



Excavación y sostenimiento en una terraza aluvial

Excavation and support on an alluvial terrace

JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI GIL¹ - JOHAN CAMILO GARZÓN CUBIDES²

1. Ingeniero Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7809-3255>.

2. Magíster en Geotecnia. Ing. Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4048-8942>.

jose.amortegui@escuelaing.edu.co - johan.garzon-cu@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/02/2025 Aceptado: 31/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se analiza una intervención de excavación y sostenimiento desarrollada en una terraza aluvial, caracterizada por condiciones geotécnicas complejas, asociadas a materiales heterogéneos y actividad tectónica reciente. A partir de la descripción del proyecto y de la investigación del subsuelo, se evalúan los criterios de diseño y las estrategias de contención adoptadas para garantizar la estabilidad del terreno y el control de deformaciones durante las etapas constructivas. En el estudio se incorporan análisis de estabilidad y consideraciones sobre la secuencia de excavación, el drenaje y el manejo de cargas, y se resalta la influencia de la génesis del depósito aluvial en la respuesta del sistema suelo-estructura. Los resultados obtenidos y las observaciones hechas permiten identificar aspectos críticos para el diseño y la ejecución de excavaciones en este tipo de contextos geológicos, aportando recomendaciones prácticas, orientadas a la reducción de riesgos y al desempeño seguro de las obras.

Este artículo constituye un aporte técnico basado en experiencia aplicada, relevante para proyectos desarrollados en terrenos aluviales.

Palabras claves: terraza aluvial, excavación y sostenimiento, estabilidad de taludes, contención del terreno, ingeniería geotécnica.

Abstract

This article analyzes an excavation and shoring project carried out on an alluvial terrace characterized by complex geotechnical conditions associated with heterogeneous materials and the effects of recent tectonic activity. Based on the project description and subsoil investigation, the design criteria and containment strategies adopted to ensure ground stability and deformation control during the different construction stages are evaluated. The study incorporates stability analyses and considerations regarding the excavation sequence, drainage, and load management, highlighting the influence of the alluvial deposit's genesis on the soil-structure system's response. The results

and observations obtained allow the identification of critical aspects for the design and execution of excavations in this type of geological context, providing practical recommendations aimed at risk reduction and safe performance of the works.

The work constitutes a technical contribution based on applied experience, relevant to projects developed on alluvial terrain.

Keywords: alluvial terrace, excavation and support, slope stability, soil retention, geotechnical engineering.

INTRODUCCIÓN

La ejecución de una excavación modifica el estado inicial de esfuerzos del terreno, induciendo deformaciones que, en el caso de taludes, suelen ser más significativas en la dirección horizontal; cuando estos cambios superan la resistencia del material, se producen fenómenos de falla o deslizamiento. Las estructuras de contención tienen como objetivo restituir el equilibrio de esfuerzos y limitar las deformaciones, ya sea controlando los esfuerzos inducidos o incrementando la resistencia y la rigidez del terreno.

Para el análisis de estabilidad es fundamental conocer el estado inicial de esfuerzos, el cual depende de la génesis del terreno y de su historia tectónica. Los materiales geológicos pueden corresponder a roca, suelo o estados transicionales, con orígenes ígneos, sedimentarios o metamórficos. La meteorización de las rocas da lugar

a suelos residuales que suelen conservar rasgos estructurales heredados, los cuales influyen directamente en su respuesta mecánica.

Los suelos transportados se originan por procesos gravitacionales, glaciares, eólicos o fluviales, cada uno de los cuales genera depósitos con características geotécnicas particulares. En ambientes tectónicamente activos, los esfuerzos asociados a la deformación cortical se superponen a los gravitacionales, produciendo fracturas y pliegues que pueden persistir incluso en suelos residuales; en contraste, en materiales sedimentarios predominan los esfuerzos de origen gravitacional.

En los depósitos transportados es común la orientación preferencial de partículas, controlada por la dirección y la energía del medio de transporte, mientras que en los depósitos glaciares hay una alta compactación y una marcada heterogeneidad granulométrica, sin clasificación por tamaños; por el contrario, los depósitos aluviales muestran una diferenciación granulométrica progresiva, con disminución del tamaño y mayor redondeamiento de partículas en la dirección del flujo, además de una disposición estratificada asociada al régimen hidráulico.

La dinámica fluvial genera una alternancia de materiales gruesos en los cauces y sedimentos finos en las zonas de desbordamiento, lo que produce estratigrafías complejas con capas de distinta composición y resistencia. Esta heterogeneidad se ve reforzada por la migración lateral de los cauces, la formación de paleosuelos y la presencia de huellas de múltiples eventos de sedimentación, lo cual condiciona de manera significativa el comportamiento geotécnico del terreno.

Los abanicos aluviales, típicos de zonas de piedemonte, se forman por la pérdida de energía del flujo al cambiar la pendiente, lo que da lugar a depósitos mal clasificados y a cauces trenzados que migran lateralmente. Procesos posteriores de incisión pueden exponer estos depósitos y generar terrazas aluviales, aumentando la complejidad estratigráfica y la variabilidad mecánica del suelo.

En zonas de muy baja pendiente se desarrollan cauces meándricos y depósitos de margen, en los que predominan sedimentos finos y orgánicos de baja resistencia. La inestabilidad de las márgenes, el gradiente hidráulico y la erosión diferencial favorecen deslizamientos locales y la formación de complejos de orillares, así como cuerpos aislados de agua (“madres viejas”),

asociados a suelos blandos, altamente deformables y fácilmente erosionables.

Por último, en ambientes lacustres y pantanosos se depositan sedimentos finos mezclados con materia orgánica, que producen capas de composición variable y baja capacidad portante. Los depósitos eólicos, por su parte, se caracterizan por su alta porosidad y la preservación de formas dunares, lo que también condiciona su respuesta frente a excavaciones.

INTRODUCTION

Excavation alters the initial stress state of the ground, inducing deformations that, in the case of slopes, are usually more significant in the horizontal direction. When these changes exceed the strength of the material, failure or sliding phenomena occur. Retaining structures aim to restore the stress balance and limit deformations either by controlling the induced stresses or by increasing the strength and stiffness of the soil.

For stability analysis, it is essential to know the initial stress state, which depends on the genesis of the soil and its tectonic history. Geological materials may occur as rock, soil, or transitional states, with igneous, sedimentary, or metamorphic origins. Weathering of rocks produces residual soils that often retain inherited structural features, which directly influence their mechanical response.

Transported soils originate from gravitational, glacial, aeolian, or fluvial processes, each generating deposits with geotechnical characteristics. In tectonically active environments, stresses associated with crustal deformation overlap with gravitational stresses, producing fractures and folds that may persist even in residual soils. In contrast, gravitational stresses predominate in sedimentary materials.

In transported deposits, preferential particle orientation is common and is controlled by the direction and energy of the transport medium. In glacial deposits, high compaction and marked granulometric heterogeneity are typical, generally without clear particle-size classification. In contrast, alluvial deposits show progressive grain-size differentiation, with decreasing particle size and greater rounding in the direction of flow, as well as a stratified arrangement associated with the hydraulic regime.

River dynamics generate alternating deposits of coarse materials in channels and fine sediments in overflow areas, producing complex stratigraphies with layers of different composition and strength. This heterogeneity is reinforced by lateral channel migration, the formation of paleosols, and the presence of traces of multiple sedimentation events, all of which significantly influence the geotechnical behavior of the ground.

Alluvial fans, typical of piedmont areas, are formed when flow energy decreases due to slope changes, resulting in poorly sorted deposits and braided channels that migrate laterally. Subsequent incision processes may expose these deposits and generate alluvial terraces, increasing the stratigraphic complexity and mechanical variability of the soil.

In areas with very gentle slopes, meandering channels and floodplain deposits develop, dominated by fine organic sediments with low strength. Bank instability, hydraulic gradients, and differential erosion favor local landslides and the formation of riverbank complexes, as well as isolated water bodies (“oxbow lakes”), associated with soft, highly deformable, and easily erodible soils.

Finally, in lacustrine and marsh environments, fine sediments mixed with organic matter are deposited, forming layers of variable composition and low bearing capacity. Aeolian deposits, in contrast, are characterized by high porosity and the preservation of dune structures, which also influence their response to excavation.

DESCRIPCIÓN

En un sector del piedemonte llanero se tiene la intersección entre una tubería de transporte de hidrocarburos de 24” de diámetro, calidad API 5L X70 y 0,562” de espesor, y el proyecto de una vía de 14 m de ancho de banca. En el sitio de cruce el tubo asciende por una loma alargada, enterrado a cerca de dos metros de profundidad; la rasante de la vía, de 14 m de ancho de banca, se proyecta unos 20 a 35 m bajo el tubo. El ascenso del tubo se hace por el flanco oriental de la terraza, el cual muestra huellas de erosión intensa.

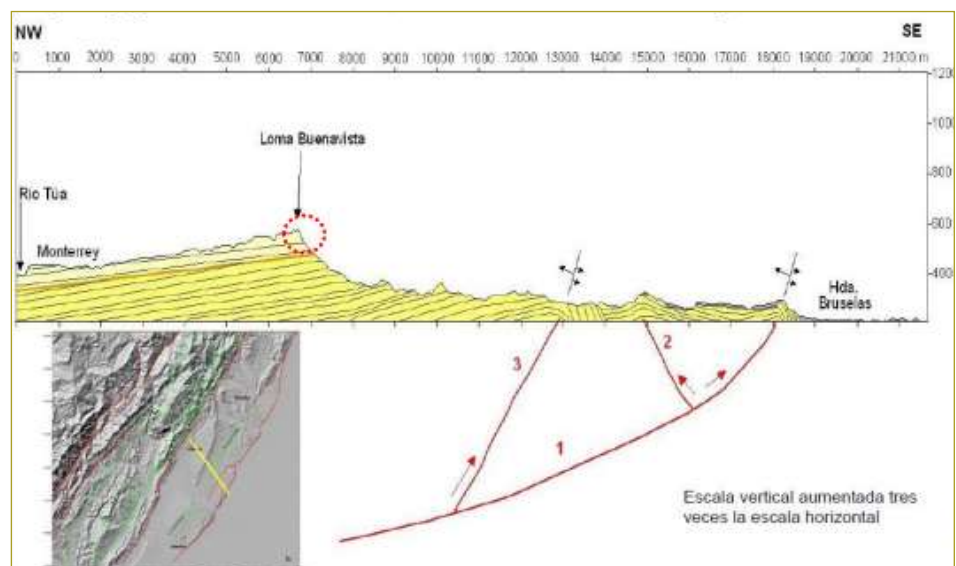
El terreno está conformado por una terraza de más de 150 m de espesor, proveniente de abanicos aluviales formados a comienzos del Cuaternario (Pleistoceno), compuesta por bloques y gravas redondeados, entrabados y de tamaño variable, entre 1 y 30 cm, así como arenas. En el sector de estudio, en los cortes de la antigua vía este material soporta taludes de hasta 50 m de altura con inclinación de 60° a 70°, respecto a la horizontal. Sin embargo, este depósito es vulnerable a la erosión y son frecuentes las cárcavas profundas, con paredes verticales. En general, las partículas que conforman el depósito aluvial están orientadas con la dimensión mayor hacia el oriente; además, por efecto tectónico la terraza se encuentra basculada entre 5 y 10° hacia el occidente.

Bajo la terraza se encuentran rocas arcillosas de la formación Caja, de edad terciaria, con buzamiento hacia el occidente.

A continuación, se muestra el corte geológico (figura 1).

Figura 1. Corte geológico en el que se muestran el perfil del terreno y la conformación litológica y estructural del sector

Fuente: Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010). *Neotectónica del piedemonte llanero entre los municipios de Tauramena, Monterrey y Villanueva (Casanare).*



Nota: En el círculo se aprecia el sitio de la intersección entre los sistemas de transporte vial y por ducto. Para la intersección entre los dos sistemas de transporte, se plantearon inicialmente algunas opciones:

- Un túnel para la vía, pero por el tipo de material y la poca profundidad no se consideró seguro para el tubo.
- Un realineamiento del tubo por terrenos al norte, mediante una variante. Esto impone sacar de funcionamiento el transporte de hidrocarburos, mientras se corta el tubo y se une a la variante.
- Reinstalar el tubo por el mismo alineamiento mediante una perforación dirigida por debajo del nivel de la banca proyectada de la vía. La perforación por estos materiales aluviales es compleja y con una alta posibilidad de que no se pueda culminar, aparte de que se requiere sacar de funcionamiento el transporte de hidrocarburos mientras se corta el tubo y se une al cruce dirigido.
- Soportar el tubo temporalmente con una estructura colgante mientras se hace la excavación en cajón para la vía; luego se construye una estructura en concreto reforzado para el paso de la vía y que soporte el material de reconformación; finalmente, se restaura el terreno del derecho de vía del tubo. Con esta opción, no es necesario interrumpir el transporte de hidrocarburos ni utilizar más tubería.

Después de analizar las opciones, se optó por construir una estructura de soporte con dos torres, cables y pendolones, cimentando las torres con *caisson* por fuera

del chaflán del corte en cajón para la vía y los anclajes de los cables también con *caisson*.

Para el paso de la vía se utilizará un cajón de concreto reforzado, sobre el que se colocará el relleno compactado para restituir el derecho de vía del sistema de transporte de hidrocarburos. Este relleno se contendrá lateralmente con tierra armada, de modo que se logre el ancho de 20 m.

En las figuras siguientes (figuras 2 y 3) se muestra la disposición de las estructuras de soporte del ducto y de la excavación para la construcción de la vía vehicular.

En razón del potencial de erosión del material del depósito aluvial, a medida que se hace el corte se cubre la superficie del talud con malla y concreto lanzado y se instalan algunos anclajes en la parte superior, con miras a mantener confinado el terreno de apoyo de la torre del cortado occidental.

INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO

Para caracterizar los materiales del depósito aluvial, se consultaron en principio mapas e informes geológicos y geomorfológicos, principalmente en el Servicio Geológico Colombiano (SGC), así como también informes de consultoría del trazado, construcción y mantenimiento de los sistemas de transporte que se han instalado en este terreno, al igual que de los estudios geotécnicos hechos para la construcción de la vía.

Esta información se complementó con el reconocimiento directo de taludes de las vías existentes en este depósito y de los que se estaban construyendo para el proyecto vial. Además, se midieron el ángulo de incli-

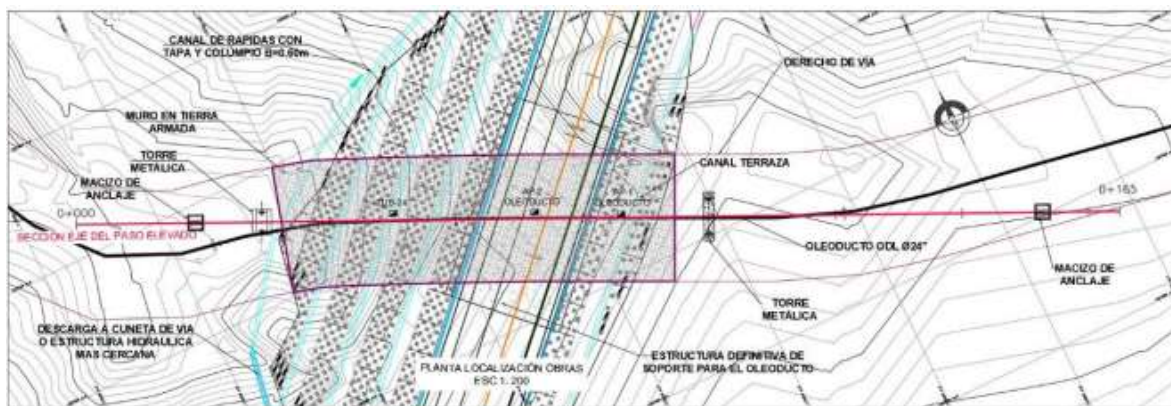


Figura 2. Disposición en planta del sistema de apoyos del ducto y del paso de la carretera

Fuente: Elaboración propia.

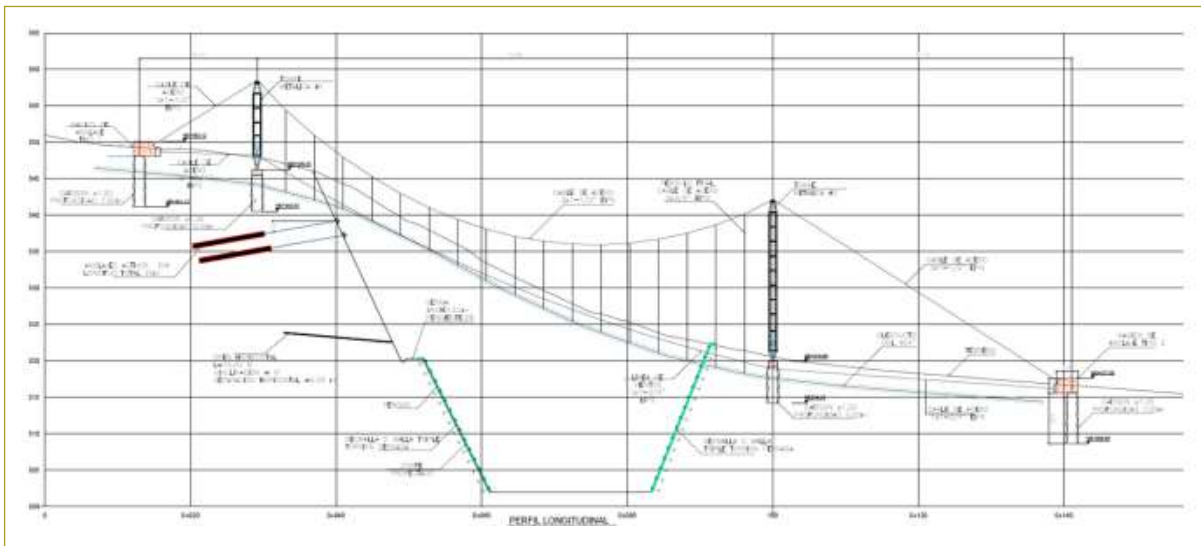


Figura 3. Perfil de la intersección por el eje del ducto.

Fuente: Elaboración propia.

nación y la altura de varios taludes en el sector vecino al sitio de la intersección y se encontraron taludes de inclinación variable entre 65° y 75° , incluso algunos con inclinación negativa (más de 90°). La altura de los taludes observados varía entre 5 m y 50 m (figura 4).



Figura 4. Talud en el DV del ducto.

Fuente: Elaboración propia.

Llama la atención la composición del depósito aluvial en el sector: arenas, gravas y bloques redondeados sin ningún cementante, con algunas intercalaciones o bolsas de materiales limoarenosos. Es decir, solo material granular. Sin embargo, se mantienen estables los taludes y laderas empinados y altos; en aquellos en los que se observó alguna cobertura vegetal, los procesos de erosión estaban controlados (figura 5).

Es posible observar en los afloramientos la trabazón entre los bloques que forman el depósito aluvial.

Se hizo el ejercicio de trazar líneas por entre el depósito granular para estimar la posible dilatancia que se pueda presentar mediante los desvíos a una línea recta, y se complementó con el trazo de posibles trayectorias y su desviación (figura 5). Se encontraron desviaciones entre 25° y 45° .



Figura 5. Disposición de partículas del depósito aluvial

Fuente: Elaboración propia.

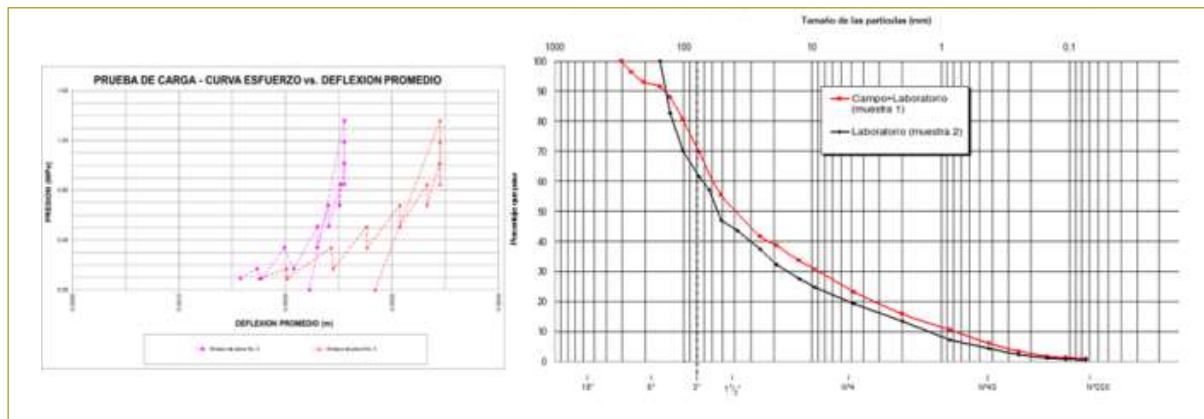


Figura 6. Resultado de ensayos de carga con placa y gradación.

Fuente: Elaboración propia.

Se contó con resultados de gradación y de pruebas de carga vertical en el depósito aluvial, los cuales se muestran más adelante (figura 6).

Con base en los resultados de ensayos de corte directo sobre el material de la matriz limoarenosa, se obtiene un ángulo de fricción de 45° y cohesión efectiva de 60 KPa.

Se verificó el aporte de la dilatancia mediante retroanálisis de estabilidad de los taludes de los cortes del derecho de vía del ducto que tienen una altura superior a 15 m y una inclinación de 65° a 75° .

Se efectuaron pruebas de geofísica MASW, con las que se obtuvieron módulos de deformación a bajas deformaciones. A renglón seguido, se señala el perfil del subsuelo obtenido con la geofísica (figura 7), y

más adelante se muestran (figura 10, parte derecha) los resultados de las pruebas MASW.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Se hicieron los análisis de estabilidad y deformación según el criterio de Mohr-Coulomb con envolvente de falla ligeramente parabólica, con base en la caracterización del terreno y la disposición del proyecto (figura 9).

El modelo de análisis y las curvas de módulo de elasticidad obtenidas de las pruebas de geofísica y de la prueba de carga directa con placa se pueden ver más adelante (figura 10). Para la realización de los análisis de estabilidad se modelaron el depósito aluvial y el proceso de construcción por etapas, así:

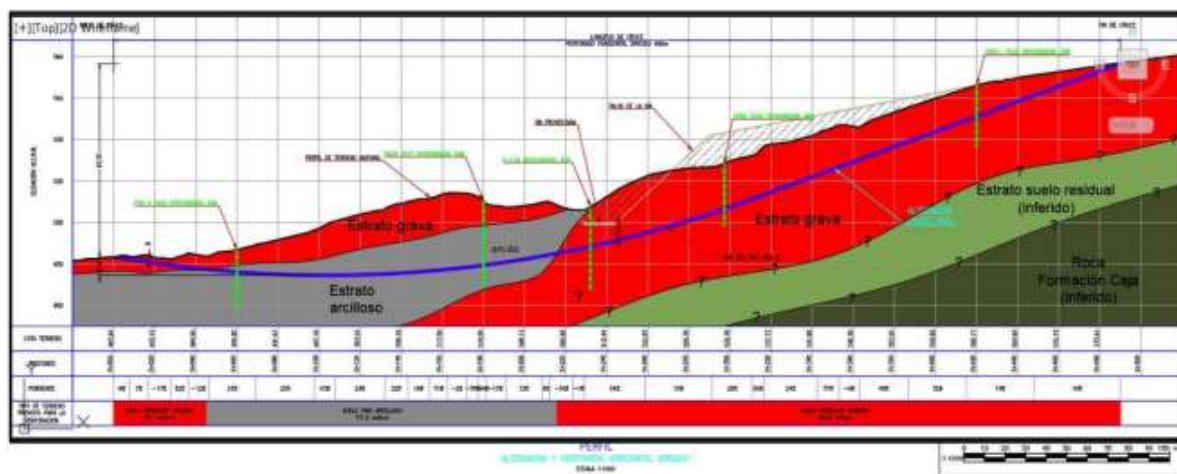


Figura 7. Perfil del terreno obtenido por evaluación sísmica.

Nota: Tomado del estudio para la alternativa de perforación dirigida.

Fuente: ODL, 2020, Estudio para perforación dirigida en la Loma de Buenavista.

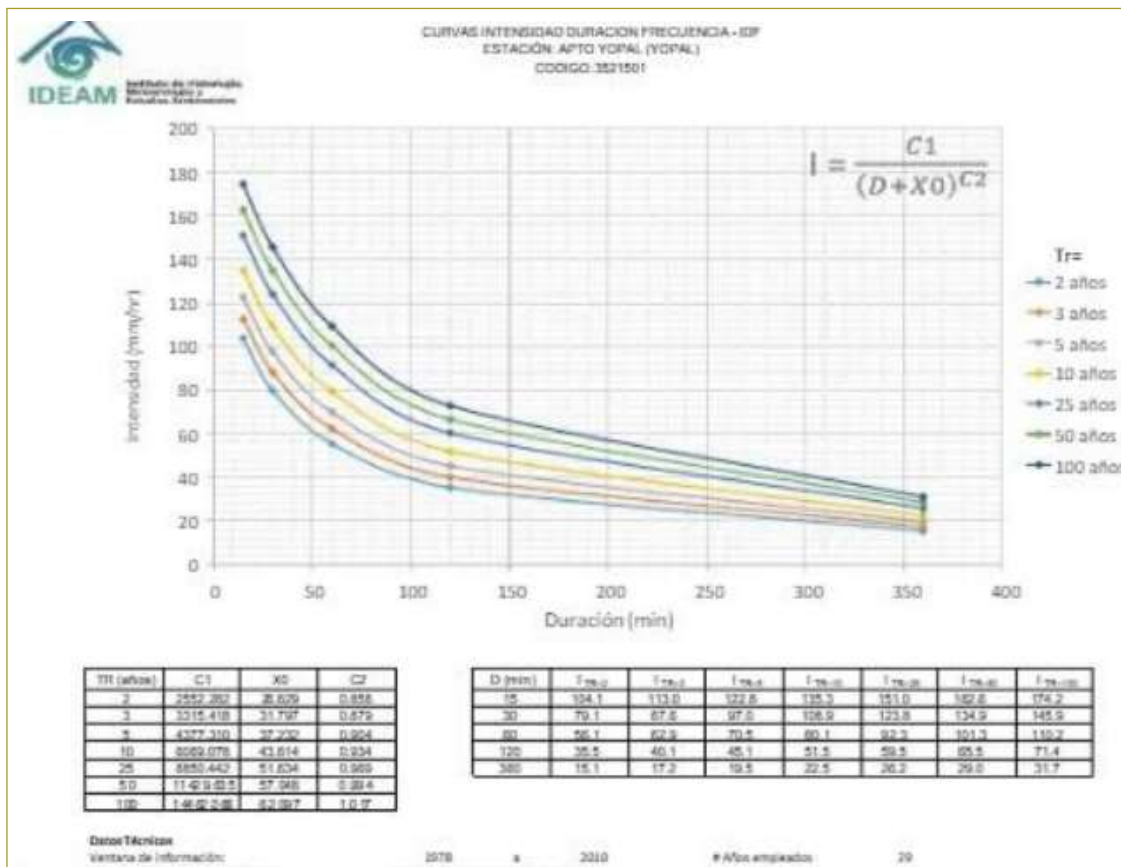


Figura 8. Curvas intensidad-duración-frecuencia.

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2016). Curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), estación aeropuerto del Yopal, código 3521501.

- Estado inicial.
- Construcción del sistema de soporte del tubo.
- Excavación hasta 10 m bajo la base de la torre superior.
- Instalación del refuerzo con anclajes en la parte superior.
- Excavación hasta 45 m de altura en el talud del costado occidental (el más alto).

Para los análisis de estabilidad se consideró el modelo de Mohr-Coulomb, tal como se indica en figuras anteriores (figuras 7 y 9), y se llevaron a cabo las corridas del modelo para las etapas de excavación, donde se evalúan los cambios en el estado de esfuerzos, las deformaciones y el factor de seguridad de la excavación. Se consideraron los siguientes parámetros: módulo de elasticidad de 60 MPa, peso unitario de 20 KN/, cohesión efectiva

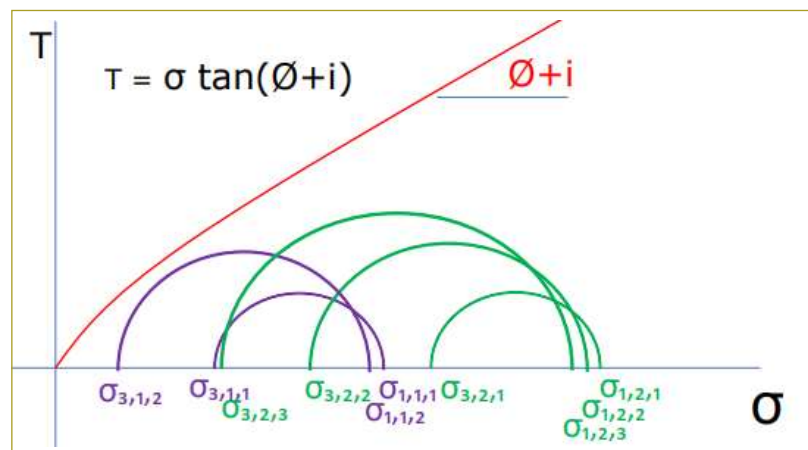


Figura 9. Envoltentes del estado de esfuerzos durante las etapas de la excavación

Fuente: Elaboración propia.



Figura 10. Modelo de análisis, en un marco de 70 m de alto y 170 m de ancho.

Nota: A la derecha se pueden apreciar las curvas esfuerzo-deformación obtenidas del MASW.

Fuente: Elaboración propia.

de 10 KPa, fricción más dilatación de 60° y relación de Poisson de 0,25.

En la figura siguiente (figura 11) se muestra el resultado de la modelación para cuatro etapas de excavación, en el que se indican el factor de seguridad y las deformaciones del terreno. Así mismo, se puede apreciar el estado de esfuerzos contra la estructura en cajón para el paso de la carretera y la restauración del derecho de vía del oleoducto, y se complementa con análisis de estabilidad de taludes en equilibrio límite.

CONSIDERACIONES SOBRE CONTENCIÓN DE EXCAVACIONES

Las excavaciones inducen un cambio en el estado de esfuerzos del terreno que hay que evaluar para no acercarse a la situación de falla del terreno.

En la situación del piedemonte llanero, donde las lluvias suelen ser torrenciales, de acuerdo con la curva de intensidad-duración-frecuencia (IDF) del aeropuerto de Yopal (figura 8), la intensidad de corta duración de los aguaceros supera los 100 mm/hora, con una

Figura 11. Modelo de análisis de las etapas de excavación.

Fuente: Elaboración propia.

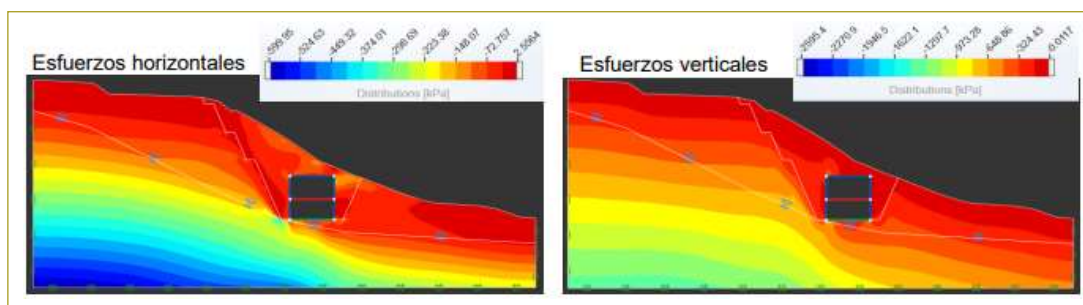
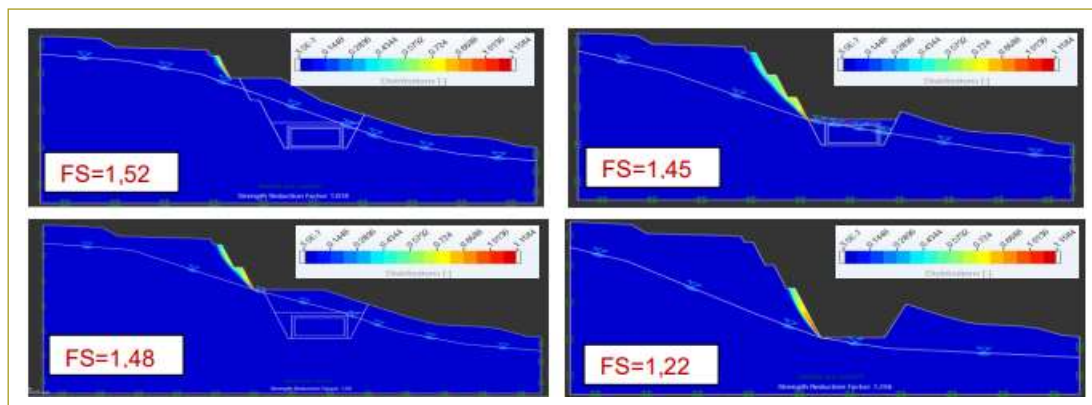


Figura 11. Modelo de análisis de las etapas de excavación.

Fuente: Elaboración propia.

precipitación media anual del orden de 5000 mm, y teniendo en cuenta la erodabilidad del depósito aluvial, es imperativo controlar el agua superficial, para lo cual se debe contar con coberturas impermeables (malla, pernos y concreto lanzado), así como con sistemas de captación y conducción del agua a los cuerpos de agua naturales en forma controlada.

La excavación en la parte superior, con poco confinamiento y con la vecindad de la cimentación de la torre de apoyo del ducto, es quizá la más propensa a perder su estabilidad, por lo que se consideró reforzar el terreno con anclajes en la parte superior del talud del costado más alto.

Para restaurar el confinamiento del terreno y lograr el espacio para la vía, se construirá una estructura cajón que permita el paso de la vía y soporte el relleno de conformación del derecho de vía del sistema de transporte de hidrocarburos. Se complementará con sistemas de drenaje subsuperficial, al nivel de la base de la excavación. Para el resto del talud de corte, por fuera del derecho de vía, se mantendrá el diseño que se ha tenido para los otros taludes de la carretera en este depósito.

El confinamiento lateral del terraplén del derecho de vía se ha propuesto con una estructura de tierra armada.

Las modelaciones del terreno y del proceso constructivo, con la técnica de elementos finitos permite evaluar el comportamiento del terreno y es posible estimar los esfuerzos y deformaciones a que estarían sometidas las estructuras de contención, incluso las reacciones de estas estructuras ante los esfuerzos que les impondrán, ver figuras 13, 14 y 15.

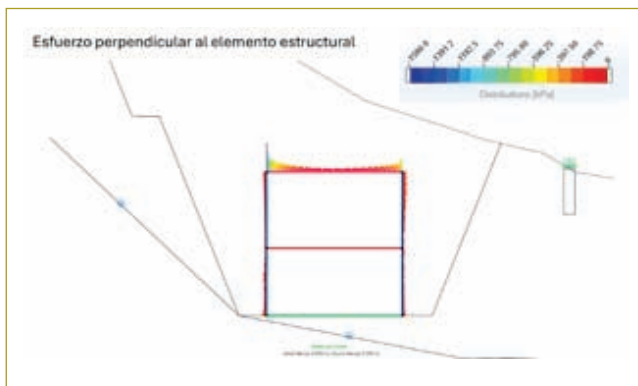


Figura 13. Esfuerzos perpendiculares a la estructura del cajón de paso de la carretera por efecto del relleno térrico alrededor de ella.

Fuente: Elaboración propia.

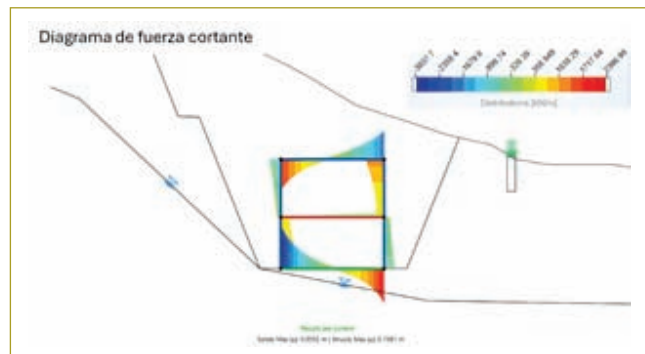


Figura 14. Diagrama de esfuerzos cortantes en los elementos de la estructura de contención, que permite el paso de la carretera y soporta el material de la conformación del derecho de vía del Oleoducto.

Fuente: Elaboración propia.

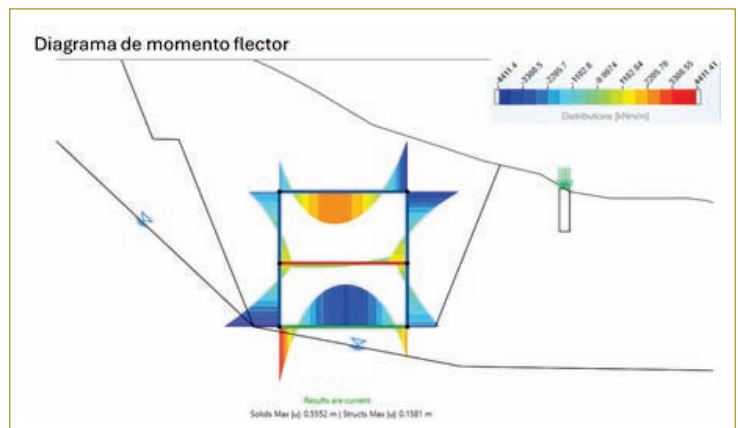


Figura 15. Diagramas de momento flector, en los elementos de la estructura de contención que permite la intersección con los dos sistemas de transporte.

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de estructuras de contención, tradicionalmente se ha trabajado con una distribución de presiones, triangular, trapezoidal o rectangular, que impone el terreno contra la estructura de contención, independiente del tipo de suelo; con esta información se adelantan los análisis estructurales y se determinan las dimensiones y refuerzo requeridos.

Estas distribuciones regulares de presión contra la estructura, muchas veces no representan el estado de esfuerzos, por ejemplo los de origen tectónico, ha habido casos donde los esfuerzos horizontales superan los gravitacionales y las estructuras no los pueden soportar; también se tienen esfuerzos inducidos por los procesos de compactación de los materiales de relleno entre el terreno y la estructura, los cuales en algunos

materiales pueden duplicar o triplicar lo mostrado en las distribuciones de presión; se tiene el efecto de algunos materiales que pueden ser expansivos al incrementar su humedad; la misma geometría puede inducir diferencias en los empujes considerados.

Para subsanar estas incertidumbres, es necesario contar con la caracterización del terreno, tan detallada como sea posible, incluir en el diseño los procesos constructivos, el control de los materiales involucrados con el sistema de contención.

REFERENCIAS

- Ingeniería y Geotecnia SAS (2022). *Informe de diseño del cruce del oleoducto Rubiales-Monterrey con el proyecto vial Villavicencio-Yopal*.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (2010). *Neotectónica del piedemonte llanero entre los municipios de Tauramena, Monterrey y Villanueva (Casanare)*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2016). *Curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), estación aeropuerto del Yopal, código 3521501*.