

Apéndice B. Estudio Geotécnico y de Ingeniería de Cimentaciones para el Sistema de Acueducto de la Zona Norte de Bucaramanga

Introducción

Este anexo / estudio tiene como objetivo el proporcionar un análisis geotécnico junto con recomendaciones de ingeniería de cimentaciones para la construcción de un sistema de acueducto para la zona norte de Bucaramanga. Este informe se centra en las áreas específicas 4A y 4B designadas como zonas geotécnicas en el estudio “Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga”, teniendo en cuenta su cercanía con la cuenca seleccionada previamente como fuente de abastecimiento y con la población objetivo.

Metodología Empleada

- Revisión y Síntesis de Información Existente
- Evaluación de Riesgos Geográficos
- Recomendaciones de Cimentación

Caracterización del Sitio: Entorno Geotécnico y Sísmico

Contexto Tectónico y Geológico Regional

El Área Metropolitana de Bucaramanga es una zona de mayor actividad sismotectónica de Colombia. Su configuración geológica está conformada por la interacción de dos grandes sistemas de fallas: el Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Marta al oriente, y al occidente por el Sistema de Fallas del Suárez. Dicha actividad tectónica no solo representa una alta amenaza sísmica, sino que también se ha encargado de modelar el paisaje, controlando la formación de las principales unidades geomorfológicas.

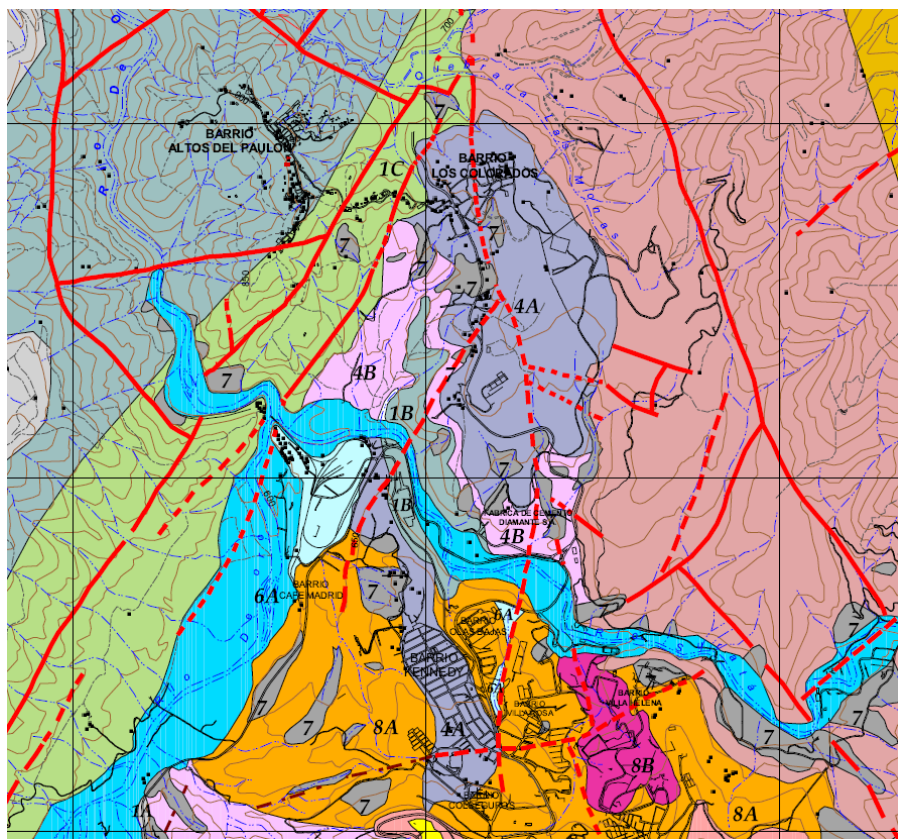
La geología de Bucaramanga se encuentra dominada por el Abanico Aluvial de la Formación Bucaramanga, que consiste en un depósito detrítico del Cuaternario que cubre más de un 60% del área metropolitana. Dicho abanico, con espesores que pueden superar

los 290 metros, se asienta sobre un basamento rocoso más antiguo, principalmente la Formación Girón del Jurásico. La zona norte, foco de este estudio, se ubica directamente sobre estos depósitos cuaternarios.

Unidades Geotécnicas Clave: Miembro Órganos y Miembro Gravoso

Las zonas 4A y 4B están constituidas por los materiales de los miembros Órganos y Gravoso de la Formación Bucaramanga. El comprender sus características es fundamental para el diseño de cimentaciones.

Figura 1. Zonificación Geotécnica - Zonas de Enfoque 4A y 4B de la Ciudad de Bucaramanga



Extraído del Mapa de Zonificación Geotécnica, INGEOMINAS (2001).

Composición y Heterogeneidad: Los Miembros Órganos (Qbo), el más potente de la formación con espesores que superan los 180 metros, se describe como “una serie monótona de niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en

alternancia con capas y lentes limo arenosos”. Dichos depósitos contienen desde arcillas y limos hasta gravas y cantos, con bloques que llegan a superar el metro de diámetro.

Los Miembros Gravosos (Qbg) presenta una composición similar, con predominio de gravas y bloques en una matriz areno-limo-arcillosa. Esta extrema heterogeneidad es una de las principales condicionantes geotécnicas, ya que implica una gran variabilidad en la capacidad portante y compresibilidad del terreno en distancias cortas.

Propiedades Físicas: Ambos miembros se caracterizan por ser depósitos débilmente consolidados, con baja compactación y alta permeabilidad. Esta condición los hace altamente susceptibles a la erosión hídrica, un factor clave en la diferenciación de las zonas 4A y 4B.

Delimitación de las Zonas Geotécnicas 4A y 4B

Un factor vital en la evaluación del riesgo geotécnico es el reconocimiento de que las zonas 4A y 4B, aunque estén compuestas por el mismo material geológico parental, muestran comportamientos de estabilidad diferentes.

Zona 4A (Miembros Órganos y Gravoso no Afectada por Procesos Erosivos): Esta zona corresponde a las superficies remanentes de las mesetas y colinas con pendientes suaves, como las que se encuentran en los barrios Kennedy y Los Colorados. Estas áreas representan las porciones más estables del Miembro Órganos en la Zona Norte. Geotécnicamente, se caracterizan por ser suelos de gravas areno-arcillosas. Presenta ausencia de niveles freáticos superficiales, lo que contribuye a una mayor estabilidad relativa. Aunque, como se menciona anteriormente, la zona central es estable, sus zonas perimetrales son vulnerables a deslizamientos y agrietamientos cosísmicos de las coronas de los taludes.

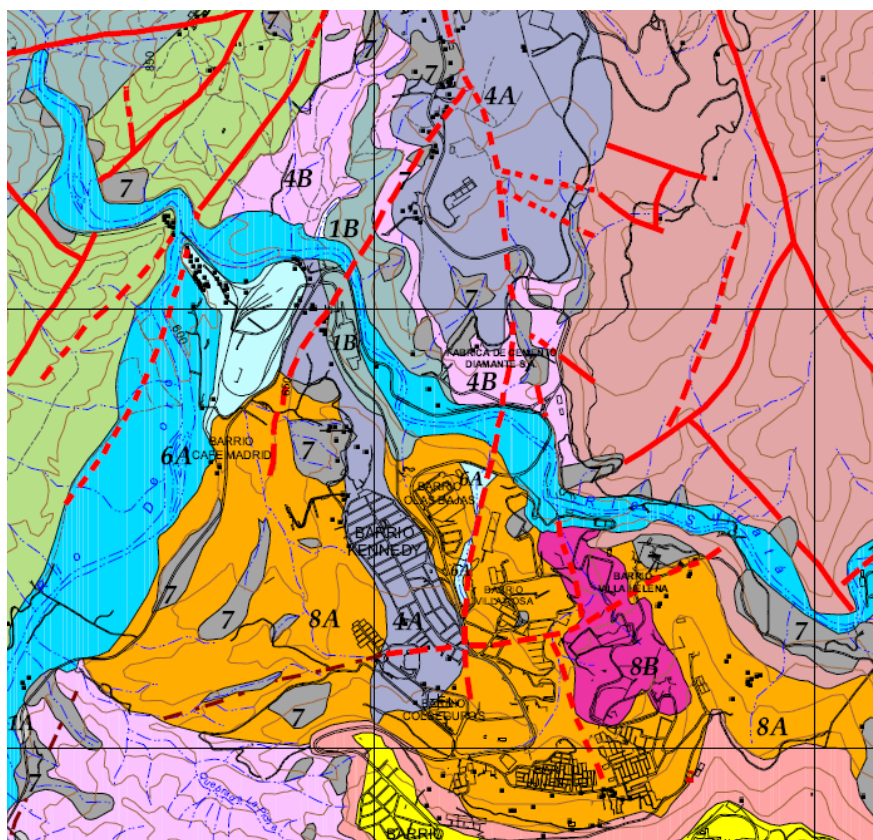
Zona 4B (Miembros Órganos Afectada por Procesos Erosivos): Esta zona comprende los escarpes y laderas de fuerte pendiente donde los procesos erosivos son intensos y activos, obteniendo la formación de tierras malas (Bad Lands) y una alta densidad de cárcavas y valles en forma de V. Esta zona está amenazada por procesos intensos de erosión activa, los cuales no son posibles de estabilizar con obras normales de ingeniería, y cualquier construcción en ella agravaría el proceso erosivo. Teniendo en

cuenta lo anterior, la zona 4B debe ser considerada como una zona de exclusión para la ubicación de infraestructura crítica tanto como sea posible.

Influencia de las Zonas de Deslizamiento Adyacentes (8A y 8B)

El análisis del riesgo no debe limitarse al subsuelo inmediatamente debajo de la infraestructura. El proyecto en la zona norte se encuentra adyacente al gran deslizamiento del norte de Bucaramanga, un movimiento en masa de gran escala compuesto por material removido de los Miembros Órganos, subdividiéndose en las zonas 8A (susceptible a deslizamientos) y la zona 8B (deslizamientos activos).

Figura 2. Zonas 8A y 8B adyacentes a las zonas enfoque del estudio.



Extraído del Mapa de Zonificación Geotécnica, INGEOMINAS (2001).

La existencia de este fenómeno, corroborada por continuas alertas y emergencias por deslizamientos en la zona norte en noticias, representa un peligro externo de primer orden. Una estructura ubicada en la zona 4A, considerada en teoría “estable”, podría verse impactada por la reactivación o retroceso del deslizamiento de la zona 8B. Por lo cual, el

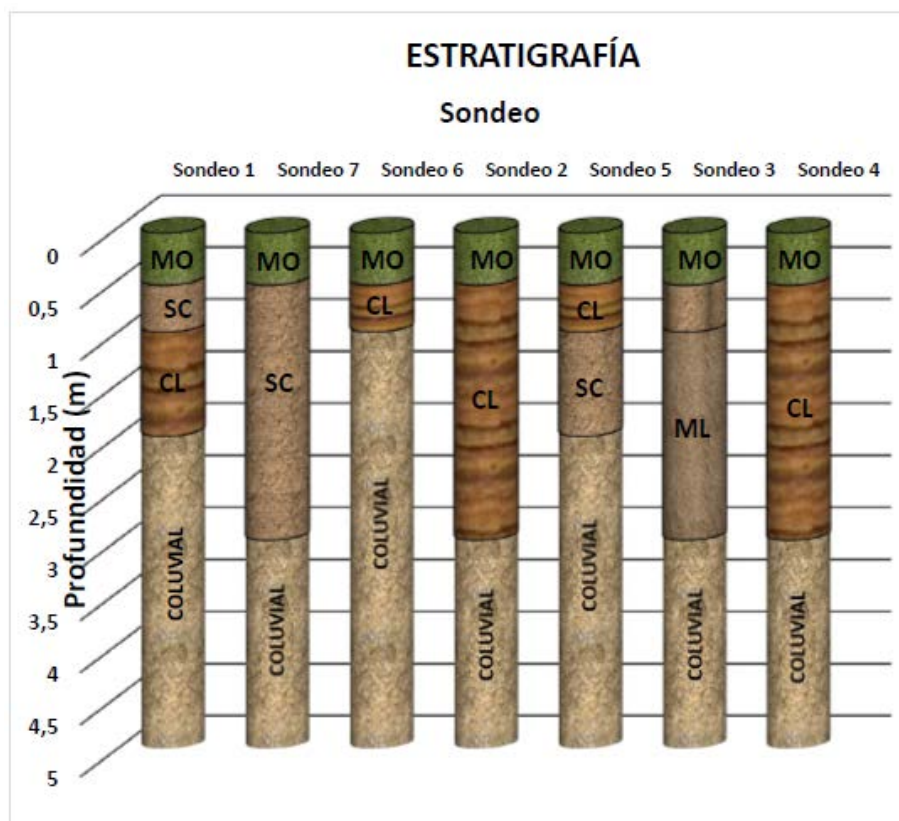
diseño debe incorporar zonas de retiro geotécnico respecto a las coronas de estos deslizamientos conocidos. Este enfoque trasciende un análisis de sitio estándar y aborda el riesgo a una escala de paisaje, lo cual es importante para la seguridad a largo plazo del proyecto.

Parámetros de Diseño Geotécnico

La definición de parámetros de diseño fiables es esencial para el análisis de cimentaciones. La siguiente caracterización se basa en la síntesis de los datos de INGEOMINAS y de estudios recientes realizados en la cercanía de los puntos de enfoque.

Perfil de Subsuelo y Estratigrafía

Figura 3. Estratigrafía "Variante Las Olas", sector aledaño al sitio de enfoque.



Extraído Del Estudio Geotécnico Sobre El Trazado De La Variante Las Olas, Parte Del Proyecto De Conducción Entre La Planta De Tratamiento De Agua Potable Rafael Ardila Duarte- Vereda Los Angelinos Y El Tanque Ferrovías. (2023)

Basado en la imagen anterior, y en lo consignado en el estudio de INGEOMINAS, se puede establecer un perfil estratigráfico para la zona norte, del siguiente modo:

Capa superficial (0 – 2.0 m): Suelos residuales o coluviales, clasificados como arcillas de baja plasticidad (CL) o limos de baja plasticidad (ML), con consistencia firme a muy firme.

Capa de Transición / Coluvión Denso (2.0 – 4.0 m): Corresponde a los Miembros Órganos o Gravosos, compuesto por gravas areno-arcillosas (GC) o areno-limosas (GM). Esta capa presenta una alta densidad, alcanzando en los ensayos una condición de rechazo (50 golpes) en el ensayo SPT a profundidades ligeras.

Basamento: A mayores profundidades se espera encontrar la roca sedimentaria de la Formación Girón.

Un factor importante es la ausencia de nivel freático superficial en las exploraciones realizadas, lo que reduce en gran medida riesgos de licuefacción y pérdida de resistencia por saturación.

Parámetros de Resistencia del Suelo y la Roca

Estos parámetros de resistencia son cruciales para el análisis de capacidad portante y estabilidad de taludes. En la Tabla 1 se resumen los valores de diseño recomendados.

Propiedades Dinámicas y de Deformación

Estos parámetros son indispensables para el análisis de la respuesta sísmica y el cálculo de asentamientos.

Velocidad de Onda de corte (V_s): Este parámetro es el más importante para la clasificación sísmica del sitio y el análisis de amplificación. Los estudios de INGEOMINAS indican un perfil de velocidades crecientes con la profundidad:

- Suelos superficiales alterados: V_s entre 310 y 575 m/s.
- Miembros Órganos (denso): V_s entre 930 y 1500 m/s.
- Roca (Formación Girón): V_s superior a 1700 m/s.

Tabla 1. *Parámetros Geotécnicos de Diseño para las Zonas 4A y 4B*

Parámetro	Símbolo	Unidad	Capa Superficial (Suelos Residuales/Coluviales)	Miembro Órganos/Gravoso (Denso)
Clasificación USCS	-		CL, ML, GC, GM	GW - GC, SW-SC
Peso Unitario Total	γ_t	t/m ³	1.8 - 2.1	2.2 - 2.5
Ángulo de Fricción Efectiva	ϕ'	Grados (°)	23 - 33	33 - 45
Cohesión Efectiva	c'	kPa	10 - 50	>100 (cementado)
Velocidad Onda de Corte	V_s	m/s	185 - 322	930 - 1500
Módulo de Elasticidad	E_s	Mpa	2.3 - 11.8	> 20
Potencial de Expansión	-	-	Bajo	Bajo
Potencial de Licuefacción	-	-	Bajo (sin NF)	Nulo

Nota: Los parámetros para la Zona 4B deben ser utilizados con extrema precaución, ya que la estabilidad en esta zona está gobernada por la erosión y la morfología del talud, no únicamente por la resistencia del material.

Módulo de Elasticidad (E_s): Correlacionado a partir de valores de SPT, el módulo para los suelos superficiales varía entre 2.3 y 11.8 Mpa. Este valor es fundamental para el cálculo de asentamientos elásticos.

Coefficiente de Reacción del Suelo (k): El estudio “Variante Las Olas” proporciona valores ya calculados para el módulo de reacción vertical (k_v) y horizontal (k_h), los cuales pueden ser aplicables al diseño de tuberías y tanques. Por ejemplo, una cimentación de 2.5m x 2.5m a 1.5m de profundidad, tendrá un valor de k_v de 37,632 MN/m³.

Evaluación de Riesgos Geotécnicos e Implicaciones para el Diseño de Cimentaciones

Un diseño de cimentación debe responder directamente a los riesgos que se identifiquen en el sitio. Para este proyecto los peligros principales son la amenaza sísmica y la inestabilidad geotécnica. En la Tabla 2 se resumen la conexión de estos peligros y los desafíos de diseño para cada componente del acueducto.

Tabla 2. Matriz de Riesgos Geotécnicos e Implicaciones de Diseño

Peligro	Componente Afectado	Implicación Clave para el Diseño
Sismo (Amplificación de Sitio)	Todos los Componentes	Diseño estructural debe usar el espectro de sitio ($S_m = 0.90$). Las fuerzas de diseño serán significativamente mayores que las de la norma estándar para roca.
Sismo (Deformación del Terreno)	Tuberías	Requiere el uso de tuberías y juntas dúctiles/flexibles capaces de acomodar deformaciones sin romperse.
Deslizamiento (Gran Escala - Zona 8)	Todos los Componentes	Necesidad de establecer zonas de retiro geotécnico. Evitar la construcción en la zona de influencia de deslizamientos activos.
Deslizamiento (Local - Zona 4B)	Tuberías, Estructuras	Evitar la Zona 4B. Donde sea inevitable, se requieren cimentaciones profundas y anclajes.
Erosión (Zona 4B)	Tuberías, Cimentaciones	Prohibición de cimentaciones superficiales. Las tuberías deben estar protegidas contra la socavación (cimentaciones profundas, puentes).
Asentamiento Diferencial	Tanques, Estaciones de Bombeo	Alto riesgo para cimentaciones superficiales. Fuerte recomendación de cimentaciones profundas para transferir cargas a estratos competentes.
Fuga del Sistema (Detonante)	Todos los Componentes	Diseño debe priorizar la integridad del sistema (materiales robustos, detección de fugas) y el control de aguas (drenajes) para prevenir la saturación del suelo.

Análisis de la Amenaza Sísmica

Movimiento del Terreno y Amplificación de Sitio: Bucaramanga se encuentra en una zona de amenaza sísmica alta de acuerdo con la NSR-10. El estudio proporcionado por INGEOMINAS establece espectros de diseño específicos para el sitio. Así tal, para las zonas de suelo rígido como 4A y 4B, se esperan amplificaciones significativas. El espectro de diseño propuesto para estas zonas alcanza una aceleración máxima de 0.90, considerablemente superior al espectro de roca de la norma. Este espectro debe ser usado para el diseño de todas las cimentaciones del acueducto.

Potencial Falla del Terreno:

Licuefacción: El riesgo de licuefacción se considera bajo, ya que estos suelos son predominantemente densos y de naturaleza granular gruesa (gravas) y no se ha detectado un

nivel freático superficial que pueda generar presiones de poros excesivas en caso de ocurrencia de sismo.

Deslizamientos Inducidos por Sismo: El movimiento sísmico puede reducir la resistencia al corte de los taludes, potencialmente activando deslizamientos en las laderas de la zona 4B o en el gran complejo de deslizamientos anteriormente expuestos de la zona 8B.

Análisis de la Amenaza Geotécnica

Inestabilidad de Taludes y Deslizamientos: Es el peligro geotécnico predominante para este proyecto. Es vital establecer diferencias entre:

Fallos Superficiales en la zona 4B: Las laderas empinadas y erosionadas de la zona 4B son susceptibles a deslizamientos superficiales, sobretodo durante eventos de lluvia intensa o si se llegan a saturar por una fuga del acueducto.

Fallos Profundos en la Zona 8: La reactivación del deslizamiento activo de la zona 8B puede ser una amenaza catastrófica que puede impactar la estructura que se ubique en la zona 4A.

Erosión: Este proceso define la zona 4B. La escorrentía superficial ha creado un paisaje de las llamadas “Bad lands” que se encuentra en continuo cambio. Cualquier tubería o estructura colocada en esta zona sin su debida protección contra la socavación está propensa a fallar.

Asentamiento Diferencial: La notable heterogeneidad de los Miembros Órganos crea un alto potencial de asentamientos diferenciales, sobretodo bajo cimentaciones rígidas y extensas como las de los tanques de almacenamiento. Una parte de esta cimentación, por ejemplo, podría apoyarse sobre un bloque de arenisca, mientras que la otra parte podría hacerlo sobre un lente de limo arenoso, lo que puede generar inclinaciones y sobreesfuerzos potencialmente peligrosos en la estructura.

Un aspecto fundamental del análisis del riesgo es entender que incluso, el mismo acueducto, puede ser un factor de riesgo. La historia de Bucaramanga ha demostrado que

una gestión inadecuada del agua ha sido causa principal de erosión y deslizamientos que han afectado a la ciudad. Una fuga en el nuevo acueducto puede introducir una gran cantidad de agua en el subsuelo, saturando los materiales erosionables de la zona 4B o las laderas de la zona 4A, reduciendo la resistencia y provocando deslizamientos, generando una reacción en cadena, que desemboque en una rotura de tubería, y de ahí, los demás elementos, por consiguiente, la integridad del sistema y un control riguroso del agua son principios de diseño importantes.

Recomendaciones de Diseño y Construcción de Cimentaciones

Las siguientes recomendaciones se basan en la integración de las características del sitio, la evaluación de los riesgos y la normativa aplicable y vigente.

Principios Generales de Diseño

Cumplimiento Normativo: Todos los diseños deben cumplir con lo establecido en la norma NSR-10 y el RAS, por lo que, un estudio geotécnico es obligatorio.

Estrategia de Evitación de Riesgos: La medida de mitigación más efectiva es la evitación, por consiguiente, la ruta del acueducto y la ubicación de las estructuras deben evitar la zona 4B y las zonas de influencia de los deslizamientos de la zona 8.

Diseño para la Deformación: Es una zona sísmicamente activa con riesgo de deslizamientos, las cimentaciones y estructuras deben ser diseñadas para resistir tanto fuerzas como deformaciones del terreno sin comprometer su funcionalidad.

Control del Agua: El manejo del agua superficial y subsuperficial también es importante. Los diseños deben incluir sistemas de drenaje eficientes que eviten la saturación del subsuelo alrededor de las cimentaciones.

Cimentaciones para Infraestructura Lineal: Tuberías

Excavación de la Zanja, Cama y Relleno: Las excavaciones en los Miembros Órganos involucrarán remoción de bloques y cantos. El fondo de la zanja debe ser nivelado y uniforme.

Debido a la inestabilidad potencial de las paredes de la zanja, sobretodo en la zona 4B, el uso de sistemas de entibado y tablestacado serán necesarios para garantizar la seguridad de los trabajadores y la integridad de la excavación.

El relleno de la zanja deje realizarse con material de préstamo seleccionado, colocado en capas y compactado a una densidad específica para otorgar un soporte lateral adecuado a la tubería y minimizar asentamientos superficiales.

Diseño Sismorresistente de Tuberías Enterradas: Se deben utilizar materiales de tubería dúctiles, como el Hierro Dúctil, que pueden soportar grandes deformaciones sin fracturarse.

Estrategia para Cruces de Zonas de Peligro: En la zona 4B está prohibido el enterramiento superficial, la tubería debe cruzar estas zonas mediante estructuras de paso aéreas con estribos cimentados sobre pilotes anclados a terreno competente fuera de la zona de erosión activa.

Si es inevitable cruzar una ladera con potencial de inestabilidad, se deben implementar medidas de anclaje, asegurando la tubería mediante bloques de anclaje de concreto masivo, cimentado a una profundidad que sobrepase el plano de falla potencial del deslizamiento.

Cimentaciones para Estructuras Anexas (Tanques, Estaciones de Bombeo)

La extrema heterogeneidad de los Miembros Órganos hace que las cimentaciones superficiales sean una solución de alto riesgo para estructuras pesadas y rígidas como los tanques de agua. El potencial de asentamiento diferencial es el factor de diseño que prima en la elección de la cimentación.

Cimentaciones Superficiales: Las zapatas aisladas, combinadas o losas de cimentación solo pueden considerarse para estructuras ligeras y de baja importancia en áreas con suficiente información de la zona 4A.

Cimentaciones Profundas: Para tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo se recomienda el uso de pilotes excavados, ya que estos pueden atravesar los bloques de roca. Estos deben penetrar a través de los depósitos heterogéneos de los Miembros Órganos y empotrarse en el estrato de roca competente de la Formación Girón o alcanzar una capacidad portante adecuada por fricción. Para su diseño se deben considerar las cargas verticales y las cargas laterales significativas generadas por el sismo.

Diseño Sísmico de Cimentaciones de Tanques: El diseño debe seguir los lineamientos del Capítulo C.23 de la NSR-10. La cimentación debe ser diseñada para resistir los momentos de volcamiento y las fuerzas del corte basal generadas por la combinación de la masa del tanque y las fuerzas del agua durante un sismo. Estas fuerzas sísmicas deben calcularse usando el espectro de diseño de sitio ($S_m=0.90$).

Tabla 3. *Resumen de Recomendaciones de Cimentación por Componente y Zona Geotécnica*

Componente del Acueducto	Cimentación Recomendada en Zona 4A	Cimentación Recomendada en Zona 4B	Consideraciones Clave de Diseño
Tubería Principal (Conducción)	Enterrada con cama y relleno estructural.	Evitar. Si es inevitable: Estructura de paso (puente) o cimentación profunda (pilotes).	Material dúctil (HD/HDPE), juntas flexibles y restringidas. Protección contra socavación.
Tubería de Distribución	Enterrada con cama y relleno estructural.	No recomendable.	Material dúctil, juntas flexibles. Diseño sísmico según NSR-10 C.23. Análisis de vuelco,
Tanque de Almacenamiento	Cimentación profunda (pilotes excavados/caissons) anclada en estrato competente.	Prohibido.	deslizamiento y fuerzas hidrodinámicas. Conexiones flexibles. Diseño sísmico para equipos críticos.
Estación de Bombeo	Cimentación profunda (pilotes excavados/caissons).	Prohibido.	Aislamiento de vibraciones.
Cámaras de Válvulas	Losa de cimentación rígida y reforzada.	Evitar. Cimentación sobre pilotes si es inevitable.	Diseño para resistir asentamientos diferenciales.

Recomendaciones para la Construcción, Monitoreo y Gestión de Riesgos

Movimiento de Tierras, Estabilidad de Excavaciones y Control de Erosión

Control de Erosión: Durante la fase de construcción, es importante implementar un plan de manejo de aguas lluvias y control de sedimentos, sobretodo en las áreas cercanas a la zona 4B. Se deben construir canales de coronación, diques de desvío y dissipadores de energía para manejar la escorrentía y evitar la erosión de los taludes expuestos.

Estabilidad de Excavaciones: Todas las excavaciones con profundidades mayores a 1.5 metros en estos suelos deben contar con sistemas de entibados, diseñados de acuerdo con las condiciones del terreno.

Instrumentación Geotécnica y Plan de Monitoreo a Largo Plazo

Durante la Construcción: Instalar piezómetros en áreas clave para monitorear cualquier cambio en los niveles de agua subterránea que pueda ser inducido por las actividades de construcción.

Durante la Operación: Establecer una red de puntos de control topográfico en las cimentaciones de los tanques y a lo largo de los tramos críticos de la tubería para monitorear asentamientos y posibles deformaciones a largo plazo.

Estudios Adicionales

Este informe proporciona un marco de diseño basado en la información regional existente y de estudios cercanos. Sin embargo, el título H de la NSR-10 exige realizar investigaciones geotécnicas de sitio específicas en la ubicación exacta de cada estructura principal. Estos estudios deben incluir sondeos con ensayos SPT y toma de muestras para laboratorio, necesarios para confirmar las condiciones del subsuelo local y tener un diseño final de cimentación confiable.

Conclusiones

La construcción de un sistema de acueducto en la zona norte de Bucaramanga es un proyecto de ingeniería viable, que enfrenta desafíos geotécnicos y sísmicos de alta complejidad, que deben ser abordados con un diseño conservador y una ejecución rigurosa.

El riesgo principal es geomorfológico y geotécnico, siendo que, la amenaza más significativa para el proyecto no es la resistencia del material de los Miembros Órganos, sino su susceptibilidad a la inestabilidad en función de la topografía. La distinción entre las mesetas estables de la zona 4A y las laderas en erosión activa de la zona 4B es crítica. La estrategia de mitigación más efectiva es evitar la zona 4B en la planificación de la ruta.

La alta sismicidad de la región, combinada con la capacidad de amplificación de los suelos locales, exige que todas las estructuras se diseñen usando los espectros de respuesta de sitio del estudio de microzonificación, siendo estos más exigentes que los espectros de roca estándar de la NSR-10.

La naturaleza heterogénea de los Miembros Órganos hace que las cimentaciones superficiales para estructuras pesadas sean propensas a asentamientos diferenciales peligrosos. Por tanto, se concluye que cimentaciones profundas son la solución más segura y fiable para tanques y estaciones de bombeo.

El propio acueducto es un factor de riesgo de deslizamiento y erosión si se llegan a producir fugas. En consecuencia, el diseño debe priorizar la integridad y resiliencia del sistema, por medio del uso de tubería y juntas dúctiles y flexibles, y la implementación de sistemas de detección de fugas y drenajes eficientes.

La seguridad y sostenibilidad a largo plazo del sistema de acueducto dependen directamente de la incorporación de las anteriores conclusiones y recomendaciones en todas las fases del proyecto, desde su planificación y diseño hasta la construcción y operación.