mapas/mapa_colombia_descargar.jpg
- [9] PROCOPAL S.A. 2009. Plan de Manejo de Tránsito Doble Calzada Medellín-Bogotá (K 0+600 – K01+200).
- [10] Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. 1988. Terranes and Continental Accretion in the Colombian Andes. *Episodes*, 11, pp. 189 - 193.