
ANÁLISIS TÉRMINOS DE REFERENCIA PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL – EIA EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE CENTRALES GENERADORAS DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA TDR – 014 PROPUESTOS POR EL MADS Y LA ANLA

INTRODUCCIÓN

El presente documento agrupa las observaciones generadas tras la revisión de la propuesta de *Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental EIA en Proyectos de Construcción y Operación de Centrales Generadoras de Energía Hidroeléctrica*, los cuales fueron puestos a consideración del público en general por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial y la ANLA.

Fue elaborado por un grupo de geólogos e ingenieros, razón por la cual se centra en el componente geoambiental, sin consideraciones ecosistémicas ni socioeconómicas o culturales. El grupo de trabajo está constituido por: Julio Fierro Morales, Geólogo MSc. Geotecnia, Milena Ordoñez Potes, Ingeniera civil MSc. Geotecnia, Diana Patricia Lozano Zafra, Geóloga MSc. Geoinformación, Ana María Llorente Valbuena, Ingeniera Ambiental MSc Geomática (a), Eduardo Quintero Chavarría, Ingeniero civil MSc. Geofísica, Andrés Castillo, Ing. Civil Esp. Recursos hidráulicos, David Aponte, Ing. civil MSc Geotecnia (a), Erika Cuida López, Geóloga, Angie Ramírez Huerta, Geóloga, Daniela Mateus Zabala, Geóloga, Juan Francisco Díaz González, Geólogo y Javier Valencia, Ing. Civil.

DE LAS CONSIDERACIONES GENERALES

Se hace énfasis en la pertinencia de enmarcar los requerimientos técnicos a las normas vigentes y a los decretos técnicos que han tenido amplio uso en el país, a saber:

- Norma Sismo Resistente Colombiana -2010
- Código Colombiano de Diseño y Construcción de Puentes -2014
- Resolución 227 de 2006- "Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C."

Lo anterior porque se considera que la aplicación de las normas técnicas, que en la actualidad rigen ciertas obras de infraestructura, es un avance previo a la solución de la necesidad de un código de diseño de presas que en la actualidad no existe en la legislación colombiana.

Los proyectos que engloba este informe de términos de referencia están direccionados para proyectos de generación hidroeléctrica, no obstante el termino es bastante general pues la generación de energía por medio del flujo del agua, va desde el aprovechamiento de las fuerzas de mareas y oleajes, siguiendo el centrales de generación a orillas de ríos, presas con agua fluyente, presas con embalse y demás. Lo anterior para hacer ver que no solo hay un distinción considerable

entre cada tipo de obra que acá se proyecta, sino que también hay diferencias considerables en los posibles impactos ambientales que estas estructuras podrían generar.

Es claro que todo estudio parte de supuestos técnicamente sustentados. Para el caso del medio biótico, se prevén consecuencias debido a los cambios que el proyecto introduce al medio ambiente. No obstante, esto también es una práctica común si al medio abiótico se refiere. Se suponen parámetros de resistencia típicos, tomados de las bibliografías, se intuyen y modelan comportamientos frente a fenómenos hidráulicos o tectónicos. Esta práctica no es una restricción, ingenieril y técnicamente es justificable siempre que se realicen los planes de seguimiento de las obras proyectadas frente a los modelos planteados, es decir, las suposiciones durante el diseño deberán confirmarse o refutarse durante la construcción y durante el funcionamiento. La autoridad ambiental deberá exigir los planes de monitoreo y respuesta frente a estos procesos y debido a que en muchos casos se requerirá de una actualización continua de los modelos, la autoridad deberá requerir el aval de una empresa competente en el área para la revisión y adecuación de dichos modelos.

DE LA CARTOGRAFÍA

La metodología aplicada por la autoridad ambiental pide una topografía con un nivel de detalle de 1:25 000. Esto corresponde a una escala de detalle que se considera muy poco detallada; y si a la zona de presa se refiere, planos con estas escalas no cumplen con los niveles de detalle mínimos para el correcto análisis de las obras requeridas.

Para un primer vistazo de la zona de estudio las cartografías 1:25.000 y 1:10.000 son aproximaciones válidas a las condiciones topográficas de la zona de estudio. Ahora bien, el concepto de generación de planos topográficos de detalle va más allá del solo hecho de solicitar cartografía a una escala precisa. Es más importante la densidad de los datos, de puntos de control topográficos en un área determinada que la escala en sí. Adicional a lo anterior y debido a que los estudios de detalle deben agrupar litologías de hasta un metro de espesor será necesario que la densidad de puntos tomados para la construcción de la topografía de respuesta a este requerimiento, en este caso se deberán tomar puntos de forma tal que se generen cuadrículas de medición de no menos de un metro por un metro cuadrado y que la densidad de puntos para cada área indicada no sea menor a cinco. Lo anterior corresponde a un promedio de un área de interés ya que la densidad puede verse aumentada o disminuida si la topografía se vuelve muy homogénea.

DE LA INFRAESTRUCTURA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

La información que acá se solicita solo corresponde a generalidades y no a requerimientos a tener en cuenta durante la ejecución de los estudios y diseños de las obras civiles requeridas. En este numeral tampoco se menciona normativa asociada ni indicadores que especifiquen la calidad de la información necesaria para el desarrollo de los estudios y diseños.

En este sentido, las obras asociadas a generación de energía son obras de primera importancia y con los mayores grados de complejidad. La Norma Sismo Resistente Colombiana del 2010, da un límite mínimo, esta debería ser tomada en cuenta por la Autoridad Ambiental, como un mínimo requerido respecto al tipo de estudios necesarios y a la información mínima necesaria para estos análisis. En dicha norma se especifica el número mínimo de sondeos, la forma de caracterizar los materiales y la responsabilidad de los ingenieros diseñadores frente a la obra en cuestión.

DE LA FASE DE OPERACIÓN

En la fase de operación, cuando todas las obras de ingeniería están terminadas, es donde el seguimiento sistemático de éstas juega un papel vital en la validación de los modelos utilizados para el diseño de las obras que permitan la generación de energía. Lo anterior, para el caso de estructuras como Presas de tierra o enrocados o similares, diques auxiliares, muros de contención y taludes cercanos a obras de gran impericia, verbigracia, casas de máquinas, túneles de desvío, captaciones y demás.

Estas estructuras, durante la fase de operación, deberán estar correctamente instrumentadas y el seguimiento de los valores que la instrumentación arroje debería ser un requerimiento de la Autoridad Ambiental. Inclínómetros, piezómetros, extensómetros y controles topográficos deberán cubrir de forma extensa el cuerpo de dichas estructuras y que de esta forma se asegure que una falla súbita no se presentará y que cualquier inconveniente será evaluado y solucionado con la premura del caso.

ÁREAS DE INFLUENCIA

A pesar que en el numeral **4.1. Consideraciones técnicas**, los TdR exigen contar con la determinación en función del medio abiótico, en el numeral **4.2. Definición, identificación y delimitación del área de influencia** no existe guía ni referencia para el “abiótico”. Es necesaria la exigencia de al menos:

- El modelamiento de afectación en calidad del agua,
- El modelo de dispersión de emisiones
- Las variaciones microclimáticas, en escenarios de cambio climático
- La influencia de variación en las zonas de recarga y descarga de acuíferos,
- La definición de la cuenca hidrogeológica, que no es necesariamente coincidente con la cuenca hidrológica
- La afectación en las cantidades de agua
- El área de influencia ante el riesgo por falla en represas, etc.

Los proyectos susceptibles a causar deterioro grave deben obtener licencia ambiental y para ello es necesario que estudien el entorno ambiental y socioeconómico en los cuales se van a llevar a

cabo. No obstante, los TdR propuestos incluyen el siguiente inciso (en el numeral 5. Áreas de influencia):

En caso de que la información de caracterización de línea base de nivel regional que se solicita en estos términos de referencia exista, esté validada por la Autoridad, tenga menos de un (1) año de su realización y se haya puesto a disponibilidad de los solicitantes, no será necesario presentarla en la caracterización de línea base; sin embargo, debe ser referenciada y analizada en el documento.

No se entiende como se podría obviar generar información de referencia por parte de un interesado. Es posible que exista información, pero cada dato geológico adicional, cada parcela de vegetación levantada, cada entrevista con un poblador sirve para mejorar el conocimiento y tomar mejores decisiones. Este aparte debe ser suprimido.

ASPECTOS RELACIONADOS CON LA GEOLOGÍA

La geología es un componente fundamental para soportar los análisis de estabilidad de los terrenos, tanto en el vaso como en la fundación de todas las obras de infraestructura complementaria y el propio cuerpo de la presa. También es la base fundamental para la comprensión de las aguas subterráneas, sus direcciones probables de flujo y el tipo de espacio a través del cual se mueven dichos fluidos. Finalmente, es primordial para el entendimiento de la sismogeneración.

En los requerimientos de la geología para el área de influencia

Para el área de influencia del componente, grupo de componentes o medio, se debe presentar la cartografía geológica general ajustada al proyecto con fotointerpretación y control de campo; se debe describir las unidades geológicas aflorantes a nivel regional junto con la geología estructural del área (orientación de estratos, fallas, pliegues, columna estratigráfica, etc.). La información específica relacionada con las unidades estratigráficas y los rasgos estructurales, debe ser soportada mediante perfiles estratigráficos determinados a partir de observaciones directas que cuenten con su respectivo registro fotográfico debidamente datado, identificado y georreferenciado.

Los TdR solicitan una cartografía geológica general, pero esto no es adecuado conceptualmente, pues debe adelantarse un trabajo de cartografía geológica detallada. Solicita también descripciones de unidades y de geología estructural. No obstante, estos requerimientos son demasiado generales y no van a permitir acercarse a impactos ambientales o a análisis de contingencias que se relacionan con las represas: sismicidad (natural, inducida o desencadenada), cambios en aguas subterráneas (direcciones de flujo y cantidades) y estabilidad de excavaciones. Se insiste en los TdR en que los elementos geológicos regionales son los insumos de los modelos, pero todos los elementos regionales usados deben estar validados en geologías locales de escala adecuada dependiendo del proyecto.

Geología para la construcción de túneles relacionados con el proyecto

- *Definición, localización y cuantificación de las actividades de exploración geológica directa por medio de perforaciones con recuperación de núcleo, e indirecta por medio de prospección geofísica y sus respectivos registros, realizadas sobre los corredores y áreas de las obras subterráneas a construir tales como túneles de desviación del proyecto, casas de máquinas, pozos, etc.*
 - *Identificación de las unidades litológicas y situación geológico estructural a lo largo del corredor del túnel que permita conocer la condición geológica del macizo rocoso. Para este propósito se requiere esquematizar el modelo en planta y perfiles longitudinales y transversales a escala 1:5.000 o mayor, dependiendo de la longitud del túnel; considerando siempre que se debe brindar la suficiente claridad, ilustración y comprensión de las condiciones geológicas del túnel propuesto.*
 - *Caracterización del macizo rocoso, identificación del estado de las discontinuidades y análisis cinemático del macizo para establecer la posibilidad de falla por la alteración del contorno del túnel*
 - *Identificación de tramos con diferentes calidades de roca, y zonificación geológica a lo largo de los ejes de los túneles y en el contorno de las casas de máquinas, dependiendo del estado del macizo (roca sana, roca parcialmente meteorizada, roca fracturada, roca alterada hidrotermalmente, corredores de falla, etc.).*
 - *Mapa de Formaciones superficiales en términos del origen y estado de material aflorante y su condición como material de ingeniería, diferenciándolo entre suelo depositado, suelo residual, roca meteorizada, saprolito, roca meteorizada, rellenos antrópicos, etc.*
- Los túneles brindan la oportunidad de mejorar el conocimiento de subsuelo en términos de los espesores de los perfiles de meteorización (tal como está planteado en los TdR), pero también en lo referente a la caracterización de las fallas geológicas y de aspectos de hidrogeología (caudales de agua por volumen de roca, caudales relacionados con fallas geológicas y zonas de cizalla, etc.) lo cual no es requerido de manera clara.
 - En el documento se menciona el uso de escalas 1:5000 o mayores para la identificación de unidades litológicas y rasgos estructurales cuando se requiera construir túneles en el área de influencia, de modo que no hay claridad en que escalas de este detalle deberían utilizarse también en el área de construcción de las principales obras civiles incluida la zona de presa, casa de máquinas etc.
 - Al finalizar el apartado de requerimientos en la línea base del componente geológico se menciona *“La información cartográfica debe presentarse en escala 1:10.000 o más detallada, de acuerdo con las características del proyecto”*, sin embargo no hay claridad de sobre qué área se debe realizar la cartografía a este detalle o si esta corresponde a la escala de cartografía regional del área de influencia mencionada anteriormente.

- en los términos no se establece una metodología de rigor que defina por ejemplo que aspectos geológicos deben ser evaluados en campo ni la espacialidad de los puntos de control, criterios que finalmente le dan validez al modelo geológico que el solicitante presenta.

PROPUESTAS PARA LOS REQUERIMIENTOS DE GEOLOGÍA EN LOS TDR

Con base en las observaciones anteriores, es necesario que la propuesta de Términos de Referencia sea ampliada como sigue:

1. Estratigrafía/Caracterización litológica

De los requerimientos relacionados con la descripción de las unidades geológicas que afloran en el área de influencia se identifica una falta de claridad respecto a los parámetros litológicos que deben ser evaluados en el EIA por parte del solicitante para cada uno de los materiales que constituyen la zona de embalse (composición, granulometría, porosidad, permeabilidad, etc.).

Es necesario que se requiera:

- Descripción litológica, referencia de edad y origen, espesor, distribución y posición en la secuencia de las distintas unidades litológicas en el área de estudio. Teniendo en cuenta la escala de trabajo, la litología se debe levantar en unidades geológicas superficiales (UGS, ver glosario), asociándola a la formación a la que pertenece.
- En cuanto a los depósitos, será necesaria su caracterización y cartografía. La caracterización incluirá datos cualitativos y en la medida de lo posible cuantitativos acerca de su porosidad y permeabilidad, espesor, fábrica, textura, estado de meteorización, color, relación fragmentos/matriz, tamaño y forma de los fragmentos, textura de la matriz, humedad y en general todas las características que puedan ser descritas o medidas y que sean de utilidad para los modelos hidrogeológicos y geotécnicos así como para los criterios de recuperación ambiental.
- La caracterización de Unidades Geológicas Superficiales debe sustentarse en la información geológica oficial y de estudios de referencia, en información cartográfica coherente con la escala del estudio, con interpretación de fotografías aéreas y sensores remotos, con descripciones y observaciones de campo, con interpretaciones realizadas en exploración del subsuelo, en recolección de muestras de roca y suelo, ensayos in situ y de laboratorio, y en la condición de discontinuidades estructurales que puedan afectar la condición mecánica de los materiales presentes.
- Se deberán levantar columnas estratigráficas en rocas sedimentarias o en depósitos, cuya escala sea 10 veces más detallada que la escala requerida para el mapa geológico.
- Para la caracterización de las rocas y depósitos es necesario realizar la descripción macroscópica y petrográfica de las muestras, llevar a cabo ensayos geoquímicos de laboratorio que permitan conocer la composición química de los materiales (fluorescencia de Rayos X, espectrometría de

masas) con el objetivo de tener una caracterización de mayor precisión necesaria si se considera además que algunas unidades son fuente de materiales de construcción para las obras asociadas al proyecto.

- En el caso de rocas sedimentarias conformadas por partículas tamaño arcilla (arcillolitas/lodolitas) deberían realizarse ensayos mineralógicos como difracción de Rayos X – DRX que permitan identificar qué minerales constituyen dicha fracción, esto con el objetivo de identificar si existen o no arcillas con propiedades expansivas que afecten la estabilidad de las obras, en particular cuando dichas arcillas son usadas como material para la construcción de la presa.

- Adicionalmente, se recomienda para los criterios antes evaluados establecer un mínimo de ensayos por unidad geológica presente.

2. Geología estructural / Tectónica

Identificación y caracterización de estructuras locales y regionales, si las hay incluyendo, estructuras anticlinales y sinclinales, lineamientos fotogeológicos y diaclasas.

Se deberá presentar un análisis de rasgos tectónicos con base en la interpretación de diferentes tipos de imágenes y fotografías aéreas, en escalas regionales y semiregionales. Con base en ello se establecerán las frecuencias de direcciones y las zonas de máxima densidad de lineamientos.

Las fallas locales deberán ser caracterizadas (orientación, sentido, indicadores cinemáticos, ancho de zona de daño, brecha, etc.) y plasmadas cartográficamente.

Se deberán presentar análisis de microdeformación a partir de la caracterización de microfracturas (con frecuencias de direcciones) en secciones delgadas orientadas.

El macizo rocoso se debe caracterizar según Bieniawski (RMR) Marinos & Hoek (GSI) o cualquier metodología reconocida (para túneles se debe usar también el Q de Barton) y establecer la diferenciación de dominios estructurales, registrando mínimo 100 datos de discontinuidades (Hoek & Brown, 1990) por cada uno de ellos (deberá anexar registro de datos estructurales levantados en campo). Se deberán caracterizar los macizos también en términos de su capacidad hidrogeológica.

El responsable del estudio deberá complementar la información anterior con planos en planta, y las secciones transversales y longitudinales necesarias para el entendimiento del subsuelo tanto del área de influencia como de las zonas de construcción de presas, diques auxiliares, casas de máquinas, ataguías, túneles y en general todas las obras civiles que hagan parte del proyecto. Las secciones deberán ser construidas siguiendo todas las reglas de la geometría descriptiva con al menos una que incluya la máxima inclinación de la estratificación (en rocas sedimentarias) y la máxima pendiente topográfica. Las secciones deberán incluir la información superficial y aquella

producto de la exploración del subsuelo (directa e indirecta), representando los datos estructurales medidos en campo (que deberán ser corregidos cuando la dirección del perfil no corresponda con la dirección del buzamiento de las discontinuidades), la geología estructural, los patrones de fractura típicos, y los espesores de los materiales obtenidos en apiques, perforaciones y/o a través de geofísica y elementos geológicos de carácter regional, si éstos son esenciales para la conformación del modelo geológico-geotécnico local.

La caracterización de fracturas para sismogeneración deberá incluir el levantamiento de datos en planos estriados, planos con estilolitos y planos con plumas, de manera que se tenga una base local para la generación de diagramas de paleoesfuerzos.

GEOMORFOLOGÍA

En el segundo párrafo del capítulo de Línea base, en lo referente a este ítem se lee:

“En el área de localización de la infraestructura del proyecto se deben cartografiar de manera precisa los procesos de inestabilidad por remoción en masa e intervención antrópica (p. e. vías, rellenos, adecuaciones urbanísticas). Se debe efectuar un análisis multitemporal con base en interpretación de fotografías aéreas que permita evaluar la dinámica de dichos procesos sobre la base topográfica del EIA”.

La cartografía precisa debe incluir no solo los procesos de remoción en masa e intervención antrópica sino también los procesos erosivos.

Es necesario especificar que el análisis multitemporal debe incluir el análisis de la situación actual, el análisis de la situación más antigua y de acuerdo a la información disponible (fotografías aéreas e imágenes satelitales) debe ser decadal.

Luego menciona que *“El levantamiento geomorfológico con énfasis en la localización de los procesos de inestabilidad se debe presentar sobre la base topográfica del EIA”*

¿Cuál es esa escala? En ningún lugar de los términos de referencia hablan de una escala topográfica del EIA.

Teniendo en cuenta la magnitud de los procesos de remoción en masa, que en Colombia tienen un promedio de 20 metros de ancho (donde hay unos pequeños de 10 metros de ancho y otros grandes de hasta 200 metros de ancho), es conveniente que la escala de levantamiento de la cartografía de procesos sea tal que permita la identificación de procesos con 20 metros de ancho, por lo que se sugieren escalas 1:2000, sobre todo en la interpretación de la situación actual y en el trabajo de campo de lo contrario la escala del levantamiento de la información será la correspondiente a la escala de las fotografías aéreas interpretadas.

Luego se menciona:

“Con la anterior información se deben elaborar los siguientes mapas:

- *De pendientes.*

- De procesos morfodinámicos.
- De unidades geomorfológicas con énfasis en la morfogénesis y la morfodinámica.
- De susceptibilidad por la ocurrencia de procesos erosivos y de susceptibilidad ante procesos de remoción en masa.” (Subrayados fuera de texto)

De lo anterior es importante exigir un mapa de procesos morfodinámicos (procesos erosivos y de procesos de remoción en masa) para cada década analizada. Es decir que si se interpretan tres décadas deben entregarse tres mapas de procesos morfodinámicos. Y un mapa de procesos morfodinámicos completo.

Respecto al inventario morfodinámico, es importante hacer una caracterización de los procesos. Dicha caracterización debe incluir los siguientes parámetros: Área, Volumen, pendiente, material afectado (unidad geológica), descripción del material movido, humedad natural, presencia del nivel freático, tipo (deslizamientos, flujos, reptación), causas, fuente de la información (Fotografías aéreas, imagen satelital, DEM o campo), año de identificación, año de ocurrencia y una calificación de acuerdo a su actividad: Antiguo o reciente; Activo o Latente.

Respecto a las causas es importante llevar a cabo un análisis de las familias de discontinuidades (diaclasas o fracturas) que en conjunto con la orientación de las laderas generan zonas susceptibles a presentar procesos morfodinámicos.

Para aquellos procesos identificados únicamente en las fotografías aéreas antiguas la caracterización debe incluir al menos el área.

En este capítulo no se hace mención alguna a los eventos de torrencialidad o avenidas torrenciales, el cual es otro proceso morfodinámico que se identifica principalmente con base en registros históricos como noticias, así como con trabajo de campo.

Para el área de influencia debe hacerse un análisis de torrencialidad con base en la caracterización morfométrica de las unidades de análisis hidrográficas en conjunto con los inventarios de procesos morfodinámicos y avenidas torrenciales y su caracterización. Dichos eventos deben ser caracterizados en términos de velocidad del movimiento, volumen de material movido, distancia recorrida, y granulometría del material transportado.

Las avenidas torrenciales se caracterizan por presentar un transporte sólido muy elevado, de material fino en suspensión y de material grueso como carga de fondo. Se generan por causas hidrometeorológicas (lluvias concentradas), sísmicas (enjambres de deslizamientos cosísmicos), de inestabilidad de vertientes (bloqueo de un cauce por un deslizamiento y posterior ruptura del dique), o por erupciones volcánicas y deshielo o por acumulación de capas gruesas de cenizas

sueltas. Las avenidas torrenciales también se pueden presentar por otras causas como son deshielo al final del invierno o lluvias concentradas asociadas a ciclones tropicales¹.

Dichos eventos son importantes considerarlos pues representan una fuerza de empuje que debe ser considerada al momento de diseñar el embalse y que puede hacer peligrar la vida útil del proyecto.

Análisis de aspectos geomorfológicos en el capítulo 5.1.5. Hidrología.

En este capítulo se menciona que debe contener la siguiente información:

- “Identificar la dinámica fluvial de las fuentes que pueden ser afectadas por el proyecto, así como las posibles alteraciones de su régimen natural (relación temporal y espacial de inundaciones)”.

Respecto a la dinámica fluvial, debe especificarse una metodología. Dicha metodología debe consistir en un análisis multitemporal de fotografías aéreas o imágenes satelitales, así como un registro histórico (p.ej. mapas antiguos), con el fin de identificar los cambios espaciales de los cursos de agua en el tiempo (p. ej. Aparición o desaparición de barras longitudinales, migración de meandros, etc.) Así como la definición de zonas que históricamente se han inundado y podrían volver a inundarse.

Finalmente debe presentarse un mapa de susceptibilidad a inundaciones para diferentes periodos de retorno con el ánimo de identificar zonas que pudieran ser afectadas en una creciente o rotura de la presa. De igual forma la susceptibilidad a inundación debe considerar los escenarios sin presa y con presa, para garantizar la seguridad de la población que vive aguas abajo del proyecto en caso de una emergencia.

LA AUSENCIA DE REQUERIMIENTOS EN CUANTO A SISMICIDAD

La sismicidad es un aspecto clave en los estudios básicos con los cuales se debe contar para tomar decisiones sobre el emplazamiento, el diseño, la construcción y el monitoreo de una represa. Colombia es un país con buena parte de su territorio influenciado por la liberación de energía sísmica, correlativa a la construcción de cordilleras en márgenes activos. Además de lo anterior, los seres humanos realizamos actividades que generan sismos, entre ellas, la construcción de grandes embalses, las minas y actividades petroleras como reinyección de aguas. El problema de la sismicidad asociada con embalses ha sido considerado desde 1935 a partir del caso de Lake Mead (USA). (ICold², 2005).

¹ Arroyave S, Jaramillo L, & González J. (2009). Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas Revista Ingenierías Universidad de Medellín, volumen 8, No. 15, pp. 11-29 - ISSN 1692-3324

² ICold (2005). Reservoirs and seismicity. State of knowledge. ICold Committee on Seismic Aspects of Dam Design.

SISMICIDAD HISTÓRICA

Se deberán evaluar los sismos históricos en función de su relación con las fallas cartografiadas, locales o regionales y del eventual daño que pueden generar sobre las estructuras. Los sismos históricos deben ser descritos también en clave de la inducción de deslizamientos, flujos torrenciales o en general procesos denudativos o de transporte de masas que puedan disminuir la vida útil del embalse.

SISMICIDAD INSTRUMENTAL

Identificación de línea base: Es necesario contar con información sobre eventos sísmicos históricos y los registrados en el catálogo de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) a una distancia de 25 km alrededor del área de interés. Esta distancia está dada por la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente de 2010 (NSR-10), en la cual se considera que las fuentes sismogénicas cercanas a una construcción son las que se presentan a una distancia igual o menor a 25 km.

Esto se hará con el fin conocer la frecuencia de los eventos sísmicos y cuáles son las magnitudes promedio para diseñar el plan de monitoreo y contingencia en los cuales se contemplen las posibles afectaciones a las obras por la actividad sísmica de la zona.

Monitoreo sísmicos: Las empresas deberán adelantar un monitoreo sísmico antes, durante y después del procesos de llenado del embalse. El monitoreo debe iniciar mínimo dos años antes del llenado para poder hacer la comparación con los reportes de la Red Sismológica Nacional de Colombia y contribuir a una mejor claridad de la línea base de la zona de interés.

Para este monitoreo se deberá contar con un mínimo de estaciones portátiles alrededor del área a analizar. La cantidad de estaciones dependerá de la extensión del embalse y la actividad sísmica de la zona.

Con este monitoreo se esperará tener un conocimiento más detallado sobre la incidencia que tendrá el proyecto planteado con los posibles aumentos de eventos sísmicos en la zona y poder dar un adecuado seguimiento a los impactos que esto puede conllevar.

ESTUDIOS DE SISMOGENERACIÓN

Existe un acuerdo fundamental en términos de que las fallas geológicas deben ser caracterizadas de manera detallada y que son necesarios estudios de amenaza sísmica con el fin de tener insumos para las decisiones respecto al diseño y construcción de presas, en particular en zonas con sismicidad activa (ICold³, 1998; Allen & Cluff⁴, 2000; Mahdavian⁵, 2008) y para la misma decisión sobre si construir o no este tipo de estructuras.

³ ICold (1998). Neotectonics and dams. Guidelines and case histories. Bulletin 112.

De manera particular, el Comité Internacional de Grandes Presas (ICold), en su boletín 112 de 1998 establece criterios para definir la actividad de fallas geológicas y para su caracterización:

Las fallas activas neotectónicamente son aquellas cuya superficie de ruptura mas reciente ocurrió durante el Neógeno – Cuaternario (es decir, en los últimos 34 millones de años) mientras que las fallas activas recientes tienen rupturas en el Holoceno (en los últimos 12.000 años). Las fallas activas contemporáneas tienen evidencia histórica de rupturas en superficie.

Fallas donde no existan pruebas de que sean inactivas, deben ser consideradas como activas o potencialmente inactivas, especialmente en regiones de alta sismicidad (Wieland⁶ et al., 2008). De igual manera, ratifican los criterios de ICold (1998) de que si los depósitos del Holoceno se encuentran deformados por movimientos de falla, se considera una evidencia decisiva para establecer la actividad de la falla.

Es tan importante definir con base en estudios detallados (morfotectónicos, sismogénicos, estructurales, de datación, etc.) las fallas geológicas en las zonas de presa que ICold (1998) establece que “el reconocimiento y la aceptación de la existencia de fallas “capaces” en la fundación de la presa requiere de acciones drásticas. El sitio puede preferiblemente ser abandonado a favor de uno tectónicamente más estable.” Las razones planteadas por ICold en el documento para estudiar de manera profunda las fallas geológicas es que pueden tener los siguientes efectos:

- Actividad sísmica natural y actividad sísmica inducida con efectos de sacudimiento de las estructuras
- Efectos hidrogeológicos que incluyen la posible pérdida de almacenamiento
- Problemas de estabilidad de laderas
- Fenómeno de creep que puede influenciar los sitios de presa
- Ruptura de falla en la fundación de la presa que podrían ser de peligro para la seguridad de la presa

Como recomendaciones de ICold (1998) para estudiar las fallas geológicas se proponen varios niveles de estudio:

- Investigaciones regionales que cubran un radio de 150 a 200 km, con el fin de lograr un marco tectónico general del área de interés
- Investigaciones locales en un radio de 50 km identificando fallas geológicas cuya influencia es probablemente de consideración en la zona de presa
- Investigación de fallas que intersecten el sitio de presa, teniendo especial significancia en la estructura de la presa.

⁴ Allen, C.R. and Cluff, L.S., 2000. “Active Faults in Dam Foundations: An Update”, *Proceedings of 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, paper no. 2490, Auckland, New Zealand

⁵ Mahdavian, A. (2008). Rudbar Lorestan Dam Design and local Faults. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China

⁶ Wieland, M. (2008). ICOLD's revised seismic design and performance criteria for large storage dams.

SISMICIDAD INDUCIDA/DESENCADENADA

Según McGarr, Simpson & Seeber⁷ (2002):

- Las represas causan cargas considerables a la corteza y cambian totalmente la condición de las presiones de los fluidos dentro de las rocas. Tanto las cargas como los cambios de presiones se relacionan con condiciones para inducir sismicidad.
- Se ha comprobado que pequeños cambios en las presiones en la corteza terrestre pueden inducir o desencadenar sismos.
- Se desencadenan sismos por efecto de presas tanto en zonas tectónicamente activas como en zonas con baja actividad tectónica. Estos sismos pueden ser dañinos para los seres humanos.
- Los mecanismos de sismicidad inducida por grandes embalses son más complejos que los relacionados con hidrocarburos y minería. El área afectada es mucho mayor y puede haber cambios extensos en las fallas geológicas.
- El peso del embalse puede influenciar cambios en el régimen de esfuerzos, tanto normales como cortantes. Las presiones de poros se pueden incrementar instantáneamente por la compactación inducida por el peso.
- El cambio en el régimen de esfuerzos puede ser localmente amplificado en las fallas geológicas afectadas.

Con base en el conocimiento adquirido en las últimas décadas, la inducción/desencadenamiento de sismos relacionados con represas tiene las siguientes características (ICold, 2005):

- Los eventos sísmicos monitoreados durante y después del llenado del embalse son más frecuentes que la sismicidad base pre-existente.
- Con el incremento en el nivel de almacenamiento y con grandes oscilaciones en los niveles de embalse, la frecuencia y magnitud de los sismos inducidos/desencadenados, aumenta.
- En la mayoría de los casos los eventos inducidos/desencadenados tienden a reducirse después de un pico, hacia la actividad sísmica de fondo.

Debido a lo anterior, los TdR deben incluir la necesidad de establecer un monitoreo de la sismicidad inducida o desencadenada, desde antes del llenado hasta la operación y funcionamiento. ICold (2005) propone para el diseño del monitoreo de este ítem contar con la siguiente información:

- Condiciones tectónicas y datos de geología estructural, soportados en interpretación de imágenes y fotografías aéreas.
- Datos macrosísmicos pertinentes para el embalse en estudio.
- Información detallada de fallas activas en una región amplia y especialmente todos los datos disponibles acerca de actividad reciente de fallas geológicas en la región del embalse y la presa.
- Aproximación a la sismogeneración (*seismic capability*) de todas las fallas conocidas en la región del embalse y la presa
- Los regímenes del agua subterránea.

⁷ McGarr, A., D. Simpson & L. Seeber, 2002, Case histories of induced and triggered seismicity, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, vol. 81A, pp. 647-661, International Association of Seismology & Physics of the Earth's Interior.

El monitoreo instrumental debe incluir el arreglo de estaciones sísmicas que tengan la capacidad de detectar, registrar y localizar sismos leves, con magnitudes entre 1 y 5. Debe iniciar al menos dos años antes del embalsado con el fin de definir la sismicidad natural de fondo (ICold, 2005).

ASPECTOS HIDROCLIMÁTICOS

1. MONITOREO DURANTE EL LLENADO Y LA OPERACIÓN DE LA REPRESA

Para el monitoreo durante el llenado en el numeral 3.2.4.2 del capítulo 3 (descripción del proyecto) se señala lo siguiente⁸:

“Descripción de las etapas de llenado del embalse y de las pruebas que garantizarán el adecuado funcionamiento de cada una de las obras y componentes, de la central hidroeléctrica; así como la justificación de la época seleccionada para llevar a cabo el llenado⁹.”

Adicionalmente, en el numeral 5.1.5 (Hidrología) del capítulo 5 (Caracterización del área de influencia) en donde se señala lo siguiente¹⁰:

“Para los tramos en túnel, se debe presentar la siguiente información:

- Inventario detallado de todas las fuentes hídricas superficiales (lénticas y lólicas) que se encuentran en el área de influencia y de abatimiento del túnel, así como la posible conectividad con el mismo.*
- Análisis de la dinámica hídrica y las variaciones de su régimen natural, a partir de mediciones directas o información secundaria.*
- Estimación de los niveles y caudales característicos de las corrientes inventariadas, los cuales pueden ser obtenidos con base en información primaria y secundaria.*
- Presentar la localización de las corrientes y cuerpos de agua en relación con el túnel a escala 1:10.000 o más detallada.”*

Considerando que la etapa de llenado y la operación del embalse es la etapa más susceptible de impactar negativamente en los ecosistemas, se sugiere:

- Implementar un plan de monitoreo sistemático de niveles y caudales líquidos a la entrada y a la salida de la estructura que permite el flujo del caudal ecológico; este plan de monitoreo como mínimo tiene que tener una resolución temporal horaria.

⁸ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 27
⁹ Este requerimiento sólo aplica para proyectos con embalse.

¹⁰ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 43

- De manera paralela al plan de monitoreo de niveles y caudales líquidos, realizar la medición y/o estimación (correlación entre caudal líquido y caudal sólido) de los caudales sólidos a la entrada y a la salida de la estructura que permite el flujo del caudal ecológico; este plan de monitoreo como mínimo tiene que tener una resolución temporal horaria.

El principal objetivo de la elaboración de los planes de monitoreo en mención es brindar una herramienta que permita la toma de decisiones en la parte ambiental (afectaciones a ecosistemas) como en la parte de ingeniería (inestabilidad asociada a flujo de aguas subterráneas y sus interacciones con el agua superficial) para las etapas de llenado y operación de los proyectos hidroeléctricos.

2. CAUDAL ECOLÓGICO

Para el monitoreo durante el llenado en el numeral 3.2.4.2 del capítulo 3 (descripción del proyecto) se señala lo siguiente¹¹:

“Estimación de los caudales total, disponible y ambiental (...)”

Adicionalmente la estimación del caudal ecológico es abordado en el numeral 5.1.5¹² (Hidrología) en el capítulo 5 (Caracterización del área de influencia) y en el capítulo 7¹³ (demanda, uso, aprovechamiento y/o afectaciones de los recursos naturales) donde se señala lo siguiente:

“Estimar el caudal ambiental¹⁴ para el drenaje de intervención principal y cada uno de los puntos susceptibles de intervención por captación o vertimiento en aguas superficiales, implementar una metodología o conjunto de metodologías técnicamente validos que consideren y evalúen integralmente la alteración del régimen hidrológico natural (magnitud, duración, frecuencia, momento de ocurrencia, tasa de cambio), la calidad del agua, los usos y usuarios actuales y prospectivos y la funcionalidad y servicios provistos por los ecosistemas dulceacuícolas y conexos.”

De lo anterior se mencionan implementación de metodología o conjunto de metodología, más sin embargo no se indica el numero de metodologías a implementarse. Acorde con investigaciones (Camacho, Pinilla , & Rodriguez, 2013), (Parra, 2012), entre otros, existen múltiples metodologías para la estimación del caudal ecológico de tipo: I) hidrológico II) hidráulico III) simulación de hábitat fluvial IV) metodologías holísticas.

¹¹ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 27

¹² MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 43

¹³ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 96

¹⁴ Una vez el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible publique la guía metodológica para la estimación del caudal ambiental en Colombia, se deberán aplicar los criterios y lineamientos allí definidos.

Se sugiere que se evalúe como mínimo el caudal ecológico por tres (3) metodologías distintas y se seleccione aquella metodología que se ajuste mejor con el caso de estudio, esto en función de la información disponible.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA HIDROLOGÍA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA

Tomando como referencia el numeral 5.1.5 (Hidrología) en el capítulo 5 (Caracterización del área de influencia), se tienen las siguientes observaciones y/o sugerencias:

“Identificar Sistemas lénticos y lóticos, así como zonas de recarga potencial de acuíferos, identificados a escala 1:10.000, o de mayor detalle, con su respectiva toponimia.”¹⁵

Se sugiere que se especifique claramente las escalas de detalle cuando es menor a 1:10.000, esto en función del área de influencia directa (AID)

“Espacializar las variables climáticas referidas a: precipitación media anual y mensual; temperatura media, máxima y mínima mensual y anual y otras estimadas a partir de estas variables como la evapotranspiración potencial y real anual y mensual. Para la estimación de la evapotranspiración potencial y real considerar las metodologías que sean aplicables a las características climáticas regionales en función de la información disponible.”¹⁶

Se sugiere que se evalúe como mínimo la evapotranspiración potencial y real por tres (3) metodologías distintas y se seleccione aquella metodología que se ajuste mejor con el caso de estudio, considerando que esta es una variable que presenta grandes incertidumbres a la hora de sus estimación y adicionalmente es fundamental para la cuantificación del agua superficial disponible al interior del área de impacto directa (AID) e indirecta (AII).

4. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA

Con base en el numeral 5.1.5.10.1 (información meteorológica) en el capítulo 5 (Caracterización del área de influencia), análogamente que en lo estipulado en el numeral 5.1.5 se requiere:

“Hacer el análisis de la calidad de los datos hidroclimáticos que incluya pruebas estadísticas paramétricas y/o no paramétricas sobre homogeneidad, consistencia e identificación de datos anómalos; de ser posible, hacer el completado de las series, indicando claramente el método adoptado y efectuar la caracterización estadística básica de las series de tiempo tratadas”¹⁷.

¹⁵ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 42.

¹⁶ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 42.

¹⁷ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 56

Adicionalmente es necesario que se efectúen análisis de ciclo diurno, anual, decadal e interdecadal (acorde con la información disponible), esto con el propósito de establecer una línea base representativa (escenario sin proyecto) considerando que los proyectos hidroeléctricos con embalse pueden modificar las condiciones de microclima según (Wang, Shikiu, & Lassoie, 2013)¹⁸, (IJWREM, 2012)¹⁹, entre otros.

Finalmente en el plan de manejo ambiental y plan de monitoreo se requiere la implementación de estaciones climáticas principales (monitoreo de precipitación, temperatura, radiación solar, brillo solar y humedad relativa). El número de estaciones estará acorde con el área del AID, estas tiene que tener como mínimo con una resolución temporal horaria para realizar un monitoreo representativo del microclima una vez implementado el proyecto.

5. AMENAZA Y ZONAS DE AFECTACIÓN.

Para la identificación de eventos amenaza en los numeral 10.1.3.2 del capítulo 10 (planes y programas) se señala lo siguiente²⁰:

“Se deben identificar y describir acciones y/o actividades externas o asociadas al proyecto que puedan generar eventos amenazantes dentro del área de influencia. Asimismo, se deben establecer los hechos o eventualidades que se puedan presentar configurándose como siniestros.

A partir de la caracterización realizada para el área de influencia y con la información correspondiente a las actividades propias del proyecto (tanto constructivas como operativas).”

Para la identificación de eventos amenaza en los numeral 10.1.3.3 del capítulo 3 (descripción del proyecto) se señala lo siguiente²¹:

“Se deben determinar las áreas de posible afectación (tanto directas como indirectas) para cada evento amenazante identificado en cada una de las etapas del proyecto, definiendo y georreferenciando dichas áreas para los escenarios identificados, con base en la vulnerabilidad (sensibilidad) de los medios abiótico, biótico y socioeconómico que pudiesen ser afectados o sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente.

¹⁸ Wang, P., Shikiu, D., & Lassoie, P. (2013). The large dam dilemma: An exploration of the impacts of hydroprojects on people and environment in China.

¹⁹ IJWREM. (2012). Hydrological impacts of dams: A review.

²⁰ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 129

²¹ MADS-ANLA. Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. 2016. Pág 130

Los resultados del análisis deben ser cartografiados en un mapa de riesgos que integre la zonificación de los eventos amenazantes y la identificación de los elementos vulnerables (sensibles), en escala 1:25.000 o más detallada, según corresponda al área de influencia del proyecto. Se deben presentar la(s) metodología(s) utilizada(s).”

Se requiere indicar explícitamente la necesidad de la elaboración de un estudio detallado (como mínimo escala 1:5000) de amenaza de origen endógena asociado con la eventual ruptura de al represa por parte del solicitante (dado que este tipo de proyectos se configuran como una amenaza adicional para los ecosistemas , poblaciones e inmuebles situadas aguas abajo).

Este estudio debe analizar el caso más crítico con base en criterios de tiempo (tiempo asociado al caudal pico) y tipo de falla (e.g tubificación, “overtopping”, entro otros).

ASPECTOS DE HIDROGEOLOGÍA

Observaciones a la Línea Base propuesta en los TdR

- La caracterización y mención de acuíferos tienen un componente muy sesgado, en este caso el estudio de las propiedades hidráulicas debe realizarse en un contexto amplio.
- En general en todos los componentes es necesario definir unos mínimos de información levantada por el solicitante, esto garantiza que la construcción del modelo conceptual sea con base en datos de campo. Además, no hay requerimientos en cuanto a geofísica.
- El contexto regional debe hacer más enfoque en el sistema de fallas y su relación con el embalse. Esto para estudiar dentro de los impactos la sismicidad inducida.
- El fracturamiento y la caracterización de Macizo rocoso es indispensable en especial en la zona del vaso, esto para hacer un detalle de la caracterización del medio fracturado e hidráulica con características de flujo preferencial. En el caso de que el grado de fracturamiento no sea relevante se debe justificar adecuadamente.
- La pruebas hidráulicas son necesarias en toda el área de influencia, realizándolas en diferentes zonas geológicas o con condiciones mecánicas variadas.
- Al incluir el tema de la sismicidad inducida el análisis y la caracterización geofísica debe tener otra profundidad de investigación y resolución lateral.

Propuestas para ampliar los requerimientos de los TdR

Las siguientes son las sugerencias para complementar las exigencias en la caracterización hidrogeológica. Es de resaltar que las especificaciones dadas para el caso en que por demanda o uso son idóneos para unidades someras y los aquí presentados son términos más generales en cuanto a la evaluación de otras afectaciones y amenazas.

- En el caso de que se presente fracturamiento, será necesario realizar una caracterización de macizo rocoso en el área del vaso o zona a inundar. Adicionalmente, se debe comparar con resultados obtenidos a otras escalas (fotografías aéreas, imágenes de satélite, mapas de sombras DEM), en el análisis se busca definir zonas con flujo preferencial y definir

zonas en donde realizar pruebas hidráulicas. En cada tipo de muestreo de fracturas o lineamientos se debe garantizar incertidumbres de menos del 30%.

- En los estudios geofísicos se debe vincular información detallada con profundidades importantes de investigación, es decir, dependiendo de la ubicación considerar información proveniente de sector petrolero, como por ejemplo líneas sísmicas procesadas o por procesar. Esto permitirá hacer una caracterización geofísica a profundidades mayores a las centenas de metros.
- Se debe realizar una prospección geofísica de detalle en la zona donde se ubican las estructuras (presa, diques) y zonas en donde se identifique procesos morfodinámicos con posibilidad de aporte al vaso del embalse. La profundidad de investigación debe garantizar 50m de profundidad y caracterización adecuada de las variaciones laterales, por ejemplo tomografías eléctricas. En el caso de tener procesos con espesores de mayor espesor considerar otras metodologías de exploración con mayor capacidad de penetración (por ejemplo sondeos electromagnéticos) en donde se aceptará menor calidad en la evaluación de las variaciones laterales.
- Realizar pruebas hidráulicas en toda el área de influencia en función del número de unidades geológicas existentes y las condiciones de deformación de las mismas. Estas pueden ser pruebas de corta duración (ensayos tipo *Lugeon* o *slug test*) de tal forma que se evalúe las propiedades hidráulicas (conductividad y capacidad de almacenamiento) a varios niveles. Los sitios de exploración deben tener en cuenta los resultados de la exploración indirecta y la caracterización geológica. Como mínimo y en vista de que son pruebas de corta duración se espera un de 1 prueba por cada 10m a diferentes niveles en la perforación.
- Realizar pruebas hidráulicas de larga duración (pozo simple o con pozos de monitoreo), se debe estimar la conductividad hidráulica, capacidad de almacenamiento e interconexión con otras capas. las pruebas de larga duración deberá realizar de preferencia en zonas como zonas con flujos preferenciales, siendo ideal el desarrollo de la prueba con varios pozos de monitoreo para hacer comparación de los parámetros obtenidos. Se debe realizar como mínimo una prueba por unidad geológica.
- Realizar pruebas de infiltración en función de la escala de trabajo para caracterizar la capacidad de infiltración de las unidades recientes y los procesos morfodinámicos.
- En el caso de identificar fallas y una red de flujo preferencial, con base en el inventario de puntos y los análisis de fracturamiento regionales (lineamientos, estudios de fallas, secciones sísmicas), se realizara un muestreo de isotopos estables e hidrogeoquímico para estudiar la posibilidad de interconexión de cuencas y posibles flujos preferenciales de gran escala.
- Construir modelos hidrogeológicos conceptuales regionales considerando la posible generación de flujos preferenciales asociados a zonas de deformación.
- Con la información detallada de procesos morfodinámicos y área de las estructuras se construirá modelos numéricos para poder evaluar tubificación y posibilidad de remoción en masa por cambios en los niveles freáticos.

CALIDAD DEL AGUA

Capítulo 5.1.6 Calidad del agua

En este capítulo se presenta la relación de los parámetros fisicoquímicos que se deben medir para caracterizar los cuerpos de agua. La clasificación de estos se realiza según el uso y aprovechamiento del agua durante el desarrollo del proyecto. Se plantean dos escenarios: el primero por uso del agua mediante concesiones y el segundo por vertimientos de aguas domésticas, no domésticas y en el cuerpo de agua receptor.

Ahora bien, esta diferenciación entre usos del agua implica la medición de determinados parámetros que son presentados en los TDR y que cubren la totalidad de parámetros de importancia fisicoquímica y bacteriológica. Sin embargo, llama la atención que la medición de metales y metaloides queda a discreción de la empresa, ya que el Ministerio señala que:

“(...) Estos parámetros son de medición opcional, de acuerdo con los usos del suelo en el área”.

Más adelante menciona:

“(...) Nota: Se debe realizar el análisis de metales pesados teniendo en cuenta las características de la calidad fisicoquímica de las aguas a verter, como mínimo se deben medir: Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Cromo hexavalente, Mercurio, Selenio y Vanadio.”

Por lo anterior no hay claridad en lo señalado por la autoridad ambiental; primero indicándolo como opcional y luego refiriéndose a solo unos cuantos metales y metaloides que no cubren la totalidad de parámetros que es descrita en el capítulo 5.1.6.

La importancia en la medición de metales tiene varios componentes. Primero, durante la etapa de construcción será necesario emplear material aluvial o de cantera para la construcción de la presa y otras obras conexas, material que puede contener metales pesados. Segundo, es común la construcción de plantas de fabricación de cemento y otros materiales, que generan emisiones de material particulado que puede ser transportado grandes distancias y contener trazas de metales y metaloides –dependiendo del tipo de combustible empleado-. Este material particulado durante el lavado atmosférico puede llegar a los ríos introduciendo nuevos agentes tóxicos contenidos en él. Tercero, es necesario el uso de combustible para la movilización de toda la maquinaria pesada, combustibles que pueden contener trazas de metales y metaloides, que pueden llegar a los ríos por eventuales derrames o manejos inadecuados de aguas de escorrentía.

Otro momento importante donde los metales y metaloides salen a relucir, es la etapa de llenado y operación. Durante esta etapa, la amenaza más grande a la calidad del agua es la disminución en

el contenido de oxígeno del río objeto de desviación tanto aguas arriba, aguas abajo como en el embalse. Esta eventual disminución o variabilidad extrema en el contenido de oxígeno puede acelerar los procesos de liberación de tóxicos, entre los que se destacan los metales pesados contenidos en los sedimentos acumulados principalmente aguas arriba y en el embalse. De la misma forma, condiciones particulares de pH y temperatura pueden acelerar estos procesos (Li Haiyan *et al*, 2013²²). Por tanto, es apremiante la **medición de metales y metaloides** tanto en las fuentes para concesión de agua, vertimientos de toda naturaleza (doméstica y no doméstica) y en cuerpos receptores de vertimientos y que sea considerado de **obligatorio cumplimiento** su medición.

7.3.2 Vertimientos en suelos

La **no reglamentación en el país** en lo relativo al suelo entendido como la determinación de su calidad y las condiciones fisicoquímicas óptimas para distintos usos; bien sea agrícola, forestal, entre otros, condiciona aún más las actividades que sobre este se desarrollen y que puedan causar daños al mismo. A esta consideración de la **inexistencia de normativa ambiental**, se suma la generalidad con la que se definen las actividades a realizar dentro de cualquier proyecto hidroeléctrico desarrollado en el país en lo relativo a vertimientos directos al suelo. Por ejemplo, donde se menciona la caracterización fisicoquímica del área, debe exigirse un análisis más completo de composición fisicoquímica del suelo antes del vertimiento, en la medida en que puedan detectarse posibles excesos de nutrientes o desequilibrios geoquímicos que puedan ser alterados por la interacción de los componentes naturales del suelo con sustancias potencialmente tóxicas que le serán introducidas.

10.1.2 Plan de Seguimiento y Monitoreo

Dentro de lo consignado en los TDR se indica que deben ser considerados para el plan de seguimiento y monitoreo de los componentes ambientales: *“Criterios para el análisis e interpretación de resultados”*. No obstante, no se describe mayor detalle en esta exigencia. Es importante que sea mucho más desarrollada en el sentido de facilitar el acceso a la información, no solo a la entidad ambiental sino al público en general en formatos adecuados para un análisis estadístico que permita identificar tendencias y variabilidad temporal de las condiciones ambientales del medio. Además, debe ser exigido dentro del programa de monitoreo la entrega de bases de datos históricas que faciliten y respondan con los demás requerimientos de presentar indicadores cuantitativos que permitan observar los cambios y alteraciones en el medio y ver los impactos acumulativos que el proyecto está causando en el ambiente.

²² Li Haiyan et al (2013). Effect of pH, Temperature, Dissolved Oxygen, and Flow Rate of Overlying Water on Heavy Metals Release from Storm Sewer Sediments. Journal of Chemistry Volume 2013 (2013), Article ID 434012, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/434012>.

GEOTECNIA

El numeral en cuestión hace una lista de los requisitos mínimos necesarios para dar cumplimiento al capítulo de geotecnia. En éste se habla de estudios detallados de agua subterránea, modelos geológicos, análisis de los sitios de presa y zona de embalse. Ahora bien, toda esta información pide ser compilada en cartografía 1: 10:000. Esta escala no permite el análisis detallado de condiciones específicas de estabilidad de laderas, flujos de agua y demás procesos que se indican en los requerimientos respecto a la geotecnia.

Excluyendo la zona puntual de presa, toda la zona del embalse y zonas aledañas pueden ser susceptibles a procesos de inestabilidad. Los procesos de inestabilidad cerca de embalses ha sido ampliamente estudiado y ha habido casos en los que éstos, los procesos de inestabilidad en laderas cercanas, han acusado problemas de grandes magnitudes. Por lo anterior se recomienda que siempre, en cada caso que se tengan obras de estas envergaduras se realicen estudios detallados de estabilidad de laderas en las áreas de influencia del embalse. En este sentido se considera apropiado marcar la Resolución 227 de 2006 *“Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C.”* Esta resolución da un marco mínimo requerido para los análisis de estabilidad que a la luz de la poca normativa vigente en el país al respecto, se considera pertinente su aplicación.

En términos generales en Colombia hay normativa que podría aplicarse para el requerimiento detallado de estudios y de información asociada con la geotecnia que se podría utilizar. En primera medida se encuentra la Norma sismo Resistente Colombiana del 2010, en cuyo caso se presentan los requerimientos mínimos para obras de infraestructura dependiente de su nivel de complejidad. Adicionalmente también enumera los análisis requeridos de capacidad de carga de los suelos, límites permisibles de deformaciones en las estructuras propuestas y planes de control de los modelos planteados.

Por otro lado se encuentra el código de Diseño de Puentes que este año entregó su última versión y que, en términos generales, corresponde un avance en el estado del arte respecto a la necesidad del detalle en los estudios geotécnicos. Este código también brinda una base sólida de mínimos requeridos para la cuantificación de exploración y al direccionamiento de los análisis requeridos para el correcto diseño de las estructuras propuestas.

DEMANDA USO O AFECTACIÓN

- Aguas subterráneas

Los requerimientos son mucho más detallados y específicos en el caso de que se haga explotación de unidades geológicas con capacidad de producción importante de agua. Este tipo de

caracterización más detallada debe orientarse también en la caracterización de procesos morfodinámicos o zonas en las que se ubique la represa para evaluar la posibilidad de tubificación.

- Materiales de construcción

No hay seguimiento de la hidrogeología (niveles piezométricos, características hidráulicas, etc.). Esta caracterización es igual de importante que la caracterización de los vertimientos en suelos.

EVALUACIÓN DE IMPACTOS Y RIESGOS

Al igual que el caso de la línea base, si no se especifica los impactos mínimos a evaluar es muy posible que estos sean ignorados y no sean considerados luego en el PMA o en la evaluación del riesgo y la amenaza.

La evaluación de impactos no hace mención a cambios en niveles freáticos y posibles afectaciones en los procesos morfodinámicos. De igual forma, el tema de sismicidad inducida es uno de los impactos más graves pero no se hace mención a este. Esta inexistencia de acotación hace que la caracterización de la línea base pueda llegar a ser muy débil.

PLAN DE DESMANTELAMIENTO Y ABANDONO

El plan de desmantelamiento y abandono carece del componente de geotécnico y de riesgo asociado a las estructuras que acá se dispusieron. Este plan de abandono debería ser muy similar a los planes de abandono de minas. En las cuales se genera todo un manejo de riesgo asociado no solo a los componentes ambientales sino también a asegurar la estabilidad de las obras que se dejarán abandonadas, en ese sentido se deberán realizar análisis para que las obras remanentes no sean un foco de riesgo latente.

En este punto la Resolución 227 de 2006 que aplica para la ciudad de Bogotá en temas de riesgo puede ser acogida en todo sentido, siendo pertinente tenerla en cuenta en lo referente a estudios básicos, zonificación geotécnica, zonificación de amenaza por remoción en masa y factores de seguridad.

PLAN DE GESTIÓN DEL RIESGO

El plan de gestión del riesgo, en cuanto a geotecnia se refiere, se considera que es necesario lo consignado en los numerales correspondientes. Pero también se consideran insuficientes en su alcance y nivel de detalle de los estudios requeridos.

La práctica común en el diseño de presas, es que las presas en sí no fallan, pero la realidad es todo lo contrario, las presas si falla y en muchos casos por la suma de errores tanto en el diseño como en la toma de la información base que es insumo fundamental para el diseño. Es por tal motivo

que en cada caso se debería disponer de un estudio detallado de las implicaciones que una falla súbita podría generar en el entorno y de esta forma disponer de sistemas de mitigación de dicho riesgo y sistemas de alerta temprana. Lo anterior teniendo claro que de entrada esto corresponde a una posibilidad plausible que debe ser considerada.

Un seguimiento adecuado del riesgo como por ejemplo deslizamiento y tubificación (colapso de la presa) es imposible sin una adecuada línea base o caracterización detallada del área de influencia. Al igual que el caso de la línea base, si no se especifica los impactos mínimos a evaluar es muy posible que estos sean ignorados y no sean considerados luego en el PMA o en la evaluación del riesgo y la amenaza.

La evaluación de impactos no hace mención a cambios en niveles freáticos y posibles afectaciones en los procesos morfodinámicos. De igual forma, el tema de sismicidad inducida es uno de los impactos más graves pero no se hace mención a este. Esta inexistencia de acotación hace que la caracterización de la línea base pueda llegar a ser muy débil.

Es necesario complementar los términos en los ítems de amenaza y riesgo, así:

- Estudiar la posibilidad de tubificación en la presa o estructuras como diques.
- Estudiar los cambios de niveles freáticos inducidos por el llenado de la presa en la zona del vaso y su relación con los procesos morfodinámicos. Con base en estos resultados y en los casos en donde por las condiciones de estabilidad (Factores de seguridad cercanos a 1) no sean favorables realizar un monitoreo e instrumentación con piezómetros.
- Los escenarios de modelación deberán tener en cuenta la evaluación hidrológica en consideraciones como lluvias pico e infiltración esperada (Resultados de modelos lluvia escorrentía).
- Realizar un monitoreo de la sismicidad inducida.

Análisis de aspectos geomorfológicos en el capítulo 10.1.2 Plan de Seguimiento y Monitoreo

En este numeral es indispensable incluir como mínimo lo siguiente:

El seguimiento a los niveles freáticos aguas arriba del embalse. Esto es importante ya que un aumento del nivel freático, implica un aumento en la presión de poros y por ende una mayor ocurrencia de procesos morfodinámicos que generarían mayor sedimentación y disminuirían la vida útil del proyecto.

El monitoreo de los procesos morfodinámicos identificados en el análisis multitemporal. Con esto se determina la actividad y velocidad de los mismos y se establecen medidas de acción en caso de su reactivación o activación de nuevos procesos. Esto es importante pues permite crear un **sistema de alertas tempranas** para prevenir o mitigar los posibles efectos, por ejemplo la ocurrencia de tsunamis. Como el ocurrido en el embalse de Vaiont en 1963 en el norte de Italia en donde un deslizamiento generó un efecto en cadena. Inicialmente se desencadenó el

deslizamiento, luego la masa deslizada generó un tsunami, y finalmente el tsunami sobrepaso la presa.²³

Instrumentación para monitoreo de sismicidad

Se deberá instalar una red de sismológica para el monitoreo de sismicidad inducida antes, durante y posterior al llenado. Esta red estará conformada por sismómetros de banda ancha y registro en tres componentes. Se espera un mínimo de cinco estaciones ubicadas alrededor del embalse ubicados en un área de influencia de 50 km. Como mínimo se deberá empezar el monitoreo de la sismicidad 2 años antes para realizar calibración con la red sismológica nacional y eventos de bajo tiempo de retorno. Aunque no es determinante, un análisis de probabilidad de ocurrencia da indicios de sismicidad inducida.

²³ Ward & Day (2010), The 1963 landslide and flood at Vaoint reservoir Italy. A tsunami ball simulation. Ital.J.Geosci.vol 130, No. 1.

Bibliografía

Allen, C.R. and Cluff, L.S., 2000. "Active Faults in Dam Foundations: An Update", Proceedings of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, paper no. 2490, Auckland, New Zealand

Arroyave S, Jaramillo L, & González J. (2009). Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas Revista Ingenierías Universidad de Medellín, volumen 8, No. 15, pp. 11-29 - ISSN 1692-3324

Boonstra J, Soppe R (2007) Well hydraulics and aquifer Tests, en Handbook of Groundwater Engineering (Dlleur JW ed.). 2nd ed., CRC Press

Brady, Brown (2005) Rock Mechanics for underground mining. Kluwer academic publishers

Camacho, L. A., Pinilla, G., & Rodriguez, E. A. (2013). *Propuesta metodológica preliminar para la estimación de caudal ambiental en proyectos licenciados por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS), Colombia.*

Haskov J, Alguacil G (2010) Instrumentation in earthquake seismology, Springer.

Hoek, E. & Brown, E. (1990). Underground excavation on rock. Institute of Mining and Metallurgy.

ICold (2005). Reservoirs and seismicity. State of knowledge. ICold Committee on Seismic Aspects of Dam Design.

ICold (1998). Neotectonics and dams. Guidelines and case histories. Bulletin 112.

IJWREM. (2012). *Hydrological impacts of dams: A review.*

Li Haiyan et al (2013). Effect of pH, Temperature, Dissolved Oxygen, and Flow Rate of Overlying Water on Heavy Metals Release from Storm Sewer Sediments. Journal of Chemistry Volume 2013 (2013), Article ID 434012, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/434012>.

McGarr, A., D. Simpson & L. Seeber, 2002, Case histories of induced and triggered seismicity, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, vol. 81A, pp. 647-661, International Association of Seismology & Physics of the Earth's Interior.

MADS-ANLA. *Términos de referencia para la elaboración de impacto ambiental en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica.* 2016.

Mahdavian, A. (2008). Rudbar Lorestan Dam Design and local Faults. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China

Parra, E. (2012). *Modelamiento y manejo de las intercciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales*. UNAL.

Singhal, Gupta (2010) *Applied hydrogeology of fractured rocks*. 2nd ed., Springer

Wang, P., Shikiu, D., & Lassoie, P. (2013). *The large dam dilemma: An exploration of the impacts of hydroprojects on people and environment in China*.

Ward & Day (2010), The 1963 landslide and flood at Vaoint reservoir Italy. A tsunami ball simulation. *Ital.J.Geosci*.vol 130, No. 1.

Wieland, M. (2008). ICOLD's revised seismic design and performance criteria for large storage dams.