



CPS No. 1020 DE 2016

APOYO AL DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN PARA EL FORTALECIMIENTO DE LOS PROCESOS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL EMBALSE DEL QUIMBO

Cumplimiento de la obligación contractual 5

Recopilación y verificación de estudios sobre sismicidad natural e inducida y su efecto sobre el área de influencia del proyecto El Quimbo

Elaborado 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 (a)
Andrés Castillo, Ingeniero Civil Esp. Recursos hidráulicos
David Aponte, Ingeniero civil MSc. Geotecnia (a)
Erika Cuida López, Geóloga
Angie Ramírez Huerta, Geóloga
Daniela Mateus Zabala, Geóloga
Juan Francisco Díaz González, Geólogo
Javier Valencia, Ingeniero Civil



Con la colaboración de los miembros del Grupo de Investigación Geoambiental TERRAE

José Sebastián Gómez Romero, estudiante de Geología
Vivian González Aldana, estudiante de Geología
Jeremy Audrey León, estudiante de Geología
Xiomara Triana Parra, estudiante de Geología
Nathalia Cerón Espejo, estudiante de Geología
María Alejandra Ramos Gámez, estudiante de Geología

Bogotá D.C, 25 de diciembre de 2016

CONTENIDO

SISMICIDAD NATURAL E INDUCIDA Y SU RELACIÓN CON EL RIESGO Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL	5
1 ASPECTOS CONCEPTUALES	5
1.1 LA DEFORMACIÓN TECTÓNICA Y SU RELACIÓN CON LA SISMICIDAD.....	6
1.1.1 <i>Esfuerzo – deformación</i>	7
1.2 SISMICIDAD NATURAL	12
1.3 SISMICIDAD INDUCIDA/DESENCADENADA.....	14
2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE DOCUMENTOS.....	15
2.1 ANÁLISIS DE LA DOCUMENTACIÓN REMITIDA POR EMGESA A LA ANLA	15
2.1.1 <i>Estudio de impacto ambiental (Emgesa – Ingetec, 2008)</i>	15
2.1.2 <i>Análisis del Estudio de Impacto Ambiental (EIA)</i>	19
2.1.3 <i>EMGESA – Ingetec (2009). Evaluación de la amenaza sísmica del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Documento PHEQ-DGEO-DOC-0190.</i>	21
2.2 OFICIO DE MINAMBIENTE AL SENADOR ALEXANDER LÓPEZ POR POSIBLES DAÑOS AMBIENTALES EN LA ZONA DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO QUIMBO (MAVDT, 2011)	26
2.3 INFORME DE ACTUACIÓN ESPECIAL A LA ANLA EN EL SEGUIMIENTO A DENUNCIAS CIUDADANAS PARA EXIGIR EL CUMPLIMIENTO DE OBLIGACIONES AMBIENTALES EN LA ACTUAL CONSTRUCCIÓN DE HIDROELÉCTRICAS-2013 (CGR, 2014) ..	27
2.4 RESOLUCIÓN 759 (ANLA, 26 DE JUNIO DE 2015).....	30
2.5 INFORME DE AUDITORÍA. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES – ANLA VIGENCIA 2015 (CGR, JUNIO DE 2016).	37
3 ASPECTOS DE AMENAZA SÍSMICA NO CONSIDERADOS POR EMGESA	40
3.1 TECTÓNICA Y SISMOGENERACIÓN	40
3.2 SISMICIDAD HISTÓRICA.....	48
3.3 SISMICIDAD INSTRUMENTAL. ANÁLISIS DE LOS SISMOS REGISTRADOS EN EL CATÁLOGO DE LA RED SISMOLÓGICA NACIONAL DE COLOMBIA (RSNC).....	55
3.4 INSTRUMENTACIÓN	58
3.5 INCERTIDUMBRE EN LA UBICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LA FUENTE	61
4 IMPLICACIONES EN AMENAZA Y RIESGO DE LAS OMISIONES EN LA CARACTERIZACIÓN DE FALLAS GEOLÓGICAS.....	63
4.1 SISMICIDAD NATURAL	63
4.2 SISMICIDAD INDUCIDA.....	67
5 CONCLUSIONES	72
6 RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS CITADAS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE GEODINÁMICA DEL NORTE DE LOS ANDES, QUE MUESTRA LA SUBDUCCIÓN DE LAS PLACAS DEL CARIBE Y NAZCA BAJO LA PLACA SUDAMERICANA	7
FIGURA 2. CAMPO DE ESFUERZOS TENSIONALES, COMPRESIVOS Y TRANSCURRENTES O DE CIZALLA	7
FIGURA 3. ESQUEMA DE FALLA NORMAL, CON CAMPO DE ESFUERZOS CORRESPONDIENTES Y CON SIMBOLOGÍA PARA SU REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA	8
FIGURA 4. ESQUEMA DE FALLA INVERSA, CON CAMPO DE ESFUERZOS CORRESPONDIENTES Y CON SIMBOLOGÍA PARA SU REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA	9
FIGURA 5. ESQUEMA DE FALLAS LATERALES, O DE RUMBO, CON CAMPO DE ESFUERZOS CORRESPONDIENTES Y CON SIMBOLOGÍA PARA SU REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA TANTO EN PLANTA COMO EN PERFIL	9
FIGURA 6. ESQUEMA DE FALLA OBLICUA.	10
FIGURA 7. CAMPO DE ESFUERZOS TENSIONALES, COMPRESIVOS Y TRANSCURRENTES O DE CIZALLA	11
FIGURA 8. ESQUEMA DE CAMPO DE ESFUERZOS DE TENSIÓN Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS MAGNITUDES DE LOS ESFUERZOS (NORMAL Y CORTANTE) EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO θ COMPARADOS CON LA MAGNITUD DEL CORTANTE NECESARIO PARA LA RUPTURA	12
FIGURA 9. TRES MANERAS DE INDUCIR RUPTURAS EN MACIZO ROCOSO	13
FIGURA 10. CUADRO SOBRE LA CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS COMO FUENTES SÍSMICAS EN EL PROYECTO EL QUIMBO	20
FIGURA 11. FALLA DE ALGECIRAS Y RELACIÓN CON SISMICIDAD HISTÓRICA Y RECIENTE.	42
FIGURA 12. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA ENTRE GIGANTE Y TERUEL	43
FIGURA 13. ESQUEMA MORFOTECTÓNICO DE ALINEAMIENTOS Y DE FALLAS INFERIDAS PARA LA ZONA DE ESTUDIO	44
FIGURA 14. PLANO DE FALLA MESOSCÓPICA DE CARÁCTER SINISTRAL SOBRE CONGLOMERADOS DE LA FM. GUALANDAY	45
FIGURA 15. PLANO DE FALLA MESOSCÓPICA DE CARÁCTER DEXTRAL	45
FIGURA 16. SOLUCIÓN TEÓRICA DE ESFUERZOS PARA LA ZONA DE PRESA DE EL QUIMBO CON BASE EN MEDICIÓN DE FALLAS MESOSCÓPICAS CON RASGOS CINEMÁTICOS	46
FIGURA 17. SOLUCIONES TEÓRICAS DE ESFUERZOS CON BASE EN MECANISMOS FOCALES	48
FIGURA 18. DISTRIBUCIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS REPORTADOS EN EL CATÁLOGO DE LA RSNC	55
FIGURA 19. CANTIDAD DE EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS POR LA RSNC, SEÑALANDO LA INSTALACIÓN DE ESTACIONES CERCANAS AL ÁREA DE ESTUDIO	56
FIGURA 20. DETALLE SOBRE LA FRECUENCIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS A PARTIR DE 2008, MOSTRANDO LOS EVENTOS QUE SE CONSIDERAN PODRÍAN MODIFICAR SU COMPORTAMIENTO NORMAL	56
FIGURA 21. CANTIDAD DE EVENTOS SÍSMICOS REPORTADOS POR LA RSNC DIFERENCIADOS POR PROFUNDIDAD	57
FIGURA 22. CANTIDAD DE EVENTOS SÍSMICOS REPORTADOS POR LA RSNC DIFERENCIADOS POR MAGNITUD	57
FIGURA 23. MODELOS DE VELOCIDADES DE ONDA P	59
FIGURA 24. ESPECTRO TEÓRICO DE AMPLITUDES DE LAS VELOCIDADES PARA UN EVENTO DE MAGNITUD MOMENTO DE -1 (FRECUENCIA DOMINANTE DE 200 Hz) Y UNA MAGNITUD MOMENTO DE 1 (FRECUENCIA DOMINANTE DE 20 Hz)	61
FIGURA 25. SUBESTIMACIÓN DE MAGNITUD DEL SISMO PARA UN GEÓFONO DE 15Hz, UN ACCELERÓMETRO DE 3Hz Y UN SISMÓMETRO DE 10 s DE PERÍODO	62
FIGURA 26. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA LOCALIZACIÓN, PARA UN ARREGLO VERTICAL EN POZO CON DIFERENTE NÚMERO DE SENSORES DE TRES COMPONENTES	63
FIGURA 27. ZONAS DE DEFORMACIÓN CUATERNARIA A LO LARGO DE LA FALLA DE ALGECIRAS	65
FIGURA 28. SOLUCIONES TEÓRICAS DE ESFUERZOS TECTÓNICOS	66
FIGURA 29. UBICACIÓN DE SISMOS DESENCADENADOS/INDUCIDOS POR REPRESAS	71

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. NIVEL DE ACTIVACIÓN DE LOS ACELERÓGRAFOS	36
TABLA 2. ALARMA Y RIESGO ASOCIADO A MOVIMIENTOS TELÚRICOS PARA EL PROYECTO EL QUIMBO.....	37
TABLA 3. COLAPSO DE PRESAS POR SISMO.....	66

SISMICIDAD NATURAL E INDUCIDA Y SU RELACIÓN CON EL RIESGO Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Uno de los aspectos más importantes a considerar en el diseño y construcción de grandes represas es la sismicidad, tanto la de carácter natural relacionada con el movimiento de las fallas geológicas (sismos tectónicos) o de los magmas en zonas de vulcanismo (sismos y tremores volcánicos) como la sismicidad inducida o desencadenada¹ por el emplazamiento de un gran volumen de agua que genera cambios en la distribución de los esfuerzos que existen en la corteza (Wang & Manga², 2010).

En el presente documento se revisan los documentos o los apartes que al respecto ha remitido la empresa Emgesa, así como las observaciones de entidades como la ANLA y la Contraloría General de la República. La revisión de los documentos tendrá información nacional e internacional de contexto, destacándose los boletines generados por el Comité Internacional de Grandes Represas (ICold, por sus siglas en inglés), que para cualquiera sería una de las principales referencias de una empresa seria que construya represas.

1 ASPECTOS CONCEPTUALES

Los seres humanos realizamos actividades que generan sismos, entre ellas, la construcción de grandes embalses, las minas y actividades petroleras como reinyección de aguas. Según McGarr, Simpson & Seeber³ (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 es más compleja que la relacionada con hidrocarburos y minería. El área afectada es mucho mayor y pueden haber cambios extensos en las fallas geológicas.

¹ En este documento se usarán indistintamente las palabras inducida/desencadenada a pesar de que el estado del arte al respecto define que la inducción se refiere a sismos causados por actividades humanas en zonas con pocos o ningún antecedente de sismicidad y que el desencadenamiento se refiere al aumento de sismicidad en su periodicidad o magnitud en zonas sísmicamente activas.

² Wang, C. & Manga, M. (2010). Earthquakes and Water. Lecture notes in Earth Sciences. Springer.

³ McGarr, A., Simpson, D. & Seeber, L. (2002). Case Histories of Induced and Triggered Seismicity. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Volume 81a. International Assoc. Seismology & Physics Earth's Interior, Committee on Education.

- 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.

Es importante tener en cuenta que la geología estructura, que se refiere a los esfuerzos y deformaciones tectónicas que afectan las rocas, es de vital importancia a la hora de hacer el análisis sobre la hidrogeología, geomorfología, aspectos geotécnicos y amenazas sísmicas presentes en la zona de interés, ya que va a dar información relevante con la que se podrá identificar zonas de recarga por fracturamiento, zonas de inestabilidad por la disposición de las diferentes familias de fracturas, cuáles son las fallas que se encuentran activas y que pueden constituirse en fuentes sísmicas, entre otros.

Por ello, se considera que si este ítem presenta falencias los demás componentes geosféricos tendrán problemas, tal como lo da a entender Wallace (1975) en Lisle, R., et al. (2011)⁴ “La geología básica todavía tiene que venir primero – y si está mal, todo lo que sigue estará probablemente equivocado”

La caracterización de las fallas geológicas incluye mediciones de campo (toma de datos con brújula, medición de *breakouts* en pozos petroleros) e interpretación de información de subsuelo como un soporte necesario para el establecimiento de los modelos geológicos en zonas de actividad tectónica, en particular para la definición la relación fallas geológicas / sismogeneración. Todo ello se debe enmarcar en información regional con base en la interpretación de diversos tipos de imágenes (modelos digitales de elevación, *google earth* y fotografías aéreas).

1.1 LA DEFORMACIÓN TECTÓNICA Y SU RELACIÓN CON LA SISMICIDAD

La cordillera de Los Andes es muy compleja geológicamente y dentro de esa complejidad, Colombia tiene aspectos muy particulares que la hacen diferente al resto de Suramérica: existen tres ramales cordilleranos separados por valles profundos y bien definidos, la subducción y el vulcanismo relacionados no operan para todo el país y la subducción de la placa del Pacífico bajo la Sudamericana tiene componentes de cizalla que generan una deformación oblicua reportada por investigadores como Ujueta, Kammer, Fierro & Ángel, entre otros.

Por ello es necesaria la rigurosidad en el estudio de las fallas geológicas cuando se está tratando un megaproyecto y en particular el embalse de una cantidad gigantesca de agua, pues la presencia de zonas saturadas relacionadas con las fallas, con grandes porosidades secundarias que se extienden a las profundidades sismogénicas es de importancia fundamental en el entendimiento de la sismogeneración (Wang & Manga, 2010).

⁴ Lisle, R., Brabham, P., & Barnes, J. (2011). Basic Geological Mapping. Wiley-Blackwell – A Jhon & Sons, Ltd., Publication

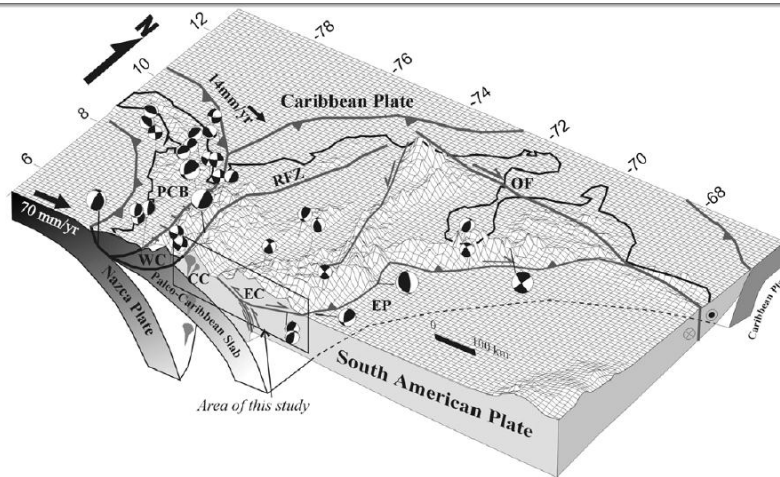


FIGURA 1. ESQUEMA DE GEODINÁMICA DEL NORTE DE LOS ANDES, QUE MUESTRA LA SUBDUCCIÓN DE LAS PLACAS DEL CARIBE Y NAZCA BAJO LA PLACA SUDAMERICANA (CORTÉS, M., COLLETTA, B. & J. ANGELIER⁵, 2006)

1.1.1 Esfuerzo – deformación

Los esfuerzos tectónicos se dan en marcos tridimensionales, en los cuales existen tres ejes de esfuerzos denominados principales y que se denotan con la letra griega sigma minúscula (σ) y los subíndices 1, 2 y 3 para los mayores, intermedios y menores, respectivamente. Si se tienen tensores que actúan en sentido contrario, se crea tensión, pero si actúan de manera convergente, se tiene compresión; también existen esfuerzos transcurrentes donde la deformación predominante se da en la horizontal.

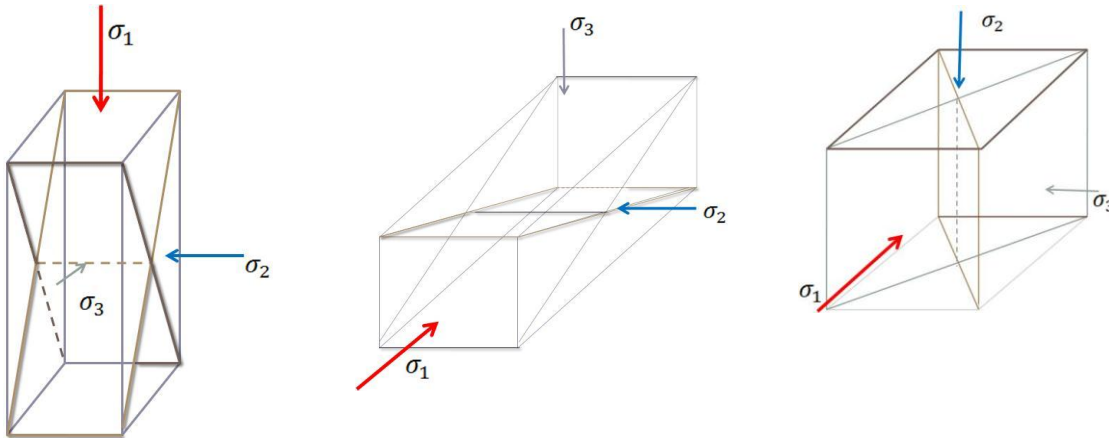


FIGURA 2. DE IZQUIERDA A DERECHA: CAMPO DE ESFUERZOS TENSIONALES, COMPRESIVOS Y TRANSCURRENTES O DE CIZALLA. NÓTESE QUE CORRESPONDEN A CADA UNA DE LAS POSIBILIDADES DE ESTADOS DE ESFUERZO PUROS. BUENA PARTE DE LOS CAMPOS DE ESFUERZOS REALES CORRESPONDEN A COMBINACIONES ENTRE TRANSURRENCIA Y TENSÓN (QUE DA LUGAR A FALLAS TRANSSTENSIVAS) Y TRANSURRENCIA Y COMPRESIÓN (CON FALLAS TRANSPRESIVAS). TOMADO DE NOTAS DE CLASE PROF. FÉLIX HERNANDEZ.

Debido a que los tipos principales de fallas geológicas tienen la misma función en lo que se refiere a la deformación y es lograr simultáneamente extensión y contracción. En el

⁵ Cortés, M., Colletta, B. & J. Angelier, 2006. Structure and tectonics of the central segment of the Eastern Cordillera of Colombia. Journal of South American Earth Sciences 21 (4), 437-465

contexto tectónico de esfuerzos tensionales predominan fallas normales, en donde se acomodan extensiones en la horizontal y acortamientos en la vertical. Los esfuerzos compresivos dan lugar a contracciones en la horizontal y acortamientos (a través de apilamientos) en la vertical. Para el caso de fallas de rumbo (o laterales), tanto las contracciones como las extensiones se dan en la horizontal.

- Deformación tectónica

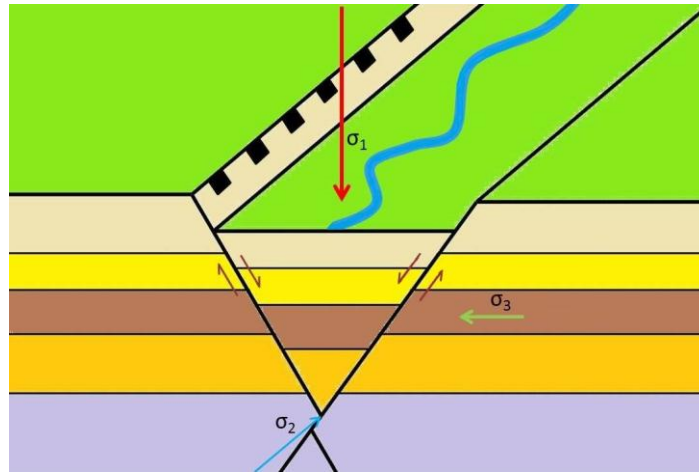


FIGURA 3. ESQUEMA DE FALLA NORMAL, CON CAMPO DE ESFUERZOS CORRESPONDIENTES Y CON SIMBOLOGÍA PARA SU REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA (LÍNEA CON DIENTES RECTANGULARES DIRIGIDOS HACIA DONDE SE INCLINA EL PLANO DE FALLA). TOMADO DE FIERRO⁶ (2014)

Es importante entender que las fallas y fracturas asociadas a campos de esfuerzos tensionales o transtensivos tenderán a estar abiertas y que los que se asocian a compresión, a estar cerradas. Las fallas normales pueden entenderse mejor a partir de la visualización del siguiente esquema, en donde los bloques ubicados por encima de los planos de falla (bloques colgantes) se deslizan hacia abajo y por lo tanto, se consigue la extensión o alargamiento en la horizontal. Los planos de falla conjugados son oblicuos en perfil, pero paralelos en planta.

⁶ Fierro, J. (2014). Estudio geológico, geomorfológico y de aspectos hidrogeológicos para la declaración del Parque Natural Nacional Serranía de San Lucas. Informe interno Parques Nacionales Naturales.

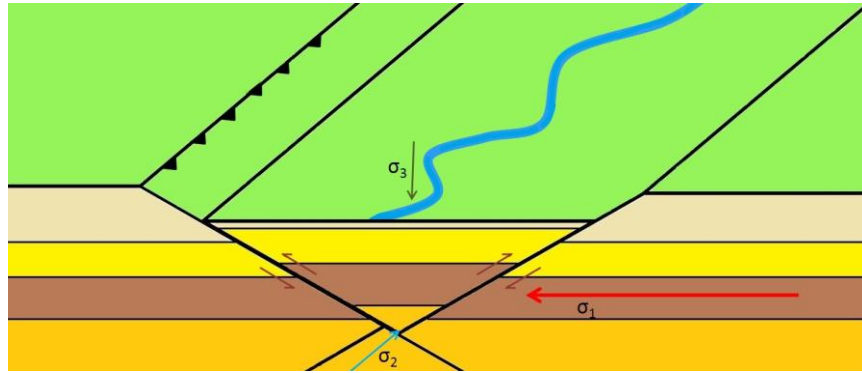


FIGURA 4. ESQUEMA DE FALLA INVERSA, CON CAMPO DE ESFUERZOS CORRESPONDIENTES Y CON SIMBOLOGÍA PARA SU REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA (LÍNEA CON DIENTES TRIANGULARES DIRIGIDOS HACIA DONDE SE INCLINA EL PLANO DE FALLA). TOMADO DE FIERRO (2014).

Las fallas típicas asociadas a sistemas de esfuerzos compresivos son fallas inversas o cabalgamientos, en donde tanto las fallas como las fracturas relacionadas tienden a poseer bajas aperturas. Aquí, el bloque ubicado por encima del plano de falla (colgante) se desliza hacia arriba, generando acortamientos o contracciones en la horizontal. Los planos de falla conjugados son oblicuos en perfil, pero paralelos en planta.

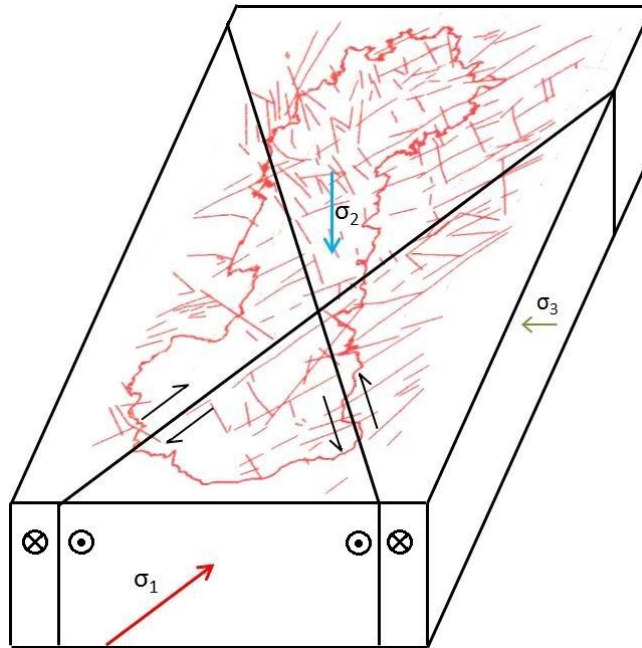


FIGURA 5. ESQUEMA DE FALLAS LATERALES, O DE RUMBO, CON CAMPO DE ESFUERZOS CORRESPONDIENTES Y CON SIMBOLOGÍA PARA SU REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA TANTO EN PLANTA (LÍNEA CON FLECHAS DE DIRECCIÓN) COMO EN PERFIL (CÍRCULOS QUE CONTIENEN PUNTO O CRUZ). TOMADO DE FIERRO⁷ (2014)

⁷ Fierro, J. (2014). Estudio geológico, geomorfológico y de aspectos hidrogeológicos para la declaración del Parque Natural Nacional Serranía de San Lucas. Informe interno Parques Nacionales Naturales.

De igual manera, que un régimen de esfuerzos predominantemente transcurrente puede generar zonas de deformación por cizalla muy amplias. En este régimen, los movimientos no son verticales, sino horizontales, a lo largo de planos de falla verticales. En planta, los planos conjugados no son paralelos, sino que se cruzan de manera oblicua, siendo el movimiento en uno de ellos dextral (en sentido horario o lateral derecho) y en el otro sinistral (en sentido anti-horario o lateral izquierdo)

En el marco de la zona de estudio, además de la importancia sobre sismogeneración natural, es importante la caracterización detallada sobre los esfuerzos que actúan pues permiten relacionar la hidrogeología y la sismicidad inducida, dado que la inclinación de las fallas y la tensión o compresión son elementos importantes para el entendimiento de los procesos que llevan a activar fallas.

- Fallas oblicuas

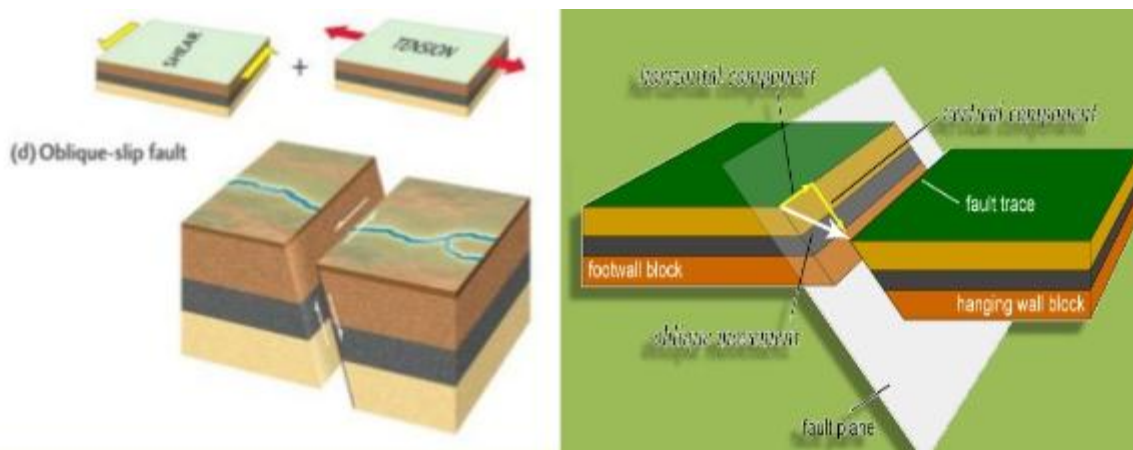


FIGURA 6. ESQUEMA DE FALLA OBLICUA. TOMADO DE WWW.METED.UCAR.EDU.

En los apartes anteriores se describen fallas que corresponden a campos de esfuerzos “puros”, en el sentido de que los tres ejes de dicho campo son perfectamente horizontales o verticales. No obstante, ese es un caso excepcional en la naturaleza y la mayor parte de los campos tienen desviaciones respecto a la horizontal y la vertical. En esos casos, se tienen esfuerzos donde se conjugan los movimientos en el rumbo (transcurrentes) y en la vertical (tensionales o compresivos) generando campos transtensivos (transcurrentes y tensionales) o transpresivos (transcurrentes y compresionales) que se expresan en fallas oblicuas que combinan carácter normal y de rumbo o inversa y de rumbo respectivamente.

- Conjugación de fallas

Otro concepto importante son los conjuntos conjugados de fallas que se intersectan en ángulos agudos, cercanos a 60° en materiales típicos de corteza. Para un sistema de esfuerzos tensional las fallas conjugadas serán aproximadamente paralelas en planta, al igual que para esfuerzos compresivos. Para el caso de esfuerzos transcurrentes, las conjugadas son oblicuas, con una de ellas correspondientes a fallas dextral (los bloques se mueven unos con respecto a los otros en sentido horario) y la otra a falla sinistral (los bloques se mueven unos con respecto a otros en sentido anti-horario).

La direcciones de las fallas, las inclinaciones de sus planos (buzamientos) y el campo de esfuerzos que las definen se pueden expresar en redes estereográficas, dando lugar a “balones de playa”, en los cuales las contracciones se expresan en color blanco y las extensiones en un color diferente, usualmente gris o negro. Estos esquemas representan tanto las mediciones con brújula de planos de falla como las soluciones de mecanismos focales que se obtienen con la detección de ondas sísmicas generadas por un sismo y detectadas por una estación sismológica.

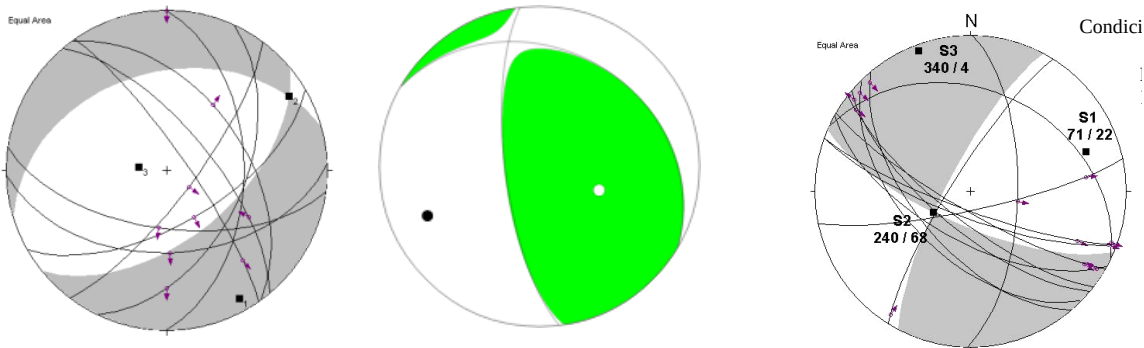


FIGURA 7. DE IZQUIERDA A DERECHA: CAMPO DE ESFUERZOS TENSIONALES, COMPRESIVOS Y TRANSCURRENTES O DE CIZALLA. LOS BALONES DE PLAYA (FORMALMENTE DIAGRAMAS DE ESFUERZOS) CORRESPONDIENTES A FALLA NORMAL Y A FALLAS LATERALES (O DE RUMBO) SE GENERARON A PARTIR DE LA MEDICIÓN EN CAMPO DE PLANOS ESTRIADOS EN LA SABANA DE BOGOTÁ (FIERRO MORALES & ÁNGEL AMAYA⁸, 2008) Y EL DE FALLA INVERSA SE GENERÓ A PARTIR DE LOS DATOS GENERADOS POR LA LLEGADA DE ONDAS SÍSMICAS MEDIDAS EN SISMÓGRAFO EN UNA ZONA CERCANA A SAN ALBERTO (CESAR), CON DIAGRAMA GENERADO POR EL USGS.

- Mecánica de la sismicidad

El desplazamiento en cualquier tipo de falla geológica –inversa, normal, lateral (de rumbo) u oblicua- puede generar sismo por liberación de energía. La fricción en las fallas es usualmente inestable y el movimiento ocurre rápidamente como una ruptura que se propaga dinámicamente sobre el plano de falla. Los movimientos repentinos generan ondas sísmicas y este es el mecanismo más común e importante para la ocurrencia de sismos, que pueden ser entendidos como los fenómenos de escala rápida de la tectónica de materiales frágiles.

A pesar de simplificaciones en los modelos dinámicos de ruptura que proveen el entendimiento de los procesos físicos subyacentes, la complejidad de los sismos es considerable debido al carácter no planar de las superficies de ruptura, su heterogeneidad en cuanto a materiales que genera anisotropías y las discontinuidades pre-existentes, entre otras, razón por la cual es deseable observar las características generales de las rupturas.

La medida tradicional de un sismo es la magnitud, que es una escala logarítmica basada en la amplitud de una onda sísmica específica medida en una frecuencia particular, ajustada para la distancia y la respuesta del instrumento.

⁸ Fierro Morales, J. y Ángel-Amaya, A. (2008). Tectónica activa y sismicidad en la Sabana de Bogotá, Colombia-Suramérica. Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Lima, Perú.

1.2 SISMICIDAD NATURAL

La sismicidad ocurre cuando los esfuerzos actuantes en las rocas exceden un valor crítico que causa su ruptura. Los fluidos influyen la ruptura al cambiar el régimen de esfuerzos. Es necesario establecer que los macizos rocosos tienen tres fases: sólida, líquida y gaseosa y cada una de ellas se relaciona con esfuerzos, los sólidos (esfuerzos efectivos) y los relacionados con líquidos y gases se unifican en presión de fluidos. Los esfuerzos totales son la suma de los esfuerzos efectivos y las presiones de fluidos y los cambios en ellos pueden llegar a generar rupturas que se relacionan a su vez con sismicidad.

En la Figura 8, tomada de Wang & Manga (2010) se ilustran esfuerzos sobre un bloque de roca, donde además de los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 existen también esfuerzos normales (σ_n) y tangenciales (τ) al plano de ruptura y es este último, también denominado cortante el que tiene que superarse para que se produzca la ruptura. Las relaciones entre los distintos tipos de esfuerzos se pueden ilustrar con el Círculo de Mohr, donde se puede ver un estado posible de esfuerzos y una envolvente de ruptura o falla (failure envelope).

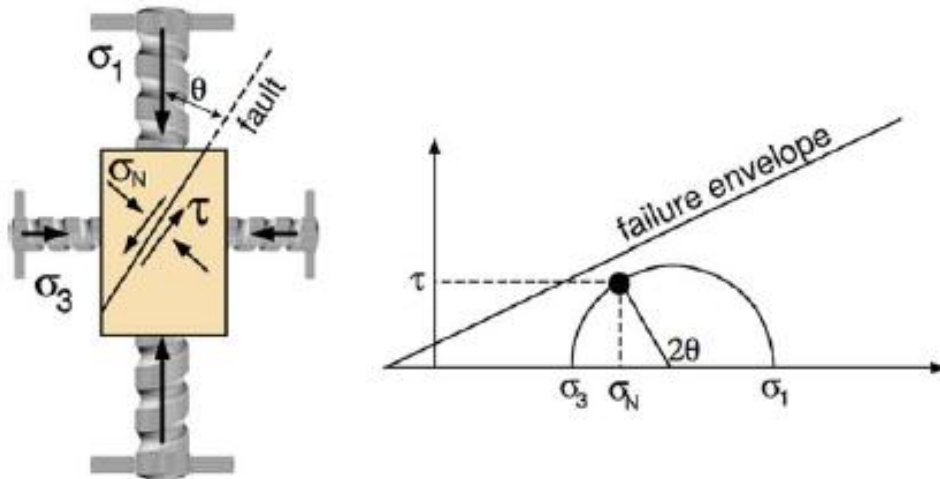


FIGURA 8. A LA IZQUIERDA ESQUEMA DE CAMPO DE ESFUERZOS DE TENSIÓN DONDE EL POTENCIAL PLANO DE RUPTURA TIENE UN ÁNGULO θ RESPECTO AL ESFUERZO PRINCIPAL MAYOR. A LA DERECHA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS MAGNITUDES DE LOS ESFUERZOS (NORMAL Y CORTANTE) EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO θ COMPARADOS CON LA MAGNITUD DEL CORTANTE NECESARIO PARA LA RUPTURA (DEBE TOCAR LA ENVOLVENTE). TOMADO DE WANG & MANGA⁹ (2010)

Si se cambia el estado de los esfuerzos, el círculo puede acercarse a la envolvente y en el momento en que el cambio sea tal que el círculo toque la envolvente, se producirá la ruptura y el movimiento sobre el plano creado. El movimiento ocurrirá cuando el cortante iguale o exceda la suma de los esfuerzos friccionales resultantes del producto del coeficiente de fricción (ϕ) por el esfuerzo normal (σ_n) sumados a la cohesión (c):

$$\tau = c + \phi \sigma_n$$

Esta ecuación es usualmente denominada criterio de falla de Mohr – Coulomb.

⁹ Wang, C. & Manga, M. (2010). Earthquakes and Water. Lecture notes in Earth Sciences. Springer.

El efecto de la presión de fluidos en la ruptura se entiende al recordar que dicha presión (p) hace parte de los esfuerzos que actúan en el macizo rocoso, usando el concepto de esfuerzos efectivos de Terzaghi, introducido por este ingeniero en 1925 para suelos y recogido por Hubbert & Rubey en 1959. Dado que la presión de fluidos actúa uniformemente en todas la direcciones, cada esfuerzo principal puede ser influenciado de la misma manera por la presión de fluidos:

$$\sigma' = \sigma - \alpha p$$

Donde σ' corresponde a los esfuerzos efectivos, σ a los esfuerzos totales y p a la presión de fluidos. El factor α , llamado coeficiente Biot-Willis, mide la facilidad con que la presión en el fluido se transmite a la masa rocosa, y es cercano a 1 para materiales no litificados y puede ser menor a 0,5 en rocas (Wang, 2000 en Wang & Manga, 2010).

La Figura 9 muestra tres maneras de inducir rupturas:

- Incrementando el esfuerzo principal mayor (σ_1) de manera que aumenta el radio del círculo de Mohr hasta que toca la envolvente de falla
- Disminuyendo el esfuerzo principal menor (σ_3) de manera que aumenta el radio del círculo de Mohr hasta que toca la envolvente de falla
- Incrementando la presión de poros de tal manera que el círculo de Mohr se desplaza hacia la izquierda y toca la envolvente de falla que es equivalente a mantener el esfuerzo cortante y disminuir el esfuerzo normal.

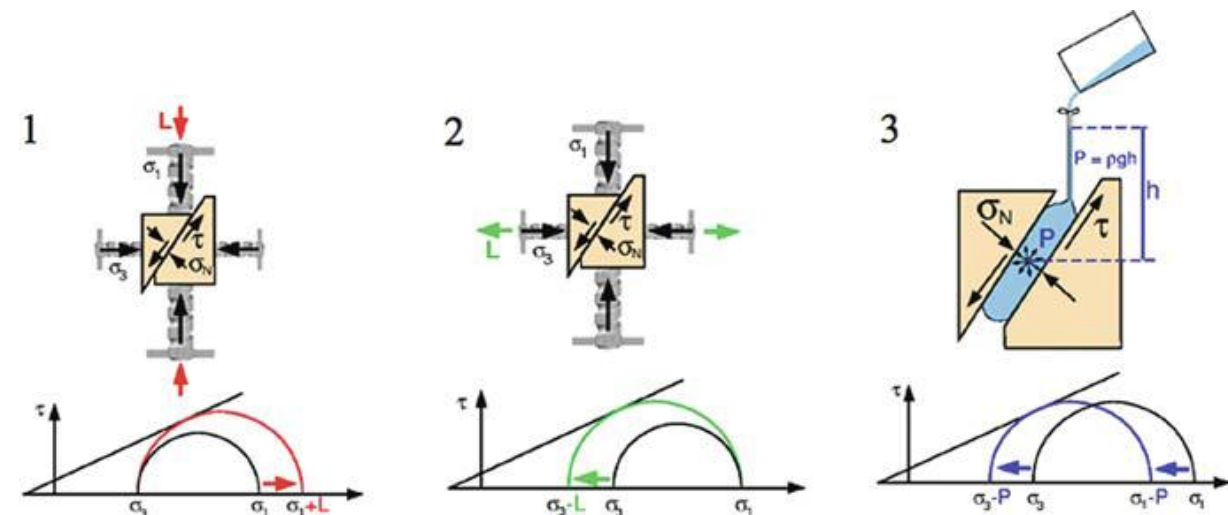


FIGURA 9. TRES MANERAS DE INDUCIR RUPTURAS EN MACIZO ROCOSO: A LA IZQUIERDA AUMENTO DEL ESFUERZO PRINCIPAL MAYOR. AL CENTRO: DISMINUCIÓN DEL ESFUERZO PRINCIPAL MENOR. A LA DERECHA: INCREMENTO EN LA PRESIÓN DE FLUIDOS QUE REDUCE LOS ESFUERZOS EFECTIVOS. TOMADO DE SAAR Y MANGA (2003) EN WANG Y MANGA (2010)

La tercera de las maneras de generar ruptura es muy importante en el estudio de sismicidad inducida/desencadenada por represas puesto que el embalse genera aumentos en la presión de fluidos en fracturas y fallas geológicas.

Existen dos maneras en que un embalse pueda generar sismicidad: el peso propio del agua que eventualmente genera aumento en el esfuerzo principal mayor y también por el aumento de la presión de aguas. Es probable que existan diferencias en cuanto a la susceptibilidad que cada tipo de falla pueda presentar ante la susceptibilidad inducida, especialmente si se da por el aumento en la presión de fluidos. Como ya se anotó algunas fallas ocurren en contextos de tensión o de transtensión, que generan fracturas y fallas abiertas que permiten la acumulación de aguas y en ellas sería más probable un aumento en la presión de fluidos.

Se reitera que los estudios que han sido presentados por Emgesa no contienen una clasificación soportada de los tipos de fallas geológicas presentes en la zona y por tal razón no existen los soportes suficientes para una mejor comprensión de la sismicidad inducida. A lo largo del documento se reiterará en este aspecto por el carácter completamente vital que tiene en el análisis de riesgos sobre poblaciones humanas y ecosistemas.

1.3 SISMICIDAD INDUCIDA/DESENCADENADA

El embalse con agua se ha relacionado con sismos y se ha documentado desde que se construyen grandes presas (Carder¹⁰, 1945; Gupta¹¹, 1992, Simpson, 1986, Gupta¹², 2002, Wang & Manga¹³, 2010). Estos sismos no se asocian únicamente a regiones con actividad tectónica y por ello se denominan “inducidos”. Gupta (2002) notó que los esfuerzos causados por la carga de los embalses es del orden de 0,1 MPa, que no constituye una carga considerable, no obstante estas cargas se han relacionado con inducción/desencadenamiento de sismos a lo largo y ancho del mundo.

En cuanto a magnitud, pueden llegar a 7,9 (sismo de Wenchuan en China en 2008, documentado entre otros por Kerr & Stone¹⁴, 2009) y se ha relacionado su ocurrencia con el incremento en 0,01 a 0,05 MPa dentro de los 3 años de llenado del embalse, lo cual demuestra que un incremento tan bajo como 0,01 MPa en el esfuerzo de ruptura de Coulomb es significativo en una zona con esfuerzos naturales críticos (King et al., 1994 y Freed, 2005 en Wang y Manga, 2010). El peso del agua incrementa tanto los esfuerzos como las presiones de poros, lo cual también se relaciona con la orientación de las fallas y el campo de esfuerzos locales que determinarán dónde y cómo pueden reactivarse las fallas (Roeloffs, 1998, en Wang y Manga, 2010).

Todos estos antecedentes ponen de relevancia la necesidad de buenos estudios sismotectónicos para la construcción de represas.

¹⁰ Carder, D. (1945). Influence of reservoir-loading on earthquake-activity in the Boulder dam area. American Geophysical Union

¹¹ Gupta, H. (1992). Reservoir-induced Earthquakes. Developments in Geotechnical Engineering, 64. Elsevier

¹² Gupta, H. (2002). A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India

¹³ Wang, C. & Manga, M. (2010). Earthquakes and Water. Lecture notes in Earth Sciences. Springer.

¹⁴ Kerr, R. & Stone, R. (2009) A Human Trigger for the Great Quake of Sichuan?. Science, Vol. 323 (5912).

2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE DOCUMENTOS

Las resoluciones y modificaciones posteriores a la licencia otorgada mediante resolución 0899 de 2009 hacen nula referencia al aspecto de sismicidad inducida en parte por inexistencia del requerimiento en los términos de referencia HE-TER-1-01. La sismicidad inducida fue abordada en detalle gracias a la actuación especial de la Contraloría General de la Republica (CGR, 2014) con fecha de publicación de septiembre de 2014 y posteriormente acotada por la ANLA en la resolución 0759 del 26 de junio de 2015. No obstante, tanto en el Informe sobre proyectos hidroeléctricos de la CGR como en el presente documento, se tiene constancia de los incumplimientos que a este respecto continúa presentando la empresa Emgesa.

2.1 ANÁLISIS DE LA DOCUMENTACIÓN REMITIDA POR EMGESA A LA ANLA

2.1.1 Estudio de impacto ambiental (Emgesa – Ingetec, 2008)

2.1.1.1 Geología Estructural (numeral 3.2.1.1.4 del EIA)

En el EIA se encuentra la descripción de 12 fallas geológicas, de las cuales se considera que siete (7) son las que se encuentran en la zona del embalse o tienen influencia sobre ella. Estas corresponden a las fallas Pitalito-Garzón-Algeciras, Suaza, Balseadero – Matarambo, Jerusalén, Rioseco, La Jagua y Tarquí, definidas como se muestra a continuación (EMGESA - INGETEC)¹⁵:

“Falla Pitalito – Garzón – Algeciras: Es una falla de cabalgamiento de carácter regional, localizada al oriente de la zona de estudio (...) Presenta una orientación general N40-50°E y buzamiento al E (...) Algunos autores la definen con movimiento dextral. La distancia más corta que la separa del sitio de la presa es de 17 km aproximadamente (...) El salto de falla varía entre los 2.500 y 6.000 m, y su edad es terciaria; presenta evidencias de actividad neotectónica. (...) Esta falla es la que presenta el mayor desplazamiento en tiempos recientes (...) Se considera que esta falla presenta actividad media.” (subrayados fuera de texto)

“Falla Suaza: Es una falla inversa de carácter regional, localizada al sur de la zona de estudio, donde presenta orientación general N10-60°E y termina contra la Falla de Pitalito - Garzón - Algeciras; presenta buzamiento fuerte al Este, del orden de los 60 grados; con el bloque oriental levantado y el bloque occidental hundido. El extremo norte del trazo, está separado del sitio de presa por una distancia aproximada de 40 km (...) El salto de falla varía entre 1000 y 6000 m. La edad es terciaria y presenta evidencias de actividad reciente o neotectónica” (subrayados fuera de texto)

“Falla Balseadero – Matambo: Es una falla inversa de mediana extensión que se desprende de la Falla de Pitalito - Garzón - Algeciras (...) En general presenta rumbos de N10-40°E y N-S, con buzamiento fuerte al este de 70-90 grados. El bloque oriental está levantado y el bloque occidental hundido. La distancia más corta al sitio de presa es de 4 km (...) El salto de falla es variable oscilando entre los 200 y 800 m. La edad es terciaria y presenta evidencias de actividad”

¹⁵ EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 3.2-9 a 3.2-17

neotectónica (...) Sobre el trazo de esta se encontraron tres evidencias de actividad reciente que muestran desplazamientos hasta de 1,8 metros en un lahar depositado hace 100 000 años. También se encontraron grietas discontinuas en depósitos con edades de 15 000 a 20 000 años. Se considera que esta falla presenta baja actividad" (subrayados fuera de texto)

"Falla Jerusalén: Es una falla inversa de carácter local (...) Se desprende de la Falla de Pital - Betania, en inmediaciones de la población de El Agrado y choca contra la Falla de Balseadero - Matambo en cercanías a la localidad de Río Loro; presenta orientación general N65-75°E, con plano de falla vertical, con el bloque occidental levantado y el bloque oriental hundido (...) El salto de falla varía entre 700 y 800 m aproximadamente: la edad es Terciaria y no se han encontrado evidencias de actividad neotectónica."

"Falla Rioseco: Es una falla normal, de carácter local (...) transversal al patrón regional de fallas inversas; localizada al norte y nor-occidente de la zona del embalse, con trazo paralelo al curso del río Páez, y cubierto casi en su totalidad por depósitos cuaternarios (...) Presenta orientación general N70°E, plano de falla vertical, con el bloque sur levantado y el bloque norte hundido (...) La distancia más corta que la separa del sitio de presa es de 1,5 km aproximadamente (...) El salto de falla es del orden de 700 m y disminuye paulatinamente hacia el occidente. La edad es terciaria y no presenta evidencias de actividad reciente o neotectónica (...) La falla de Río Seco que se encuentra a unos 2 km del sitio del proyecto (...) Sobre el trazo de esta se encontraron tres evidencias de neotectonismo representadas en grietas sobre depósitos recientes que demuestran que la falla tiene baja actividad en un sector de unos 6 km, localizado en la parte intermedia de su trazo." (subrayados fuera de texto)

"Falla La Jagua: Es una falla normal de carácter local, localizada al sur de la zona del proyecto y al norte y nororiente de la población de La Jagua (...) presenta dirección general N80-85°E, con plano de falla vertical; el bloque norte está levantado y el bloque sur hundido. La distancia mínima al sitio de presa es de 32 km. (...) su salto de falla es bajo, del orden de 100 m. La edad es terciaria y en la actualidad presenta evidencias de actividad reciente o neotectónica." (subrayados fuera de texto)

"Falla Tarquí: Es una falla inversa de carácter local, de aproximadamente 28 km de longitud (...) Presenta rumbo general N50°-60°E y buzamiento 70°E. La distancia mínima al sitio de presa es de 40 km aproximadamente (...) El salto de falla es del orden de 2 000 m en la parte sur, y disminuye paulatinamente hacia el norte. La edad es terciaria y presenta evidencias de actividad reciente o neotectónica." (subrayados fuera de texto)

Estos apartes citados demuestran inconsistencias, incoherencias y contradicciones en un aspecto vital en una represa de las dimensiones de El Quimbo: la sismogeneración. No se entiende como se considera que la Falla de Balseadero, ubicada a tan solo 4 km del sitio de presa, presenta baja actividad si muestra desplazamientos de depósitos del Pleistoceno más tardío (entre otras cosas, que el desplazamiento ocurra en un material

antiguo no permite definir de manera directa cuándo dicho desplazamiento se dio pues evidentemente se pueden tener deformaciones muy recientes en rocas antiguas).

Para la Falla de Rioseco, también ubicada muy cercana al sitio de presa (1,5 km), se dice por parte de EMGESA – INGETEC (2008) que no presenta evidencias de actividad reciente o neotectónica y a renglón seguido se dice que se encontraron evidencias de neotectonismo representadas en grietas sobre depósitos recientes, pero más confuso es que la conclusión de lo anterior sea que las grietas “*demuestran que la falla tiene baja actividad*”. Evidentemente las incoherencias se concluyen con argumentos equivocados y peligrosos que faltan al rigor técnico, pero también a los principios constitucionales de Precaución y Prevención.

No obstante todas las incoherencias, es importante tener en cuenta que de las siete (7) fallas que se encuentran en el área de influencia directa por corresponder al vaso, cinco (5), casi el 71,4%, presentan actividad reciente con evidencias de neotectónica, haciendo que la zona pueda ser considerada con muy alta actividad sísmica. Todo ello se recogerá en el capítulo 7 donde además se demuestra que la clasificación de la Falla de Algeciras que se muestra en los estudios de EMGESA-INGETEC (2008) desconocen los documentos técnicos oficiales y académicos que se han publicado y que el carácter de falla de cabalgamiento no tiene absolutamente ningún soporte, lo cual no solamente implica un problema académico, sino una gran incertidumbre en lo referente a la falla con mayor recurrencia histórica de sismos fuertes en Colombia.

Además de lo anterior, dentro del estudio se encuentran varias inconsistencias, las cuales serán descritas y explicadas a continuación:

- **Información levantada en campo**

En la información revisada no se encontró la cantidad y la ubicación de los datos estructurales (estratificación, fracturamiento, diaclasas, planos de fallas, entre otros) tomados en la fase de campo que se afirma fue hecha (Cuadro 1.5-1¹⁶ del E.I.A.)

No existe un solo dato de medición de planos de falla reportados en los estudios de Emgesa, lo cual desconoce metodologías sugeridas para evaluar la importancia de las fallas geológicas en aspectos de diseño de las presas (ICold¹⁷, 1998; Allen & Cluff¹⁸, 2000; Mahdavian¹⁹, 2008; Wieland²⁰ et al, 2008)

Estas dudas se refuerzan cuando dentro de las inconsistencias encontradas, se dice que el trabajo de campo geológico y geomorfológico fue realizado (Cuadro 1.5-1) mientras que

¹⁶ EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 1, pág. 1-9

¹⁷ ICold (1998). Neotectonics and dams. Guidelines and case histories.

¹⁸ Allen, C. & Cluff, L. (2000). Active faults in dam foundations: An update

¹⁹ Mahdavian, A. (2008). Rudbar Lorestan Dam Design and local Faults.

²⁰ Wieland, M., Bozovic, A. & Brenner, R. (2008). Dam design - the effects of active faults

en el Cuadro 1.5-2²¹ en donde se hace la relación de los trabajos de campo realizados para el EIA no se menciona.

- **Falta de claridad sobre la distancia a la que se encuentran las fallas**

Se observó que dentro del EIA no es clara la distancia a la que están ciertas fallas con respecto a zona de estudio, ya que se ve en diferentes párrafos una variación de casi 3 km para algunas de las fallas, como es el caso de las fallas de Pitalito - Garzón - Algeciras, Rioseco y Pital - Betania.

Como ejemplo, en una primera descripción de la Falla de Algeciras en la página 3.2-9 se menciona que la distancia que tiene con la presa es de 17 km, como se mostró anteriormente. Por otro lado, en la página 3.2-27 se afirma que la falla pasa a 20 km:

“La estructura tectónica más importante del área, la constituye la falla Pitalito - Garzón – Algeciras de unos 220 km de longitud, la cual pasa a unos 20 km al oriente del sitio del proyecto.” (Subrayado fuera del texto original)

Esta falta de claridad puede tener grandes consecuencias, no solo con la Falla de Algeciras, la cual se considera en el presente informe y en otros documentos (Ingeominas²², 2002; Velandia²³ et al., 2002; Chicangana, 2007) como una de las fuentes sísmicas más importantes en toda la zona de afectación del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo, sino con todas las fallas en general, ya que al no tener certeza de al menos cuál es su distancia con el proyecto se puede incurrir en deficiencias respecto a la afectación que pueden tener sobre la presa, llevando a no tomar las medidas necesarias para la mitigación de posibles daños dentro del proyecto. Las implicaciones de estas deficiencias y omisiones se detallarán en el capítulo 7.

2.1.1.2 Sismología (numeral 3.2.1.1.5.4 del EIA)

Teniendo en cuenta que los sismos se producen cuando los esfuerzos que actúan sobre una roca exceden cierto valor crítico para que se presente un fallamiento (Wang & Manga, 2010)²⁴, es de vital importancia tener claro cuáles son las fallas cercanas a la zona de estudio y cuáles serían sus afectaciones dentro de esta.

Además, sabiendo que los cambios en la presión hidráulica de una zona puede inducir²⁵ o desencadenar²⁶ sismos, se debe tener en cuenta cuáles serían los efectos en la actividad sísmica y tener un amplio conocimiento del comportamiento sismológico en el caso de los niveles de un cuerpo de agua cambien, como es el caso de la creación de un nuevo embalse.

²¹ EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 1, pág. 1-10

²² Ingeominas (2002). Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali.

²³ Velandia, F., Acosta, J., Terraza, R. y Villegas, H. (2002). The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia

²⁴ Wang, C.-y., & Manga, M. (2010). Earthquakes and water. Lecture Notes in Earth Sciences (114), 113-225.

²⁵ Se entiende por sismo inducido cuando los procesos hidrológicos juegan un papel fundamental en el cambio de los esfuerzos de la zona, según la definición de Wang & Manga, 2010.

²⁶ Se entiende por sismo desencadenado cuando los cambios hidrológicos agregan una pequeña contribución al esfuerzo que genere un sismo. Esto según la definición de Wang & Manga, 2010.

A nivel regional, “Las numerosas evidencias de neotectonismo que se encuentran a lo largo de las trazas de fallas que enmarcan el proyecto, evidencian la liberación de esfuerzos tectónicos a que está sometido en la actualidad el valle superior del Magdalena” (EMGESA - INGETEC)²⁷

Como se mencionó en el apartado de Geología Estructural de este informe, según la información suministrada por EMGESA – INGETEC en el EIA, en la zona del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo y alrededores se encuentran siete (7) fallas, de las cuales cinco (5) presentan evidencias de actividad neotectónica, estas fallas son la Falla de Pitalito – Garzón – Algeciras, Falla Suaza, Falla Balseadero – Matambo, Falla La Jagua y Falla Traquí, encontrándose a una distancia entre 4 y 40 km.

Para efectos de este trabajo, se mencionaran las falencias y omisiones encontradas en el Estudios de Impacto Ambiental hecho en octubre de 2008 y se hará un análisis de la actividad sísmica registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) identificando la frecuencia de eventos sísmicos y aumento y disminución de sismos con una magnitud y profundidad determinada.

2.1.2 Análisis del Estudio de Impacto Ambiental (EIA)

2.1.2.1 Falta de especificación sobre la metodología que se utilizó para clasificar la actividad de las fallas

En la descripción de cada uno de las fallas presentes en la zona de estudio, mostrado en el ítem 3.2.1.1.5.4 Sismología del EIA, se hace una calificación cualitativa sobre la actividad de estas, clasificándolas en fallas con actividad alta, media y baja. Esta clasificación fue utilizada para cinco (5) fallas en la zona de estudio: Falla Pitalito – Garzón – Algeciras, Falla Balseadero – Matambo, Falla de Rioseco y Falla Pital – Betania.

Sin embargo, en ningún lado se explica cuál es la metodología ni los parámetros utilizados para hacer esta clasificación, llamando la atención que para la Falla de Algeciras, la cual presentes notables evidencias de neotectonismo y se encuentra relacionada a diferentes eventos sísmicos, se le asigne un grado **medio** de actividad:

“La estructura tectónica más importante del área, la constituye la falla Pitalito - Garzón – Algeciras de unos 220 km de longitud, la cual pasa a unos 20 km al oriente del sitio del proyecto. Esta falla es la que presenta el mayor desplazamiento en tiempos recientes, el cual se estima en unos 25 m medidos en un depósito aluvial depositado hace unos 100 000 años, el cual se encuentra localizado al occidente el municipio de Algeciras, cerca al Batolito Tigoanza. Se considera que esta falla presenta actividad media.”²⁸. (Subrayado fuera del texto original)

²⁷ EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 3.2-17

²⁸ EMGESA - INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 3.2-17

Es curioso, como en el mismo párrafo se señala que la gran actividad que tiene, desplazando depósitos cuaternarios, se clasifique como una falla de actividad media, sin hacer ninguna aclaración sobre las razones que llevaron a esta conclusión.

2.1.2.2 Calificativo de la importancia de las fallas de la zona como fuentes sísmicas

En el cuadro 3.2-2 se presenta algunas de las características de las fallas de la zona de estudio y cercanías que han presentado alguna evidencia sobre su actividad reciente. En esta tabla se relaciona la distancia a la que se encuentran del proyecto, la profundidad promedio de falla y una clasificación cualitativa sobre la importancia que tienen como posibles generadoras de eventos sísmicos.

Cuadro 3.2-2 Fuentes sísmicas para el Proyecto El Quimbo

Fuente sísmica	Distancia Proyecto (km)	Profundidad (km)	Calificativo de importancia
Falla Suaza	40	100	0.9
Falla Balseadero-Matambo (1)	2	100	1.0
Falla Pital-Betania	7	100	0.8
Sistema Pitalito-Garzón-Algeciras	18	100	0.7
Falla La Plata-Chusma	35	30	0.6
Falla Moras (2)	76	30	0.5
Falla Romeral	110	100	0.4
Zona de Benioff	150 (3)	500	0.3

FIGURA 10. CUADRO SOBRE LA CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS COMO FUENTES SÍSMICAS EN EL PROYECTO EL QUIMBO. EN ROJO SE RESALTA LOS DATOS DE LA FALLA PITALITO-GARZÓN-ALGECIRAS. FUENTE: MODIFICADO DE EMGESA - INGETEC²⁹

En ningún lado se explica cómo fue que llegaron a este resultado final, ni cuales fueron los parámetros y pesos utilizados para esta calificación.

Además de esto, llama la atención que se califique con 0,7 el Sistema de Pitalito – Garzón – Algeciras (conocido como Falla de Algeciras) el cual, según las características mostradas en el EIA, es una de las fallas más cercanas al proyecto (a 18 km) y a la cual le relacionan 60 eventos, con sismos de magnitud máxima de 7,0 y un β de 0,948, incluyendo el sismo de 18 de noviembre de 1827. Con todo ello, extraña que el calificativo de importancia para una de las principales fuentes sismogénicas de Colombia, ubicada en el campo cercano de sismogeneración sea sub-valorada como fuente de amenaza para el proyecto. Se reafirma la alta incertidumbre que se tiene sobre la metodología utilizada para hacer estas clasificaciones, aspecto que será reforzado en el capítulo 7 con los detalles históricos de los sismos de 1827, 1834 y 1967, todos ellos relacionados con la Falla de Algeciras (Velandia et al.³⁰, 2005).

²⁹ INGETEC-EMGESA. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 3.2-18

³⁰ VELANDIA, F., ACOSTA, J. TERRAZA, R., VILLEGAS, H. (2005) The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia . En: Países Bajos. Tectonophysics ISSN: 0040-1951 ed: Elsevier

2.1.2.3 Cantidad de eventos sísmicos utilizados

En el apartado “3.2.1.1.5.4.5 Parámetros sismológicos de cada fuente” del EIA se menciona que se utilizaron 361 eventos sísmicos hasta 1995, “presentados en un área de 200 km de radio con centro en la presa del proyecto Quimbo.”³¹.

No se encuentra aclaración del porque se utilizan los datos hasta 1995 ni si hacen algún filtro (profundidad o magnitud) en los eventos registrados, ya que esta información no corresponde a la obtenida en el catálogo de eventos sísmicos por la RSNC, la cual indica que a enero 1 de 1995 la cantidad de eventos sísmicos a 200 km del proyecto corresponde a 515, mientras que los reportados a octubre 1 de 2008 corresponden a 2791 eventos.

Con lo anterior queda claro que la información utilizada para el análisis de la amenaza sísmica es incompleta, por que dicho análisis no es tomar como verídica ni acertada, conllevando a diferentes incertidumbres y errores a la hora de estimar las implicaciones y efectos que tendría el proyecto.

2.1.3 EMGESA – Ingetec (2009). Evaluación de la amenaza sísmica del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Documento PHEQ-DGEO-DOC-0190.

Si bien el estudio es presentado a la autoridad ambiental (para el momento, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Dirección de Licencias, Permisos y Trámites Ambientales) en 2008, en el numeral de Neotectónica, se consigna que se basa en el Estudio de Factibilidad para el Desarrollo Hidroeléctrico El Quimbo en El Alto Magdalena (Ingetec et al., 1997).

Si bien es importante que haya bases para desarrollar trabajos, llama la atención que Emgesa no haya actualizado sus estudios, máxime cuando existen desarrollos fundamentales en aspectos tectónicos desde esas fechas. De hecho, el reporte de Neotectónica y Represas de Icold tiene fecha de 1998, pero al parecer todos los avances en el conocimiento de una temática fundamental para la seguridad de las poblaciones afectadas por la represa no fueron tenidos en cuenta por la Emgesa ni por sus consultores en la realización del Estudio de Impacto Ambiental.

Las fallas geológicas estudiadas por su eventual actividad fueron:

“La Plata, La Plata, La Azufrada, San Andrés-Pacarní, La Argentina – San Jacinto; Pital-Betania; La Jagua; Tarqui; Maito; Balseadeo-Matambo; Río Seco; Potrerillos-Rivera; Suaza y Algeciras. En ellas se encontraron toda una serie de evidencias de actividad en el Cuaternario, que se describen a continuación. La información de estas fallas se utiliza posteriormente en la evaluación de la amenaza sísmica, principalmente desde el punto de vista determinista.”

A pesar de determinar las evidencias de actividad en el Cuaternario, la caracterización de las fallas es precaria, pues basa toda la descripción en rasgos que si bien son útiles no

³¹ INGETEC-EMGESA. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 3.2-19

completan una visión sistémica de las fallas geológicas, lo cual falta al Principio de Precaución. Los rasgos que veremos que basan la caracterización son de tipo morfotectónico: segmentación de laderas o abanicos aluviales, alineamiento de ríos y cursos menores, alineamiento de pequeñas lagunas (*sag ponds*) entre otros.

No obstante, no existe caracterización geológica: no hay datos de planos de falla medidos con brújula, ni rasgos cinemáticos analizados que permitan acercarse al tipo de falla, ni tampoco existen datos claves respecto a la actividad de la falla: las dataciones de las rupturas que puedan soportar de manera rigurosa el uso de las fallas en el modelamiento de sismogeneración y de amenaza sísmica. Las edades que se pueden observar en el documento corresponden a las de los materiales afectados por la falla, no por la actividad de la falla en sí, faltando de esta manera a los requerimientos mínimos planteados por investigadores en relación a las represas (Allen & Cluff³², 2000; Mahdavian³³, 2008; Wieland³⁴ et al, 2008) y por el mismo Comité Internacional de Grandes Represas ICold³⁵, 1998) y por la misma Contraloría General de la República en su Auditoría de 2014.

También es evidente que se ha avanzado en el conocimiento de fallas activas y sismogeneradoras: la falla de Algeciras ha sido caracterizada de manera rigurosa en aspectos morfotectónicos por Vergara³⁶ (1996), Velandia y otros³⁷ (2001), Velandia y Montes³⁸ (2005), Toro & Osorio³⁹ (2005), entre otros.

Cómo se ve, la Falla de Algeciras se considera una de las principales fuentes sismogénicas de Colombia, situación que ya se había documentado para la fecha de realización, tanto de los estudios ambientales (Emgesa – Ingetec⁴⁰, 2008), como del estudio de amenaza sísmica (Emgesa – Ingetec⁴¹, 2009).

Sin embargo, en la caracterización de la Falla de Algeciras que incluye la empresa en éste último es incompleta en términos de descripciones y mediciones geológicas, dataciones, cartografía, entre otras. De igual manera es ligera la caracterización de la tasa de desplazamiento, descrita a partir de una estimación sin soporte técnico-científico:

4.13 FALLA ALGECIRAS

³² Allen, C. & Cluff, L. (2000). Active faults in dam foundations: An update

³³ Mahdavian, A. (2008). Rudbar Lorestan Dam Design and local Faults.

³⁴ Wieland, M., Bozovic, A. & Brenner, R. (2008). Dam design - the effects of active faults

³⁵ ICold (1998). Neotectonics and dams. Guidelines and case histories.

³⁶ Vergara, H., 1996. Rasgos y actividad neotectónica de la falla de Algeciras. In Memorias del VII Congreso Colombiano de Geología (pp. 491-500).

³⁷ Velandia, F., Terraza, M. R., & Villegas, H. (2001). El Sistema de Fallas de Algeciras hacia el suroeste de Colombia y la actual transpresión de los Andes del Norte. In VIII Congreso Colombiano de Geología. Memorias (CD–Room).

³⁸ Velandia, F., & Montes, N. 2005. Actividad neotectónica del sistema de fallas de Algeciras en el departamento del Huila. In X Congreso Colombiano de Geología y IV Seminario sobre el cuaternario en Colombia.

³⁹ R.A Toro, J.A Osorio. Vol. 27, núm. 1 (2005). Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de Los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. Revista UIS.

⁴⁰ EMGESA - INGETEC. 2008. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo.

⁴¹ EMGESA - INGETEC. 2009. Evaluación de la amenaza sísmica del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Revisión 0. Volumen 1 de 1. Documento no. PHEQ-DGEO-DOC-0190.

Entre las evidencias de actividad de esta falla se tienen desplazamientos de abanicos cuaternarios, lomas de presión, drenajes decapitados, ganchos de flexión, facetas triangulares, coronas de deslizamientos, valles lineales, cuencas de tracción y alineamientos de rasgos morfotectónicos. La tasa de desplazamiento de esta falla se estima que es moderada (Vergara, 1993). Otras evidencias de actividad neotectónica se observaron en los siguientes lugares.

(...)

Evidencia No. 42. A 2 km al occidente del municipio de Algeciras la falla afecta un depósito cuaternario aluvial desarrollando escarpes en el valle del río Neiva. Uno de estos se encuentra poco disectado y erosionado orientado N60°E, con altura entre 20 y 25 m, y una longitud de 3 km; asociado a este escarpe se encuentran varios sag ponds. El depósito está constituido por arenas cuarzosas y gravas subangulares de origen ígneo y metamórfico de hasta de 1,5 m de diámetro. La edad del depósito se estima en 100 000 años (Ruiz Beltrán, 1986).

Inexistencia de datos geológicos de campo

Puede verse que no existe un solo dato geológico, ni caracterizaciones cinemáticas suficientes. No se encuentran datos medidos con brújula ni cuantificación de espesores de zonas de brecha o zonas de daño para cualquiera de las fallas geológicas. También preocupa la falta de trabajo de campo y de caracterización a la Falla Balseadero – Matambo, la cual se ubica a menos de 5 km de la zona de presa, así como la de Pital – Betania, de la cual se desprende un ramal (Falla de Rioseco), la cual discurre a menos de 1 km de la zona de presa.

Falta de coherencia de los levantamientos tectónicos locales y regionales

Al realizar la comparación de los mapas (Plano No.EIAQ-17 escala 1:2000 y Plano No-EIAQ-15 escala 1:75000) presentados por la empresa EMGESA.S.A.E.S.P. en marco del proyecto de la hidroeléctrica el Quimbo, se encuentra que a pesar de la importancia de las estructuras como la Falla de Rioseco, con un trazo muy cercano a la zona de presa, no es caracterizada en la escala detallada (el área escogida no permite incluir dicha falla en el análisis de detalle), inconsistencia que posteriormente puede reflejarse en situaciones de riesgo para la poblaciones que circundan el proyecto.

Por otra parte, muchas de las fallas presentadas en los planos geológicos no son caracterizadas ni siquiera consideradas en el estudio de amenaza sísmica. Tampoco hubo avances en la conceptualización de sismicidad inducida respecto de los avances técnicos y científicos para ese tema.

Inexistencia de dataciones de actividad de la falla

No se cumple con lo expuesto por el Comité Internacional de Grandes Represas en el sentido de determinar la edad de las deformaciones, aspecto clave para determinar la actividad de la falla.

Se observa que en muchas de las fallas geológicas reportadas se refieren a dataciones tales como que la Falla de Algeciras muestra afectaciones sobre un depósito cuya edad “se estima en 100.000 años” o en el EIA (Emgesa – Ingetec⁴², 2008) que la Falla Balseadero muestra grietas discontinuas con edades de 15.000 a 20.000 años. La fuente que se reporta es Ruiz Beltrán, razón por la cual se hizo la consulta directa a este documento, lo cual se muestra a continuación:

En el estudio morfopedológico de la Cuenca Superior Oriental del Alto Valle del Río Magdalena, sector Garzón-Gigante en el departamento del Huila realizado por Elías Ruiz Beltrán como Tesis doctoral en el año 1977, se hace referencia esencialmente a un estudio cualitativo geomorfológico y análisis de unidades pedológicas provenientes de las diferentes unidades del macizo de Garzón pertenecientes al lugar. Sin embargo toma algunas consideraciones en cuanto a los depósitos cuaternarios existentes en la zona de estudio.

A continuación se cita de manera textual lo referente las consideraciones temporales tectónicas del área:

“Es esencialmente en el transcurso del cuaternario cuando se levanta la cordillera oriental, la tectónica no parece pertenecer a un estilo plegado sino fallado, los depósitos del Plioceno en efecto no son plegados aun cuando son fuertemente levantados, donde se postula que el levantamiento tuvo que ser por movimientos verticales correspondientes a fallas orientadas paralelamente a la cordillera en dirección SO-NE”

También se refiere a la falla de Garzón y la falla del Magdalena.

“La falla de Garzón pone en contacto el macizo cristalino con sedimentos terciarios. La altura del escarpe es de 300m es debido en parte a la ablación de los sedimentos, pero solo este fenómeno no puede explicarla completamente. Por otra parte la falla continua hacia el norte en un haz, acotando en bloques deprimidos o levantados las formaciones de cuaternario antiguo y medio, en esta falla se une con una fractura que afecta igualmente tales depósitos, mediante un escarpe de alrededor de 10m en los alrededores de la Aurora y está cubierta por acumulaciones del cuaternario reciente hacia el extremo NE de la región estudiada este accidente se continua hasta llegar a chocar contra un bloque limitado probablemente por otra falla mayor que aloja a la quebrada La Guandiosa. El bloque cristalino situado al norte parece además, haber sufrido un fuerte empuje hacia el Oeste; lo mismo pudo haberle ocurrido al bloque situado al sur de Río Majo.

La falla del Magdalena. El anticlinal tiene dirección hacia el oeste cerca a la confluencia con el río Páez, sigue hacia el sur, en una falla inversa que aloja al río Magdalena. En este accidente que parece muy antiguo habría vuelto a jugar en época reciente afectando tobas tabulares del plioceno superior. La capa de

⁴² EMGESA - INGETEC. 2008. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo.

conglomerados miocenos que se observa al oeste de San José de Belén sería la misma que sobresale en el gran escarpe al occidente de Gigante, y el gran sinclinal de eje NE-SO, estaría así recortado y deformado por la reactivación de esta estructura anterior de dirección N-S”

En este apartado se tiene una descripción muy general de dichas estructuras, ya que no es el objetivo del estudio, sin embargo en el informe presentado por Emgesa – Ingetec⁴³ (2009) se referencia este documento cuando se habla de la falla de Algeciras, a pesar que esta falla no es mencionada por el autor.

En lo que respecta a las dataciones mencionadas por Emgesa – Ingetec (2009) de la tesis doctoral, en esta no se tienen datos absolutos ya que no se usan técnicas para determinar edades, la manera en que se refiere temporalmente a las unidades del cuaternario es a partir de criterios estratigráficos y la discriminación temporal relativa, a continuación se tiene la división del cuaternario (antiguo, medio y reciente) con el agravante que el autor no es geólogo:

El cuaternario antiguo es tomado por el autor de la siguiente manera:

“hacia el limite occidental del Macizo cristalino o al interior mismo de este, se observan conos de deyección potentes cuyo modelado está relativamente bien conservado, aunque la superficie presenta una sucesión de ligeras ondulaciones, colinas bajas, valles poco marcados y depresiones cerrada. Con excepción del cono de la Quebrada Honda, en el sector de Tres Esquinas, al Norte de El Pescado, la tectónica es la causa de la degradación de la forma en la zona de contacto entre el Macizo y la zona sedimentaria mientras que los nuevos aportes fosilizan el cuerpo central de la acumulación antigua, dejando aflorar islotes está más al occidente un cierto número de explanadas (Glacis) truncan el material de la Formación quebrada del Gigante y también raramente, los conglomerados y tobas del plioceno medio. Al oriente de Gigante las alteraciones y los suelos muestran un grado de evolución particularmente importante. Teniendo en cuenta estas características de posición intermedia de estos glacis, entre los relictos de la superficie antigua y el nivel medio, los hemos considerado como cuaternario Antiguo”.

En cuanto al cuaternario medio lo define como:

“se caracterizan, ante todo por acciones de remoción, se han modelado formas frescas, todavía bien conservadas, pero no han aportado nuevos aluviones. La alteración de los bloques y cantos de este nivel hace difícil toda interpretación, solo un análisis muy minucioso podría corroborar la impresión que se tiene de un mayor contenido de material frescos en las capas superiores en estas formas, las partes más importantes del depósito se ha conservado detrás del escarpe del Magdalena y se denominan cuaternario medio”

⁴³ EMGESA - INGETEC. 2009. Evaluación de la amenaza sísmica del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Revisión 0. Volumen 1 de 1. Documento no. PHEQ-DGEO-DOC-0190.

Para la definición del Cuaternario reciente el autor lo toma así:

“se define entre gigante y potreros, al norte de Sartenejo, en los alrededores de Garzón y cerca de las confluencias con el Río Magdalena, cuando la topografía lo permitía, se han formado conos de deyección relativamente importantes, compuestos de materiales finos, arenas y cantos pequeños, mejor lavados que los precedentes y poco alterados. Los retoques por disección se limitan al entalle por los ríos, las otras formas de este nivel cronológico son los rellenos coluviales comandados por la topografía y todavía funcionales cuando las vertientes sufren una ablación activa”

Se puede concluir entonces que la temporalidad de la actividad de las fallas geológicas no existe para el caso del Proyecto El Quimbo y que las dataciones remitidas por Emgesa acerca de la temporalidad de los depósitos se basan en un estudio completamente cualitativo sin ninguna base técnico-científica.

2.2 OFICIO DE MINAMBIENTE AL SENADOR ALEXANDER LÓPEZ POR POSIBLES DAÑOS AMBIENTALES EN LA ZONA DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO QUIMBO (MAVDT, 2011)

Este oficio tiene apartes que se refieren al caso del riesgo sísmico del proyecto hidroeléctrico El Quimbo en el cual se transcriben los apartes de sismicidad aportados por Emgesa en el EIA de 2008, para luego concluir el Ministerio:

De acuerdo a los anteriores análisis realizados para el proyecto hidroeléctrico el Quimbo y según la información de los sismos más representativos presentados históricamente en la región, el diseño del proyecto corresponde a un periodo de retorno de 1000 años asociado a una aceleración horizontal de 0,4g, aclarando que esta aceleración se considera suficientemente conservativa teniendo en cuenta que las aceleraciones que maneja el Código sismo resistente en Colombia (NSR-98), son inferiores a 0,3g.

Durante un terremoto el terreno se mueve, en términos generales, de forma aleatoria en todas direcciones tanto horizontalmente como verticalmente. Es el estudio de estos movimientos el foco de interés cuando se realizan mediciones sísmicas. Con el objetivo de evaluar la influencia de los sismos en estructuras, como las presas de tierra y enrocado, es necesario considerar la naturaleza del movimiento generado por el sismo. En otras palabras, la aceleración pico puede que no sea el único factor que influencia el comportamiento de la presa. Los efectos debidos a la velocidad y el desplazamiento del terreno pueden ser iguales o incluso más importantes que la propia aceleración.⁴⁴

Por lo anterior, es fácil ver la importancia de los estudios de amenaza sísmica de detalle. Dichos estudios no solo deberían enfocarse en la determinación de un valor de aceleración sísmica sino definir un tiempo estimado de duración de sismo y demás mecanismos a los que son sensibles los modelos de estabilidad utilizados para el análisis de presas.

⁴⁴ Effects of Earthquakes on Dams and embankments. N.M. Newmark-Fifth Rankine Lecture

Las consideraciones generales de las agencias federales de los Estados Unidos respecto al análisis de sismo son las siguientes (para el caso particular de presas de tierra y enrocado): ⁴⁵

- Para presas con altos estándares durante la construcción, no se requieren análisis detallados si la aceleración pico es inferior a 0,2g.
- En caso contrario, se deberán realizar análisis dinámicos para evaluar la posible pérdida de resistencia como resultado del movimiento sísmico.
- En este sentido, se deberán realizar análisis del comportamiento dinámicos del agua que puede fluir dentro del cuerpo de la presa y evaluar el potencial de licuación de los materiales frente a las frecuencias de aceleración sísmica estimadas.

En ese contexto y en el marco del oficio del MAVDT, es claro que los estudios de amenaza sísmica regionales como los que se encuentran en la NSR-98 y actualmente en la NSR-10 están dirigidos a ser aplicados en obras de menor envergadura, como edificaciones típicas de concreto (casa, edificios de oficinas, colegios, hospitales). Las presas al ser estructuras que son potencialmente un riesgo para grandes poblaciones, deben ser diseñadas con estándares más altos y en tal virtud se requieren estudios más robustos que los que de forma regional se adoptan en las normas antes mencionadas.

El uso de valores de aceleración sísmica no es para nada un análisis conservativo de las posibles consecuencias de un sismo. Un sismo con una magnitud media (con un periodo de retorno bajo), si se presenta por un tiempo prolongado, podría llevar a la generación de presiones de poros o deformaciones plásticas en el cuerpo de presa que son los precedentes de daños graves e incluso colapsos en este tipo de estructuras.

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante que en los diseños se sigan a cabalidad las consideraciones que los estudios detallados de amenaza sísmica recomiendan. Que los diseños usen los valores e aceleración indicados y que se generen los modelos dinámicos para sismos con periodos de duración altos. Como se verá, todas estas consideraciones faltan o son omisivas en el caso de El Quimbo.

2.3 INFORME DE ACTUACIÓN ESPECIAL A LA ANLA EN EL SEGUIMIENTO A DENUNCIAS CIUDADANAS PARA EXIGIR EL CUMPLIMIENTO DE OBLIGACIONES AMBIENTALES EN LA ACTUAL CONSTRUCCIÓN DE HIDROELÉCTRICAS-2013 (CGR, 2014)

La Contraloría General de la República en septiembre de 2014, en evaluación del EIA-2008 (EMGESA-INGETEC, 2008), indica una inadecuada caracterización de las fallas geológicas y sistemas de fracturas en la zona. Dicha institución pone de manifiesto la inexistencia del análisis de la sismicidad inducida por parte de EMGESA así como falta del requerimiento, en contradicción con otros casos como el de Hidrosogamoso en donde se realizó un estudio de sismicidad inducida con la presencia de expertos internacionales.

“Durante la ejecución de proyecto de hidroeléctricos (sic) de gran escala, como es el caso del Proyecto Hidroeléctrico el Quimbo (PHQ), es necesario realizar una

⁴⁵ Safety of Dams: Flood and Earthquake Criteria. Comitee on safety criteria for dams (1985)

rigurosa caracterización de las amenazas naturales (volcánica, sísmica, geológica e hidroclimáticas) a las cuales se ven expuestos estos tipos de proyectos, como consecuencia del potencial riesgo que representa el almacenar un gran volumen de agua en un área específica ante la posible falla estructural de los elementos que la conforman (...)

En el caso del Proyecto Hidroeléctrico del Quimbo, según cifras oficiales, se proyecta almacenar un total de 2.601 Hm³, (volumen útil de almacenamiento del proyecto), el cual bajo procesos morfodinámicos, volcánicos y sísmicos podría verse afectado (...)

A pesar de esto, en el Estudio de Impacto Ambiental – EIA (2008), por el cual se otorgó la Licencia Ambiental (Resolución No 899 de 2009) y posterior modificaciones, no cuenta con la caracterización de las amenazas naturales (subrayado en texto) (...)

- a. No se realiza caracterización de amenazas naturales bajo modelación estocástica o probabilística por avenidas torrenciales (...)*
- b. De esta misma forma, se analiza la situación frente al Volcán Sotará, identificado como amenaza natural, donde nuevamente las afirmaciones que se realizan en relación con los efectos que tendría la actividad (...) no cuenta con un modelamiento (...)*

Lo anterior, demuestra la ausencia de una zonificación por amenaza volcánica relacionada con la presencia y actividades del Volcán Nevado del Huila y el Volcán Sotará. Adicionalmente, en visita técnica realizada por personal de la Contraloría General de la República, el día 10 de junio de 2012, en la zona de influencia del proyecto: casa de máquinas, se identificaron afloramientos de depósitos piroclásticos, los cuales indican la llegada de material volcánico durante eventos anteriores, y confirma la posibilidad de que los materiales provenientes de actividad volcánica pueden llegar al área del proyecto (...)

- c. En relación a la amenaza por procesos morfodinámicos como: avenidas torrenciales, flujos de lodos, generadas por crecientes en el sector de los ríos Páez y La Pata y el sector Río Magdalena y Río Suaza, dentro del Estudio de Impacto Ambiental – EIA (2008), se considera que el efecto de crecientes y avalanchas en el sector de los ríos Páez en el área correspondiente a la zona de máquinas es mínimo (subrayado en texto) (...)*
- d. En términos de amenaza sísmica, según lo menciona EIA elaborado por Ingetec, 2008, para la solicitud de la Licencia Ambiental, en el capítulo 3.2.1. Geología, se presenta un listado de fallas activas (Tabla 1), que a pesar de haber sido identificadas como fallas activas, estas carecen de caracterización geométrica, cinemática y sismológica que permita establecer bajo un modelo determinístico o probabilístico la ocurrencia de sismos generados por estas, que puedan representar una amenaza sísmica para el proyecto (Krammer, 1996) (...)*

La respuesta de la ANLA, en la que se relaciona con amenaza sísmica, omite las principales consideraciones de la CGR, pues en la misma función de advertencia, la entidad de control consigna:

En términos de amenaza sísmica, la ANLA menciona que dentro del Capítulo 9, se realiza la caracterización de la amenaza sísmica a partir de la obtención de parámetros sísmicos para cada una de las fuentes identificadas en el capítulo 3 del EIA del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo y cálculo de las ecuaciones de atenuación (...) para establecer el valor de aceleración horizontal en sitio máxima esperada (...)

En su respuesta la ANLA, afirma que: “(...) si contempló dentro del proceso de licenciamiento ambiental LAM400, el análisis de amenazas y sismicidad”

Al respecto la CGR, alude que a pesar que se realice modelación de aceleración máxima probable bajo los métodos tradicionales establecidos, los auditores de la CGR, identificaron deficiencias en la caracterización geométrica y cinemática en detalla (escala menor a 1:5.000), los cuales son los que permiten conocer si existen evidencias de neotectónica en el área influencia del proyecto y la posible configuración de esfuerzos tectónicos en la zona, en el área se carece de una red de microsismicidad y equipos de geodesia de precisión, que permita disminuir el número y el peso de las incertidumbres representadas en el análisis de amenaza sísmica (...)

En cuanto a la sismicidad inducida, la Actuación Especial de Hidroeléctricas – 2013, la CGR establece:

H.5.A. Sismicidad inducida por el llenado del embalse y efecto de la generación de olas

El término de sismicidad inducida hace referencia a energía sísmica liberada artificialmente por el incremento de esfuerzos en una zona determinada, como ocurre en el llenado de embalses de gran magnitud. La sismicidad inducida por el llenado de embalses artificiales ha sido registrada durante las última 6 décadas (...)

Por tal razón, bajo el Principio de Precaución las represas de gran escala deben considerar el análisis de sismicidad inducida y las olas generadas, con el fin de garantizar la estabilidad, funcionalidad y seguridad de este tipo de proyectos.

Dentro de los términos de referencia HE-TER-1-01 establecidos por el MAVD (sic) en el 2006 para proyectos hidroeléctricos, sobre los cuales se realizó el Estudio de Impacto Ambiental, no se incluye dentro de sus requerimientos el análisis de sismicidad inducida por el llenado del embalse.

(...)

Lo anterior pone de manifiesto el desconocimiento de la Entidad Ambiental Nacional de los factores de riesgo por sismicidad inducida durante el llenado y puesta en funcionamiento de los proyectos hidroeléctricos, específicamente en este caso, para El Quimbo este componente de riesgo, no fue considerados dentro del Estudio de Impacto Ambiental – EIA para el otorgamiento de la Licencia Ambiental, ni en sus posteriores modificaciones.

La respuesta de la ANLA, recogida en la Actuación Especial reconoce la ausencia de requerimientos en estas temáticas, es decir, que no se conocían al momento de la

expedición de dicha Actuación (septiembre de 2014), las condicionantes para definir este tipo de amenaza:

“Adicionalmente, la ANLA menciona que: “(...) se viene trabajando con el proyecto hidroeléctrico del Quimbo, mediante el seguimiento al mismo, para que durante la fase de llenado realice el monitoreo a este fenómeno con la instalación de una estación sismológica, que se realizará con el acompañamiento de esta Autoridad”, lo cual bajo el “Principio de precaución” no garantiza la estabilidad de las obras principales en el caso que se genere eventos de sismicidad inducida durante la etapa de llenado, ya que como la ANLA menciona en su respuesta, al cita en una tabla los “Atributos para estimar la probabilidad de ocurrencia de sismicidad producida por el llenado del embalse”, el Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo presenta atributos que permitirían estimar una probabilidad entre alta y media de ocurrencia de sismicidad inducida durante el llenado del embalse, según las características identificadas en el EIA, 2008 de este proyecto (...)”

Evidentemente, la lectura de la Actuación de la Contraloría es oportuna (previa al llenado del embalse) y tiene gran cantidad de soportes técnicos para disminuir la discrecionalidad y actuar en derecho. De igual forma la CGR, basada en los análisis presentados por la ANLA, le asigna al proyecto Hidroeléctrico el Quimbo una probabilidad de generar sismos alta a media y en la cual el análisis principal se centra en garantizar la estabilidad de las estructuras principales.

2.4 RESOLUCIÓN 759 (ANLA, 26 DE JUNIO DE 2015)

La ANLA por su parte, en resolución del 26 de junio de 2015, justo antes del inicio del llenado del embalse, genera información y requerimientos respecto a sismicidad.

“CONSIDERACIONES DE LA AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES – ANLA

Que como consecuencia del seguimiento realizado por el Grupo de Evaluación y Seguimiento realizado por el Grupo de Evaluación y Seguimiento del Sector Energía de esta Autoridad, una vez evaluada la información que reposa en el expediente, las visitas técnicas realizadas durante los periodos comprendidos entre el 16 al 21 de septiembre, del 5 al 17 de noviembre de 2013, del 25 al 30 de noviembre de 2013 y el 18 al 21 de marzo de 2014, revisada la documentación obrante en el expediente LAM4090, el Informe de Cumplimiento Ambiental ICA-8, se emitió el Concepto Técnico No. 11061 del 22 de septiembre de 2014, en el cual se señala:

(...)

Estado actual del proyecto

Medio Físico:

Dique auxiliar – Visita realizada del 18 al 21 de marzo de 2014

(...)

Por otra parte y debido a la reiterativa ocurrencia de fenómenos de carácter geotécnico en sectores como La casa de Maquinas (sic), El Dique auxiliar y el Vertedero, aunado a la expectativa de la población que habita en inmediaciones

del proyecto, por la ocurrencia de sismicidad durante la fase de llenado del embalse, esta Autoridad considera, que aun cuando dentro de los términos de referencia HE-TER-1-01 establecidos por el MAVD (sic) en el 2006, sobre los cuales se realizó el Estudio de Impacto Ambiental, no se incluye dentro de sus requerimientos el análisis de sismicidad inducida durante la fase de llenado de los embalses, es pertinente aclarar que de acuerdo con las exigencias actuales a proyectos hidroeléctricos sí se está exigiendo su presentación, por lo tanto, durante la fase de llenado la Empresa deberán (sic) cumplir con el análisis y seguimiento a la sismicidad inducida, por lo cual deberá tomar las medidas pertinentes para realizar el monitoreo e instalar toda la infraestructura necesaria para tal efecto, mediante una estación de sismicidad que cumpla con los estándares internacionales para tal actividad. (subrayado fuera de texto)

No obstante, de presentarse contingencias no previstas durante la vida útil de estos sitios, la Empresa deberá informar de forma inmediata a esta Autoridad y tomar los correctivos necesarios para prevenir, mitigar o corregir los posibles impactos asociados con estas eventualidades, además implementar el plan de contingencia para tales eventos. Por otra parte, es importante resaltar que el seguimiento a estas labores será de carácter continuo y permanente, por parte de esta Autoridad, por la vida útil del proyecto.

A continuación se presenta la conceptualización con la cual se está requiriendo la posible afectación de este fenómeno en los grandes proyectos hídricos.

(...) “Sismicidad inducida por el embalse

La sismicidad inducida es fenómeno observado en algunos embalses del mundo (algunos de los más conocidos son Kariba en Zambia, Aswan en Egipto, Koyna en India y Kremasta en Grecia), consistente en la generación de sismos normalmente de magnitudes moderadas o pequeñas durante el llenado del embalse o incluso varios años después. Este efecto está relacionado con el aumento de la carga por el peso del agua, el incremento de presión de poros en las fallas geológicas y la lubricación de las superficies de contacto. Los sismos disparados durante el primer llenado del embalse están relacionados con los esfuerzos elásticos debido a la carga misma que induce el embalse, mientras que los sismos que se presentan después de varios ciclos de llenado y desembalse corresponden al flujo gradual del agua hacia las zonas epicentrales.

Si una falla activa que se encuentra en el proceso de acumulación de energía es inundada, los cambios en las condiciones de esfuerzos por el llenado del embalse la pueden llevar a liberar la energía acumulada hasta el momento, generando un evento sísmico de magnitud menor o igual al que hubiera resultados más tarde en estado natural. En cualquier caso, la energía principal disipada en un sismo disparado por el embalse corresponde a la deformación tectónica preexistente.

Por lo tanto, este efecto no modifica las condiciones de diseño de las obras en cuanto al valor de la aceleración de diseño, ni implica la ocurrencia de sismos mayores a los que ocurrirían sin el embalse y su único impacto al ambiente es la coincidencia de estos eventuales sismos con la puesta en funcionamiento del proyecto y la reducción en el tiempo de recurrencia de un evento que en condiciones normales, en todo caso hubiera ocurrido alguna vez en el futuro. Este

proceso de reducción en los tiempos de recurrencia es importante especialmente en zonas de baja sismicidad, donde las fallas potencialmente activas pueden acumular energía a tasas muy bajas y permanecer en un estado de esfuerzos cercano a la ruptura durante muy largos periodos de tiempo.

Los casos más comunes de sismicidad inducida se presentan en embalses de gran profundidad (más de 100 m), con volúmenes de agua altos (más de 1 a 10 m), y que cubren fallas que han sido activas durante el cuaternario tardío, especialmente en ambientes de esfuerzos de tracción o en fallas de rumbo. No se ha comprobado una influencia directa del tipo de roca, aunque se han presentado más casos en rocas sedimentarias (Schwartz al, 1996). (Subrayado fuera de texto)

(...)

Es importante resaltar que una vez finalizada las obras constructivas, en especial las relacionadas con el dique Auxiliar y la Casa de Máquinas y todas aquellas consideradas como fundamentales, se realizará un informe técnico final donde se consignarán todos los informes parciales de visitas de seguimiento con las respectivas conclusiones a que haya lugar. (Subrayado fuera de texto)

(...)

Monitoreo a la sismicidad durante la fase de llenado y operación

Debido a la reiterativa ocurrencia de fenómenos de carácter geotécnico en sectores como La casa de Maquinas (sic), El Dique auxiliar y el Vertedero, aunado a la expectativa de la población que habita en inmediaciones del proyecto, por la posible ocurrencia de sismicidad durante la fase de llenado del embalse, esta Autoridad considera que al no contarse con medidas y/u obligaciones relacionadas con el monitoreo de la sismicidad durante el llenado del embalse y la fase de operación del proyecto, es necesario modificar la Licencia Ambiental respecto a la inclusión de este aspecto, lo anterior se soporta además que es una exigencia internacional a proyectos hidroeléctricos; por lo que la Empresa deberán cumplir con el seguimiento a la sismicidad y el análisis de los resultados obtenidos. (Subrayado fuera de texto)

De lo antes mencionado durante la visita al proyecto realizada los días 25 al 31 de mayo de 2015, se pudo verificar que La Empresa actualmente se encuentra trabajando en la instalación de esta infraestructura de seguridad y monitoreo, a continuación se presentan las labores realizadas hasta la fecha y las cuales tienen un avance del orden del 96%.

- Instrumentación Sísmica del Proyecto Hidroeléctrico Quimbo – PHEQ

El Proyecto hidroeléctrico el Quimbo cuenta con instrumentación geotécnica en sus obras principales, las que permiten monitorear y controlar el comportamiento de las diferentes estructuras del proyecto.

Dentro de la instrumentación prevista, se tiene considerada la instalación de 3 acelerógrafos que permitan registrar los movimientos telúricos que se tengan en la zona de la obra, obteniendo registros de las aceleraciones sísmicas versus tiempo.

- **Ubicación de los acelerógrafos**

Esquema de ubicación de los tres acelerógrafos del PHEQ.

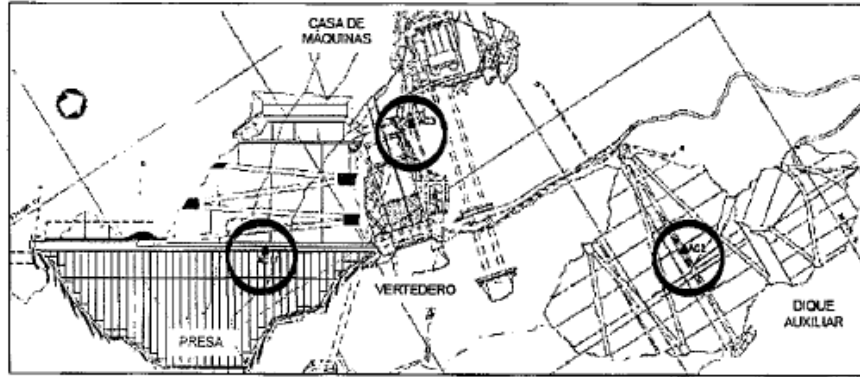


Figura 1. Esquema de ubicación de los tres acelerógrafos del PHEQ.

AC-1: Cresta de la Presa principal, se ubicará en el sitio de mayor posibilidad de movimiento, es decir en cercanía de la losa 30. Este permitirá registrar las aceleraciones que se amplifiquen en la cresta de la presa producto del evento sísmico

AC-2: Ubicado en la cresta del Dique auxiliar. Permitirá registrar la amplificación dinámica en la cresta del Dique producto de un evento sísmico

AC-3: Ubicado en roca dentro de la Galería de acceso a la cámara de compuertas de la descarga de fondo. Permitirá detectar la aceleración de la roca basal de la zona del proyecto. Este instrumento es el único que podría ser usado por la Red Sismológica Nacional de Colombia, ya que no se encuentra afectado por amplificaciones dinámicas tal como el AC-1 y AC-2.

Gráfico No. 2	Ubicación estaciones de monitoreo a la sismicidad
Fecha	25 al 30 de mayo de 2015
Lugar	Sitios para instalación de las estaciones sísmica del proyecto
Observaciones	Panorámica instalación de las estaciones de registro sísmico en tiempo real, para la fase de llenado y operación del proyecto

(...)

- **Especificaciones técnicas del equipo y operación**

- El rango de los acelerógrafos será de 0g a 1g para el de la galería de acceso a la cámara de compuertas y de 0g a 4g para el de la cresta de la Presa y Dique Auxiliar, la frecuencia será de 0 Hz a 50 Hz y la resolución de 18 bits.
- El equipo estará provisto de reloj que permitirá determinar el tiempo de llegada de las ondas con una exactitud no menor de 0,1 segundos e incorporará una escala de tiempo en los registros según GMT+0
- Los equipos funcionarán con baterías internas y corriente alterna de 110 V 220 V
- Los acelerógrafos dispondrán de una unidad de lectura portátil en la cual se podrá correr el respectivo procesamiento de datos
- Cada uno de los acelerógrafos contará con un canal de comunicación al servidor de instrumentación del proyecto ubicado en al cuarto de control de la Casa de Máquina.

- Niveles de alarma para acelerógrafos

Se ha definido tres niveles de alarma para los acelerógrafos: amarilla, naranja y roja.

(...)

Conclusión

La instrumentación que se implementará para el monitoreo de la sismicidad en la etapa de llenado y operación de la central hidroeléctrica del Quimbo, cumple con las recomendaciones de las diferentes Organizaciones sísmicas a nivel Mundial, las cuales tienen como objetivo realizar estudios e investigaciones básicas y aplicadas de sismología e ingeniería sísmo resistente, destinados a la prevención del riesgo sísmico, que permitan en forma óptima la estabilidad y permanencia de las estructuras civiles existentes en una posible zona sísmica, las cuales son necesarias para garantizar mediciones confiables durante posibles fenómenos telúricos. (Subrayado fuera de texto)

Es importante resaltar que la Casa de Máquinas, donde quedará la estación basal de referencia sísmica, se realizará un informe técnico final donde se consignarán todos los informes parciales de visitas de seguimiento, con las respectivas conclusiones a que haya lugar.

Resultado

Conforme a las consideraciones antes realizadas, es indispensable modificar vía seguimiento, la Resolución 0899 del 15 de mayo de 2009, en lo relacionado con adicionar el subnumeral 4.1.9. al numeral 4 Seguimiento y Monitoreo, Numeral 4.1 Componente físico, el cual quedará así:

4.1.9. La Empresa deberá durante el llenado y operación del proyecto, realizar el seguimiento a la sismicidad, al respecto los resultados obtenidos de esta actividad así como su análisis deberán ser reportados en los informes de cumplimiento ambiental ICA.

De presentarse contingencia no previstas durante la vida útil del proyecto asociadas a la sismicidad, la Empresa deberá informar de forma inmediata a esta Autoridad y tomar los correctivos necesarios para prevenir, mitigar o corregir los posibles impactos asociados con estas eventualidades, e implementar el plan de contingencia para tales eventos. (Subrayados fuera de texto)

(...)

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- Modificar vía seguimiento la licencia ambiental otorgada mediante la Resolución 0899 de 2009, en el sentido de incluir dentro del “Programa de Atención y Protección de Sitios Críticos Sensibles o Vulnerables durante la Operación del Proyecto”, (numeral 7.3.1. del PMA), en el borde del embalse lo referente al seguimiento de la sismicidad, en donde la empresa EMGESA S.A. E.S.P., deberá cumplir con el análisis y seguimiento a la sismicidad inducida, y tomar las medidas pertinentes, realizando los monitoreos e instalar toda la infraestructura necesaria para tal efecto, mediante una estación de

sismicidad que cumpla los estándares internacionales para tal actividad, de conformidad con lo expuesto en la parte motiva del presente acto administrativo.”

Si bien la ANLA argumenta que se instrumentará, continúa ignorándose la mayor parte de las observaciones técnicas de la CGR en su Actuación Especial, en el sentido que no es posible comprender la sismicidad natural ni la inducida si no se tienen los estudios básicos pertinentes, que se centran fundamentalmente en la tectónica, y particularmente en la actividad de las fallas geológicas.

En los apartes subsiguientes, se demostrará que con anterioridad a la expedición de los Términos de referencia del Minambiente cuya fecha fue 2006; a la elaboración y entrega del EIA por parte de Emgesa en 2008 y a la expedición de la Licencia ambiental en 2009, ya en la literatura internacional, y en particular en el Comité Internacional de Grandes Represas (ICold por sus siglas en inglés), el tema de la necesidad de estudios detallados sobre las fallas geológicas ya se había establecido, particularmente en las recomendaciones de ICold (1998). Nos centraremos en el Boletín 112 de ICold⁴⁶ (1998) denominado Neotectonics and dams, se presenta una metodología para investigación sobre la actividad de las fallas geológicas, la cual incluye:

- Determinación del sistema de fallas y rupturas

Debido a que la aproximación al potencial de ruptura de una falla que cruza la fundación de la presa es una de las características más complejas e importantes en el diseño de presas, las investigaciones deben incluir la totalidad del campo de la información y el trabajo de campo en geología, sismología, geofísica y geodesia, incluyendo la elaboración de trincheras, galerías y pozos exploratorios. También se menciona la importancia de la fotointerpretación detallada y/o la fotogrametría terrestre y la interpretación de imágenes de satélite.

Se explicita la importancia de enfocar en detectar trazos de fallas con posible actividad en el Holoceno (los últimos 12.000 años) pues dicha información es decisiva para la determinación del potencial de ruptura presente de las fallas geológicas.

- Determinación de actividad neotectónica

Implica inicialmente el análisis geomorfológico cualitativo de fotografías aéreas y mapas donde se deben registrar signos de erosión o depositación anómala (incremental), discrepancia en superficies comparativas (terrazas de ríos y lagos, llanuras aluviales, etc.). Esto debe seguirse de análisis cuantitativos de modelos digitales.

- Determinación de actividad tectónica reciente

Comprende el análisis de relaciones cronológicas entre el sistema de rupturas y las unidades geológicas afectadas por dicha ruptura. Se proponen métodos de análisis de poblaciones de fallas pertenecientes al área considerada y se destaca el estudio de perturbaciones en las formas superficiales del Holoceno: trazas de rupturas superficiales como la más violenta de las formas de tectonismo, así como otras manifestaciones como el *creep* a lo largo de líneas de falla.

Junto con la superposición estructural estratigráfica y geomorfológica, se sugieren técnicas isotópicas para la investigación de la temporalidad de los eventos tectónicos.

⁴⁶ ICold-International Committee on Large dams (1998). Neotectonics and dams. Bulletin 112.

- Determinación de actividad contemporánea de las fallas

Además de lo descrito en los numerales anteriores, la información histórica e instrumental completa el cuerpo de investigación acerca de la amenaza de rupturas asociadas por fallas geológicas en la fundación de la presa.

Es necesaria la revisión de información sismológica instrumental para su análisis, así como la instalación de estaciones de manera que se pueda determinar la actividad real de las fallas.

Importancia de la determinación de actividad de las fallas

Tanto en el trabajo de la CGR⁴⁷ (2014) como en el presente estudio se ha establecido que los estudios de EMGESA – INGETEC⁴⁸ (2008) no llevaron a cabo de manera aceptable ninguna de las fases para determinar la actividad de las fallas y que este es un aspecto fundamental para definir, incluso, si una presa puede ser construida.

Los protocolos de ICold⁴⁹ (1998) también ratifican con una base muy técnica las exigencias que ha hecho la CGR en términos de la escala a la cual debe levantarse la información tectónica.

Las implicaciones de las omisiones deben ser subsanadas a la mayor brevedad, de la única manera posible, y es levantando información de campo, incluso en las zonas hoy inundadas, lo que establecería la necesidad de desembalsar (de manera adecuada).

Incertidumbres que persisten sobre la sismicidad inducida

Dentro de los compromisos que les estableció la ANLA a Emgesa está la inclusión de los datos de sismicidad de baja magnitud en los Informes de Cumplimiento Ambiental (ICA). No obstante, a la fecha de realización del presente informe no se tiene acceso a los ICA posteriores al llenado y funcionamiento del proyecto.

Observaciones sobre la instrumentación obligatoria establecida por la ANLA

Un mejor detalle de las consideraciones y monitoreo de la sismicidad inducida es dada en la resolución 0759 del 26 de junio de 2015, recogiendo específicamente lo detallado en el concepto técnico 11061 del 22 de septiembre de 2014, en el que se especifica la ubicación de tres sensores en la cresta de la presa principal, la cresta del dique auxiliar y la galería de acceso a la cámara de compuertas. Todas ellas enfocadas a hacer análisis de afectación de las estructuras y posibles efectos locales, de tal forma que cada uno de los sensores se activan y tienen un nivel de alarma dependiendo de una aceleración definida como se muestra en la siguientes tablas.

TABLA 1. NIVEL DE ACTIVACIÓN DE LOS ACELERÓGRAFOS, ADAPTADO DE RESOLUCIÓN 0759 DEL 26 DE JUNIO DE 2015.

Instrumento	Nivel de activación
AC1	0,01 g
AC2	0,01 g
AC3	0,005g

⁴⁷ Contraloría General de la República. Actuación especial, ANLA. Seguimiento a denuncias ciudadanas para exigir el cumplimiento de obligaciones ambientales en la actual construcción de hidroeléctricas. Septiembre de 2014.

⁴⁸ EMGESA - INGETEC. 2008. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo.

⁴⁹ ICold-International Committee on Large dams (1998). Neotectonics and dams. Bulletin 112.

TABLA 2. ALARMA Y RIESGO ASOCIADO A MOVIMIENTOS TELÚRICOS PARA EL PROYECTO EL QUIMBO, ADAPTADO DE RESOLUCIÓN 0759 DEL 26 DE JUNIO DE 2015

Instrumento	Nivel de Alarma		
	Amarilla	Naranja	Roja
AC1	0,2 g a 0,4 g	0,4 g a 0,8 g	>0,8 g
AC2	0,1 g a 0,3 g	0,3 g a 0,5 g	>0,5 g
AC3	0,1 g a 0,2 g	0,2 g a 0,4 g	>0,4 g

De la ubicación y especificaciones técnicas de los acelerógrafos se puede concluir que esta instrumentación tiene entonces como fin determinar los efectos locales que pueda tener un sismo en las estructuras (efectos que son modelados con anterioridad) y emitir alarma en el caso de que la aceleración sobrepase un límite, aspecto mencionado en las conclusiones de la resolución de la ANLA. .

Finalmente, la ANLA resuelve específicamente modificar la licencia ambiental para incluir el análisis y seguimiento a la sismicidad inducida durante el llenado y la operación del proyecto, constancia de lo cual debe quedar reportada en los informes de cumplimiento ambiental.

2.5 INFORME DE AUDITORÍA. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES – ANLA VIGENCIA 2015 (CGR, JUNIO DE 2016).

Respecto a las actuaciones de la ANLA durante 2015, la Contraloría General de la República en su informe se refiere al proyecto El Quimbo:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL QUIMBO

Hallazgo 14 (H14) Obligación de monitoreo de la sismicidad del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo – PHEQ

Los términos de referencia HE-TER-1-01 establecidos por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy MADS), en el año 2006 sobre los cuales se realizó el Estudio de Impacto Ambiental para el Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo, no incluyeron dentro de sus requerimientos el análisis de sismicidad inducida durante la fase de llenado de los embalses.

La Resolución 759 de 2015 modificó la Resolución 899 de 2009 que otorgó licencia ambiental al Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo y respecto de la sismicidad, señala en la página 24:

“Debido a la reiterativa ocurrencia de fenómenos de carácter geotécnico en sectores como La casa de Maquinas, El Dique auxiliar y el Vertedero, aunado a la expectativa de la población que habita en inmediaciones del proyecto, por la posible ocurrencia de sismicidad durante la fase de llenado del embalse, esta Autoridad considera que al no contarse con medidas y/u obligaciones relacionadas con el monitoreo de la sismicidad durante el llenado del embalse y la fase de operación del proyecto, es necesario modificar la Licencia Ambiental respecto a la

inclusión de este aspecto, lo anterior se soporta además que es una exigencia internacional a proyectos hidroeléctricos; por lo que la Empresa deberán cumplir con el seguimiento a la sismicidad y el análisis de los resultados obtenidos”

La ANLA impuso la obligación en la mencionada resolución modificatoria así:

ARTÍCULO PRIMERO.- *Modificar vía seguimiento la licencia ambiental otorgada mediante la Resolución 0899 de 2009, en el sentido de incluir dentro del “Programa de Atención y Protección de Sitios Críticos Sensibles o Vulnerables durante la Operación del Proyecto”, (numeral 7.3.1. del PMA), en el borde del embalse lo referente al seguimiento de la sismicidad, en donde la empresa EMGESA S.A. E.S.P., deberá cumplir con el análisis y seguimiento a la sismicidad inducida, y tomar las medidas pertinentes, realizando los monitoreos e instalar toda la infraestructura necesaria para tal efecto, mediante una estación de sismicidad que cumpla los estándares internacionales para tal actividad, de conformidad con lo expuesto en la parte motiva del presente acto administrativo.”*

Conforme lo anterior la sismicidad propia del proyecto, requería que las instalaciones e instrumentos estuvieran en funcionamiento previo al inicio de las labores de llenado y que sus reportes fueran tenidos en cuenta para la calibración de acuerdo a los datos y registros sismológicos regionales de la Red Sismológica Nacional de Colombia.

Esta obligación no se desarrolló, quedando así incompletos los registros de sismicidad al inicio del llenado del embalse y en la verificación del expediente LAM 4090 no se encontraron los soportes del seguimiento y análisis a la sismicidad inducida del proyecto después del llenado.

Respuesta entidad

“La Contraloría indica que por parte de la ANLA, no se ha verificado el cumplimiento del Artículo Primero de la Resolución 759 de 2016 y que no se han tomado acciones y medidas en contra de EMGESA S.A. E.S.P. afirmación frente a la cual, es preciso realizar las siguientes aclaraciones: (cursiva en texto)

- Del examen de la obligación establecida por el Artículo Primero de la Resolución 759 de 2015, se tiene que no posee el alcance que se cita en la observación de ese ente de control en lo relacionado con que sus reportes fueran tenidos en cuenta para la calibración de acuerdo a los datos y registros sismológicos regionales de la red sismológica nacional de Colombia a cargo del Servicio Geológico Nacional de Colombia. (cursiva en texto)

- De igual manera, es necesario tener en cuenta la fecha de ejecutoria del Acto Administrativo (24 de noviembre de 2015), fecha a partir de la cual jurídicamente era posible exigir a la Empresa el cumplimiento de esta obligación, así las cosas la información soporte de esta obligación debe estar contenida en el Informe de Cumplimiento Ambiental ICA 13

(correspondiente al periodo comprendido entre el mes de septiembre de 2015 y el mes de febrero de 2016), el cual fue allegado al expediente mediante radicado 2016017116-1-000 del 6 de abril de 2016, es decir dentro de los términos de la licencia. (cursiva en texto)

Aunado a lo anterior, durante las visita (sic) adelantada por parte del equipo de seguimiento realizada del 25 al 30 de mayo de 2015, por parte de la ANLA se verificó que se venían adelantando las actividades de instalación de la instrumentación y así quedo (sic) registrado en la parte considerativa de la Resolución 759 de 2015 (páginas 22 y 23): “(...) durante la visita al proyecto realizada los días 25 al 31 de mayo de 2015, se pudo verificar La Empresa actualmente se encuentra trabajando en la instalación de esta infraestructura de seguridad y monitoreo, a continuación se presentan las labores realizadas hasta la fecha y las cuales tienen un avance del orden del 96% (...)” (cursiva en texto)

“Así las cosas, la ANLA no comparte la afirmación realizada por parte del ente de control en cuanto a que no se ha verificado el cumplimiento del Artículo Primero de la Resolución 759 de 2015, toda vez que conforme a la fecha de ejecutoria del precitado Acto Administrativo (24 de noviembre de 2015) el reporte de los registros teniendo en cuenta la periodicidad semestral de los informes de cumplimiento ambiental (ICA), debería reportarse en el ICA 13, el cual fue entregado el 6 de abril de 2016, po lo tanto esta información se encuentra en evaluación por parte de la ANLA y aun no ha sido emitido el concepto técnico en donde se verifique la información reportada por parte de EMGESA S.A. E.S.P., para que sea acogido por Acto Administrativo y allí se determinen la (sic) obligaciones a que haya lugar” (cursiva en texto)

Análisis respuesta

Según lo informado por la Entidad la Resolución 759 de 2015 quedó ejecutoriada el 24 de noviembre de 2015 por lo tanto el cumplimiento de la obligación será registrada en el ICA 13, se modifica el hallazgo en lo correspondiente a la no revisión del cumplimiento del artículo primero de la Resolución, y se confirma en lo relacionado con la no existencia de reportes de sismicidad previo al inicio de las labores de llenado; según lo informa ANLA en ese momento se encontraban finalizadas las actividades de instalación de la instrumentación de los acelerógrafos. Se confirma el hallazgo administrativo.

Finalmente, la CGR encuentra en el caso del monitoreo de la sismicidad inducida y desencadenada, la falta de seguimiento previo al inicio de las labores de llenado.

Aunque como resultado de esto se obliga a la empresa a hacer seguimiento de la sismicidad en la zona, el objetivo es meramente de monitoreo y no hay en si un carácter de mitigación y prevención. De igual forma, no se presenta y hasta el momento no existe en la información de carácter público que reposa en el expediente, un análisis en conjunto de la información sismológica de la red nacional de acelerógrafos y la red sismológica nacional. En este sentido se debe resaltar la falta de una metodología clara para el

manejo y procesamiento de la información así como suficiencia de la instrumentación, siendo esto lo más relevante.

3 ASPECTOS DE AMENAZA SÍSMICA NO CONSIDERADOS POR EMGESA

3.1 TECTÓNICA Y SISMOGENERACIÓN

Como se anotó en el numeral 2, la descripción de las fallas geológicas en función con la sismogeneración por parte de EMGESA – INGETEC (2008) contiene gran cantidad de incoherencias, inexactitudes y omisiones en la información.

En primer lugar, los estudios sobre fallas geológicas son muy genéricos, sin datos de campo que permitan avanzar en el conocimiento tectónico. Las fallas cartografiadas no contienen datos de campo ni de subsuelo (a partir de información directa o indirecta) que permitan soportar la clasificación de las fallas, de las cuales, la más importante es la Falla de Algeciras.

La Falla de Algeciras ha sido muy bien estudiada desde un enfoque morfotectónico por Velandia et al.⁵⁰ (2001) y a diferencia de los planteamientos de EMGESA – INGETEC (2008) no corresponde a una falla inversa sino a una falla con predominio muy marcado en el rumbo, con sentido de desplazamiento dextral.

También se han reportado zonas de deformación transversal con tendencia WNW-ESE (Jiménez et al., 2012), en coherencia con los hallazgos preliminares generados en el presente estudio. Una de estas zonas de deformación coincide con la zona de construcción de la presa, situación no detectada por EMGESA - INGETEC (2008) en el estudio ambiental.

- **Falla de Algeciras**

El Sistema de Fallas de Algeciras se refiere a un conjunto regional de fallas con tendencia NE-SW que se extiende desde Ecuador hasta el Piedemonte Llanero, a lo largo de 350 km. Corresponde a una estructura de carácter predominantemente lateral derecho (dextral), lo cual está documentado de manera detallada por Velandia et al. (2001) con base en análisis morfotectónicos y soportado en datos sismológicos. Estos autores han dividido la falla en sectores, en los cuales han descrito características de neotectónica. Para el sector Algeciras–Balsillas, los autores relacionan la Falla de Algeciras con la de El Hobo, esta última de carácter sinistral:

Los rasgos neotectónicos, escarpes, desplazamientos de abanicos aluviales, lagos alineados, lomos de presión, cursos de agua deflectados o decapitados indican el carácter dextral de la Falla de Algeciras y su alta tasa de actividad. El mismo sentido de cizalla y desplazamiento de cerca de 3 km con una tasa de 1,5 mm/año durante los últimos 2 millones de años fue establecida por Chorowicz et al. (1996).

⁵⁰ Velandia, F., Terraza, M. R., & Villegas, H. (2001). El Sistema de Fallas de Algeciras hacia el suroeste de Colombia y la actual transpresión de los Andes del Norte. In VIII Congreso Colombiano de Geología. Memorias (CD–Room).

(...)

El epicentro de un importante sismo que ocurrió en 1917 se relaciona con esta falla.

En febrero de 1967, ocurrió un sismo de magnitud 6,7 y profundidad de 50 km asociado con este sector de la Falla de Algeciras, el cual destruyó el pueblo de El Paraíso.”

Contiguo hacia el sur con el sector Algeciras–Balsillas se encuentra el sector Zuluaga–Garzón, donde de acuerdo con Velandia et al. (2002):

“La actividad neotectónica se evidencia en el desplazamiento de depósitos Cuaternarios (Diederix and Gómez, 1991; Van der Wiel, 1991).”

El sector más sur dentro del Departamento del Huila es el sector de Altamira–Pitalito, donde los mismos autores establecen:

“Los rasgos neotectónicos dentro de los depósitos cuaternarios indican el desplazamiento lateral derecho a lo largo de esta falla (Diederix and Gómez, 1991) (...)

La Falla de Acevedo, que controla el valle del río Suaza es otra estructura importante en este sector (...) Un sismo ocurrido en 1827 fue localizado en la frontera entre los departamentos de Huila y Caquetá por Ramírez (1975)”

La sismicidad histórica muestra grandes sismos asociados a este sistema de fallas e incluso los sismos ocurridos muy recientemente, el 31 de octubre de 2016 pueden estar asociados a la parte más norte del Sistema de Fallas de Algeciras.

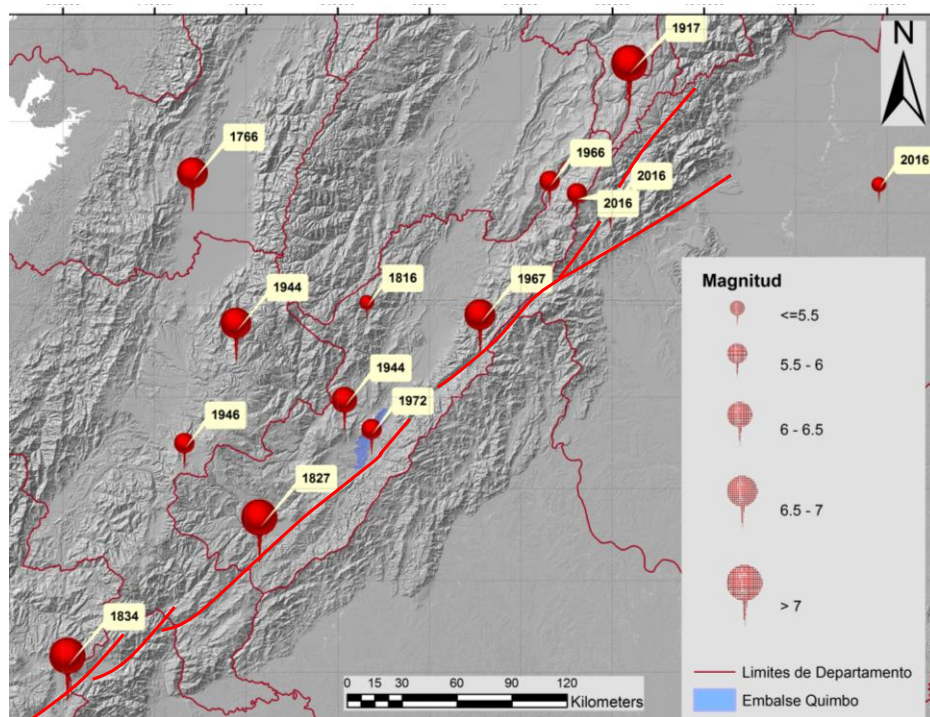


FIGURA 11. FALLA DE ALCERAS Y RELACIÓN CON SISMICIDAD HISTÓRICA Y RECIENTE. NÓTENSE LAS DISTANCIAS DE LOS EPICENTROS DE SISMOS COMO EL DE 1944 Y 1972, LOS CUALES NO HAN SIDO REPORTADOS EN LOS ESTUDIOS DE EMGESA – INGEC. POR OTRA PARTE, LA DISTANCIA EPICENTRAL DE UN SISMO TAN FUERTE COMO EL DE 1827 ES PREOCUPANTE. FUENTE: VELANDIA ET AL., 2001 Y ESTE TRABAJO.

- **Zona de deformación transversal sinistral de El Quimbo**

Esta denominación informal es tomada en el presente trabajo a una franja de deformación con dirección aproximada N70W que controla el río Páez en su confluencia con el río Magdalena. Esta franja fue planteada por Jiménez et al.⁵¹ (2012) y de su trabajo es evidente que esta zona levanta el bloque ubicado al norte, haciendo aflorar secuencias jurásicas.

⁵¹ Jiménez, G. (2008). Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del Valle Superior del Magdalena (Anticinal de la Hocha).

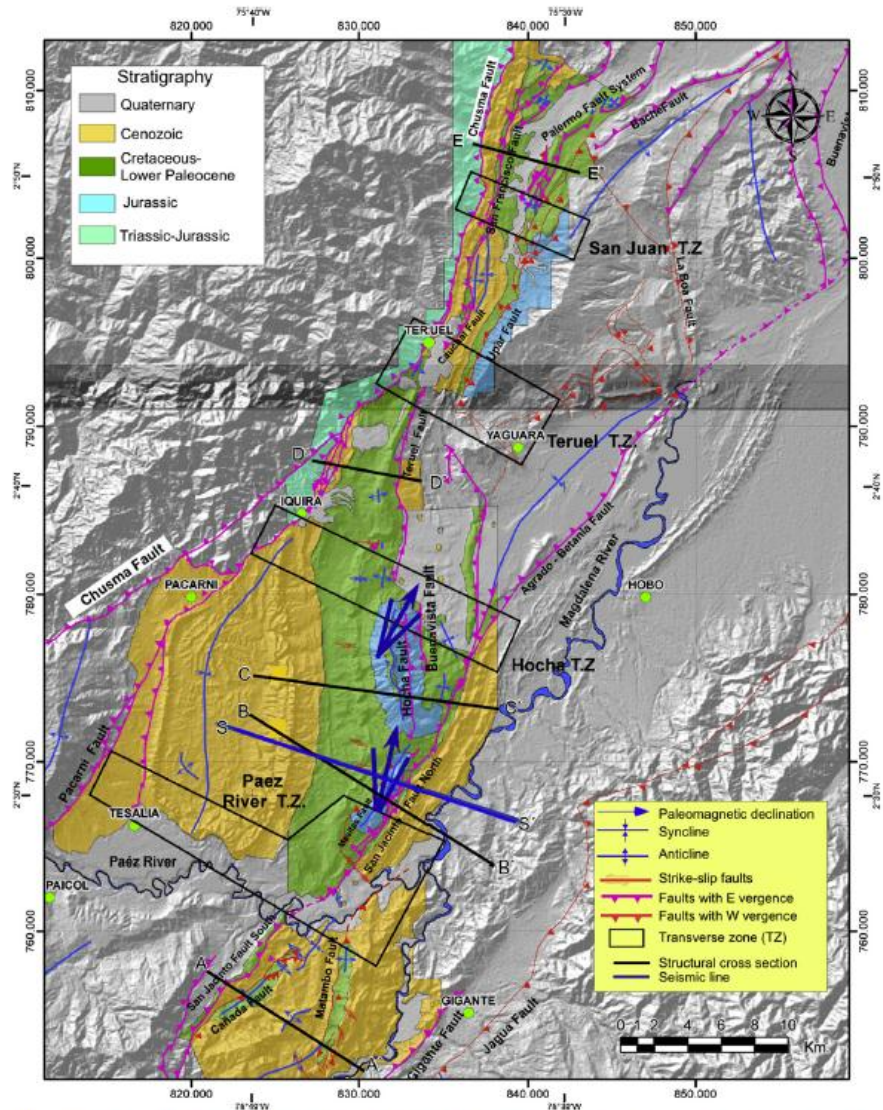


FIGURA 12. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA ENTRE GIGANTE Y TERUEL (JIMÉNEZ ET AL., 2012). NÓTESE LA ZONA DE DEFORMACIÓN TRANSVERSAL CON DIRECCIÓN WNW-ESE QUE CONTROLA EL TRAMO FINAL DEL RÍO PÁEZ.

En este trabajo, se llevó a cabo un trabajo de interpretación morfotectónica de alineamientos de rasgos topográficos como filos, valles y ríos, con el fin de acercarse al marco de deformación tectónico del área de El Quimbo. Los indicios morfotectónicos, en particular lomos de presión y cambios de buzamientos y rumbos de los flancos de los pliegues en las secuencias sedimentarias permiten inferir desplazamientos laterales izquierdos (sinestrales) para esta zona.

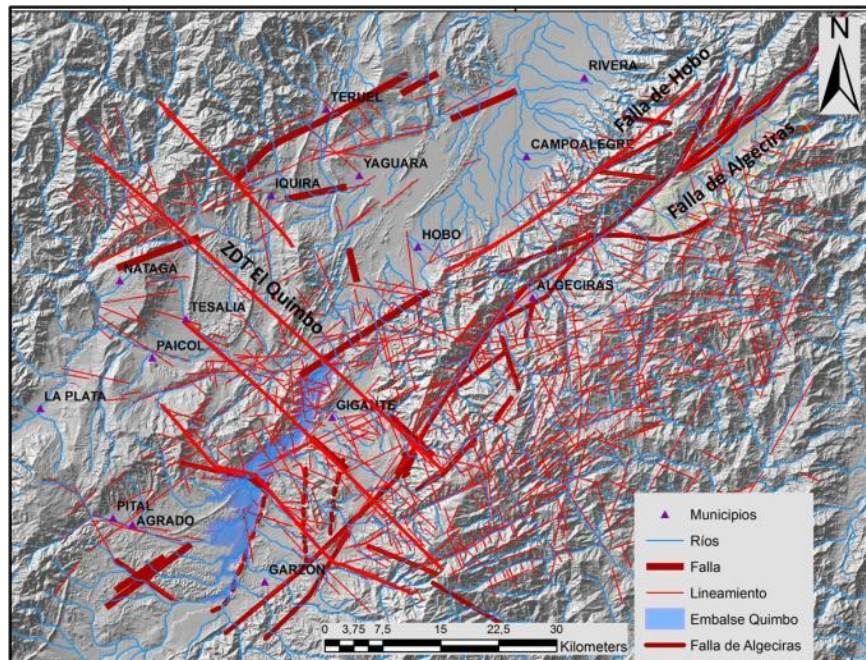


FIGURA 13. ESQUEMA MORFOTECTÓNICO DE ALINEAMIENTOS Y DE FALLAS INFERIDAS PARA LA ZONA DE ESTUDIO.
ELABORACIÓN PROPIA.

- **Fallas locales en la zona de presa**

Durante una visita de campo a los procesos de inestabilidad en el dique auxiliar y la casa de máquinas, realizada como asesor de la Contraloría General de la República, el geólogo Julio Fierro Morales, uno de los profesionales que suscribe el presente informe, tomó datos de 7 fallas en afloramiento (mesoscópicas), una de las cuales facilitó el proceso de remoción en masa que afectó la excavación de la casa de máquinas en 2012 y que tenía más de 20m² de cara expuesta. Las fallas con plano estriado fueron analizadas en el presente estudio para obtener una solución teórica de esfuerzos tectónicos del área de la presa.



FIGURA 14. PLANO DE FALLA MESOSCÓPICA DE CARÁCTER SINISTRAL SOBRE CONGLOMERADOS DE LA FM. GUALANDAY. LAS ESTRÍAS DE FALLA SE OBSERVAN EN EL PLANO DONDE DESCANSA EL MARTILLO.



FIGURA 15. PLANO DE FALLA MESOSCÓPICA DE CARÁCTER DEXTRAL

A partir de los datos medidos y con el uso del programa FaultKink, se obtuvo una solución teórica de esfuerzos, la cual es coherente, tanto con la dirección de la Falla de Algeciras, como con la denominada informalmente en este trabajo, Zona de deformación transversal sinistral de El Quimbo. Es pertinente anotar que esta configuración de esfuerzos tectónicos parte de la medición de muy pocas fallas mesoscópicas y que es una propuesta preliminar, pero sirve para ilustrar las deficiencias de los estudios de EMGESA – INGETEC (2008 y 2009), donde luego de años de trabajo no presentan una sola medición de planos de falla geológica ni una sola propuesta de esfuerzos tectónicos. De

igual manera, se contradice a funcionarios de la ANLA quienes afirmaron que las rocas de la Formación Gualanday no estaban afectadas por fallas geológicas.

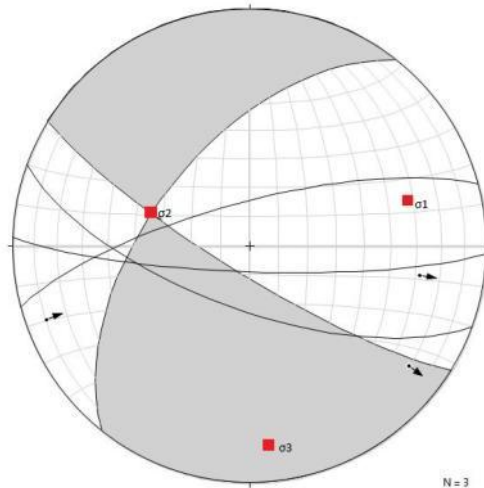


FIGURA 16. SOLUCIÓN TEÓRICA DE ESFUERZOS PARA LA ZONA DE PRESA DE EL QUIMBO CON BASE EN MEDICIÓN DE FALLAS MESOSCÓPICAS CON RASGOS CINEMÁTICOS. NÓTESE LA DEFORMACIÓN POR CIZALLA EVIDENTE, LO CUAL CONTRADICE LOS POSTULADOS DE EMGESA PARA LAS FALLAS EN LA ZONA DE ESTUDIO.

En el numeral 7.2.1.4 se verán las graves implicaciones de las omisiones y deficiencias que se evidencian en los estudios geológicos de EMGESA en relación con la actividad de fallas que se encuentran tanto en el campo cercano (menos de 30 km) como en la zona directa de construcción de la presa.

- ***Predominio de deformación por cizalla en el área***

Otro documento no revisado ni referenciado por Emgesa es la “Evaluación de las amenazas potenciales de origen geológico (actividad sísmica y volcánica), geomorfológico (remociones en masa y erosión) e hidrometeorológico (dinámica fluvial, inundaciones y sequías) y caracterización geotécnica preliminar de las cabeceras municipales del Departamento del Huila” elaborado por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena en convenio con el Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia en 1999, en particular la “Evaluación preliminar de la amenaza sísmica del Departamento del Huila”

En ese documento, además de aspectos de sismicidad histórica es interesante el aparte que tiene que ver con los mecanismos focales, que son soluciones teóricas que se plantean con base en la llegada de ondas sísmicas (en particular la primera llegada) generadas por un evento con magnitud mayor de 4 detectada por más de 10 estaciones sismológicas y que sirven para establecer la dirección de los esfuerzos tectónicos así como la posibilidad de que una de dos fallas conjugadas (ver numeral 1 de este documento) haya sido la que generó el sismo.

Es interesante que se resalta que:

“Los sismos a partir de los cuales se han obtenido los mecanismos focales del suroccidente colombiano en diferentes estudios, han sido producidos, en su mayoría, al occidente de la Costa Pacífica y en la zona del viejo Caldas. En el presente trabajo sólo se tuvieron en cuenta los mecanismos obtenidos a partir de sismos producidos en el Departamento del Huila o en Departamentos cercanos como Tolima, Valle del Cauca, Cauca, Caquetá y Meta. Los mecanismos aquí analizados corresponden a diferentes estudios como los efectuados por Salcedo et al, 1995, por The National Earthquake Information Center, y a mecanismos elaborados por el Centro de Procesamiento de Información Sismológica (CPIS) de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional para el presente trabajo (...)

Los sismos que produjeron los mecanismos identificados con las fechas 18/6/66, 9/2/67, 18/10/73 y 13/11/84 han sido relacionados según diferentes estudios como el realizado por Salcedo et al (1995), con las fallas del Sistema Frontal de la Cordillera Oriental. Los mecanismos focales obtenidos en el CPIS e identificados con 23/04/96 y 29/06/96, parecen estar, por su ubicación relacionados con el mismo sistema. El sismo a partir del cual se obtuvo el mecanismo identificado como 9/2/67, es uno de los más fuertes que ha azotado el Huila en la historia reciente, y ha sido relacionado, usualmente con la falla Algeciras

El mecanismo identificado como 31/3/83 se generó durante el sismo conocido como el sismo de Popayán que afectó fuertemente esta (sic) ciudad en 1983. La localización exacta de este sismo no fue determinada por la carencia de una red sismológica local en el área, sin embargo, el sismo fue asociado a una de las fallas que componen el sistema Romeral en esta parte del país.

El mecanismo identificado como 6/6/94 fue generado por el sismo conocido como sismo de Páez, que fue relacionado inicialmente con la falla Moras perteneciente al sistema Romeral. Sin embargo, otros estudios realizados con base en la distribución de réplicas y mecanismos focales de éste sismo evidenciaron otra falla denominada Falla Irlanda que se encuentran localizada en la vertiente oriental de la Cordillera Central en la cuenca del Río Páez”

El documento incluye la cartografía de estos sismos, la cual fue retomada y graficada para el Departamento del Huila, obteniendo interesantes resultados al sobreponerla al modelo de sombras (el cual permite una visualización perfecta de la Falla de Algeciras). El primero de ellos es que, tal como se propone en este documento, la mayor parte de sismos ha sido generado por fallas con predominio en el rumbo y NO por fallas inversas, que es el modo en que las describe Emgesa – Ingetec, tanto en el EIA como en el estudio de amenaza sísmica del Quimbo.

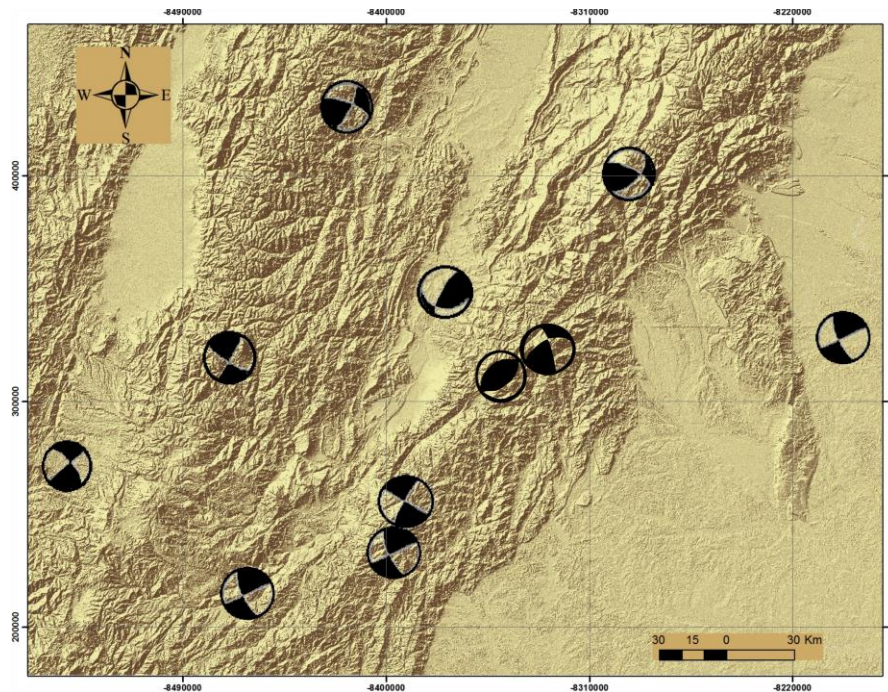


FIGURA 17. SOLUCIONES TEÓRICAS DE ESFUERZOS CON BASE EN MECANISMOS FOCALES. NÓTESE EL PREDOMINIO DE LA DEFORMACIÓN POR CIZALLA, LO CUAL CONTRADICE LOS POSTULADOS DE EMGESA PARA LAS FALLAS EN LA ZONA DE ESTUDIO. TOMADO DE CAM-IDEA, 1999 Y GRAFICADO SOBRE MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN PARA DESTACAR LA FALLA DE ALGECIRAS.

Se reitera que el no entendimiento de las fallas geológicas hace que los estudios de sismicidad natural y sismicidad inducida/desencadenada no tengan una base técnico-científica y por lo tanto todas las consideraciones que haya planteado la empresa tienen una muy alta incertidumbre, faltándose con ello al Principio de Precaución.

3.2 SISMICIDAD HISTÓRICA

En este aparte se destaca la información histórica de tres sismos relacionados con el Sistema de Fallas de Algeciras, dadas las implicaciones en términos de amenaza sísmica y sedimentación, aspectos no considerados por EMGESA en sus estudios ambientales.

Con base en la información documental que reposa en diversos archivos, así como de memorias de viajeros, naturalistas y próceres, el padre Jesús Emilio Ramírez realizó una portentosa tarea de recopilación de eventos históricos de carácter sísmico y volcánico que plasmó en su “Historia de los Terremotos en Colombia”, publicado en 1975. De allí se transcriben en extenso, dada su importancia para el tema de la planificación territorial y de los proyectos hidroeléctricos, los testimonios de tres sismos relacionados con la Falla de Algeciras (Velandia et al., 2001): el del 18 de noviembre de 1827, el de 2 de 1834 y el del 9 de febrero de 1967.

Sismo de 1827

“(…) aconteció el 16 de noviembre del mismo año, a las 6 de la tarde. Mi casa se despedazó; yo estaba escribiendo. Como el movimiento continuaba, salí y vi a uno de mis criados en oración cantando; Santo Dios, Santo Fuerte, Santo Inmortal,

libranos de todo mal. Entré a mi choza y comencé a contar el tiempo en mi cronómetro. La tierra tembló aún durante 3 minutos, no creo que exagere si digo que las oscilaciones horizontales del sureste al noroeste duraron 6 minutos en total.

Después de eso supe que en Bogotá, a la misma hora, el suelo de había sacudido durante 8 minutos.

Hay pocos ejemplos de terremotos tan prolongados, y la circunstancia de haber seguido la muestra de un cronómetro es suficiente para establecer de la manera más segura que el fenómeno tuvo una duración anormal. Este terremoto fue particularmente destructor en los departamentos del Huila, Cauca y Cundinamarca.

(...)

“Llenó la ciudad (Popayán) de ruinas y desolación...; sobrevino apenas puesto el sol, y los habitantes en su mayor parte salieron huyendo a las márgenes del Cauca en busca de seguridad. Pero allí les aguardaba mayor conflicto, pues notaban que las aguas del río se iban mermando; y mientras observaban pasmados el caso, sin comprender lo que era, ni poder indagar la causa, se vieron de repente sorprendidos por una creciente formidable que, según después se supo, debió su origen a la violencia con que se rompieron las aguas de uno de los afluentes del Cauca, represadas por una peña que con el terremoto se desgajó de las montañas. El terror fue indecible.

(...) acaso principalmente del páramo de Las Papas, de donde nacen el Cauca y el Magdalena. Dichos montes con la explosión arrojaron a los ríos que corren hacia el Cauca, mucha agua y cieno de las lagunas y pantanos que hay en la cima de la cordillera, lo que hizo crecer los ríos, cuyas aguas se pusieron fétidas con las materias volcánicas arrojadas en ellos. Lo mismo sucedió hacia el Magdalena; sus aguas se enturbiaron a tal punto que murieron muchos peces y aseguran también que estaban hediondas. En el valle de Neiva fue horrible el terremoto, cayendo todas o la mayor parte de las casas de paredes y tejas, lo mismo que las iglesias. Muchos cerros se han desplomado, y con sus ruinas taparon algunos ríos y quebradas; así sucedió con la Honda, en cuyas vegas había hermosos plantíos de cacao; estuvo tapada algunos días, y rompiendo después el impedimento arrastró lo que hallaba al paso, destruyendo las haciendas, y ahogando 161 personas; en otro punto se ahogaron 21, y pasan de 200 las que se sabe haber parecido en la provincia de Neiva a consecuencia del terremoto.

(...)

“Diciembre 9. Por el terremoto del 16, dos cerros que formaban un estrecho en el río de Suaza, del cantón de Timaná, en Neiva, se derrumbaron y taparon del todo el curso de las aguas. Se temía una fuerte inundación si de repente rompía los diques. Los habitantes del valle de Neiva se hallaban habitando los cerros hasta ver en qué paraba la inundación del Suaza. Diciembre 14. Por el último correo se

dice que habían transcurrido 21 días desde que este río, que es grande, pues apenas da vado, estaba detenido, había ya formado un gran lago y sumergido las parroquias de la Viciosa y Guadalupe, que están a sus márgenes. Esperaban que rebosara por otros puntos laterales de las cordilleras que forman el valle por donde corre; para salir por su antiguo cauce dicen que le faltaban 14 varas, y que cada 3 días subían las aguas media vara, Los habitantes de aquellas cercanías trabajaban por hacerle un nuevo lecho, y ojalá salgan felices sus esfuerzos!" (158, T. I, p. 366).

Y por fin:

"Por el último correo de Neiva se dice que el río Suaza aún permanece tapado enteramente. Aseguran que ha anegado un valle de dos leguas de largo, media de ancho, y en él sobre 27 haciendas de cacao. La profundidad del agua es de 150 varas. Los cerros que se juntaron y cerraron un estrecho del río son de piedra, y podrán sostener el gran peso de agua que al fin saldrá por encima dejando un gran lago. Entonces no hará tantos daños como si rompiera el dique de repente, en cuyo caso asolaría todo el valle del Magdalena.

Diciembre 31. A las 10 y tres cuartos de la mañana hubo un sacudimiento sensible de la tierra que no fue recio ni largo. Un oficial, Meyer enviado por el ejecutivo, ha dirigido un canal que cortara las ruinas de los cerros que tapaban el Suaza; lo acerca imprudentemente el agua detenida esta rompe el dique, arrastra muchos trabajadores y causa una gran creciente en el río Magdalena, que hizo muchos daños, esterilizando también sus vegas por la tierra no vegetal y la arena que depositó en ellas" (158, T. I, p- 367). (Subrayado fuera de texto)

En el archivo parroquial de Gigante, Tomo I, hay una nota del párroco Andrés Quijano al obispo Salvador Jiménez y Padilla, en que se dice:

"No se ha podido reedificar la iglesia de calicanto que cayó en el año de 1827 y se hace necesario ensanchar la que hay dándole 16 varas más que contendrán la capilla, la sacristía, etc."

Debo al Dr. Manuel José Forero esta copia del manuscrito original del Archivo Nacional, en la que D. Pío Quinto Rojas, vecino de Buenavista, relata lo sucedido con fecha 16 de noviembre de 1827:

"En mi concepto este terremoto ha tenido su origen en una larga cordillera de peñascos y eminencias situadas a la banda del oriente y que sirve de cubierta a la montaña de los Andaquíes. Desde allí ha repartido su impulso rápidamente por el espacio de muchas leguas en contorno. A lo largo de esta cordillera, y al pie de ella están situados la mayor parte de los pueblos y parroquias que componen el cantón de Timaná, como también gran número de haciendas, hatos, labranzas y otras muchas posesiones de más o menos representación. Todo ha caído; todo se ha convertido en ruinas; los templos, las casas, las chozas están por el suelo, y entre los escombros de los edificios de las peñas se hallan sepultados los cuerpos de tantos infelices que perecieron sin recurso. El impulso ha sido tan violento que

la tierra se ha abierto en muchas partes vomitando chorros de agua, barro y otras materias; algunas habitaciones han desaparecido, y naturalmente se concibe que se las tragó la tierra, y muchos peñones que un millón de hombres robustos no hubieran podido mudar de su lugar un solo paso, han mudado de puesto en un momento, nadando enteros sobre la misma tierra. No es menos el daño padecido en los otros partidos pertenecientes al cantón de La Plata. En esta población apenas habrá una casa en pie; la iglesia y habitaciones están en tierra, y el partido del Pital que es el que menos ha padecido pues no perdió su capilla, no carece de daño en lo demás.

Pero el estrago del terremoto, a pesar de lo dicho, no ha sido tan considerable ni tan espantoso en sus consecuencias (pues a lo menos no han muerto tantos desgraciados), en comparación de los daños y pérdidas incalculables que han ocasionado las grandes y copiosas crecientes y derrames de las quebradas y otros arroyos. Parece que la tierra y el agua se convinieron para asolar y destruir estos lugares, más señaladamente de los partidos de Garzón y de Gigante. Sea que el mismo terremoto hizo desprender de los peñascos que rodean las cabeceras de las quebradas Honda y Mapia gran cantidad de piedras, tierra y árboles, los cuales atajando las corrientes del agua las estancaron de manera que por la cantidad de la compresión se destacasen con suma violencia; o sea que este acopio de aguas fuese el resultado de una abundante lluvia que cayó el mismo día 16 por la mañana; o sean juntas una y otra causa, lo cierto es que una hora después del terremoto bajó una creciente tan impetuosa y abundante, que arrastró consigo cuanto se hallaba al paso, como hombres, bestias, habitaciones, labranzas enteras, y otras labores. Estas quebradas Honda y Mapias tienen su origen y cabeceras en lo interior de la montaña de los Andaquíes, y penetrando las honduras que forman los peñascos de la cordillera, la una baña el partido de Garzón, que está al oriente, y la otra va, torciendo su curso al norte y se entra en las tierras y partido del Gigante... Allí se veían muchas casas, trapiches, grandes ramadas, y otras viviendas: continuamente estaban aquellos sitios llenos de gente, ya de los propietarios de aquellos cacahuales (cacaotales), ya también de los jornaleros, peones, arrendatarios y familias de estos... La impetuosa corriente arrebató con todo, todo quedó asolado; quince personas han perecido sumergidas entre el lodo y el agua, y a la mayor parte sus mismas casas sirvieron de sepulcro!". (Subrayado fuera de texto)

Corrobora lo acaecido D. Gabino Charry, en "Frutos de mi tierra":

"Tocaba a su término el año de 1827. Era el 16 de noviembre cuando, a eso de las cinco y tres cuartos de la tarde, se sintió en todas partes un violento terremoto que redujo a escombros la mayor parte de los pueblos de la provincia y algunos otros de fuera. Casi no quedó un solo edificio en pie. Los ríos y quebradas salieron de madre, por los cuales no corría agua sino lodo abrasador y pestilente que a su paso sembraba la desolación y la muerte.

La tierra continuó agitándose por muchos días con breves intervalos; oscilante en unas partes, trepidante en otras.

El cerro de Buenavista, situado en la margen derecha del río Suaza, y el del Grito en la opuesta, casi enfrente uno de otro, se derrumbaron sobre el río y lo detuvieron en su curso por espacio de cincuenta y cinco días. Las aguas, represadas, formaron una inmensa laguna que cubría los sitios de Lagunilla, Los Cauchos, las vegas de Turupamba y el caserío de La Viciosa (Guadalupe).

Las aguas allí aglomeradas no podían tener otra salida que por el lugar donde se hallaba obstruido el río, pues este corre apretado por entre dos cordilleras; y esa barra era de tal magnitud que a pesar del creciente aumento de ellas no habían podido franquearla.

El gobierno de Bogotá, avisado de tan extraordinario suceso, envió inmediatamente al coronel Francisco Meyer al lugar del siniestro, para que, como ingeniero, removiese el obstáculo que detenía la corriente. Llegado que hubo al lugar de su destino nombró al señor Matías González proveedor de víveres para mantener la muchedumbre de gente que acudía a prestar sus servicios tan oportunos en aquellos críticos momentos.

Los trabajos empezaron el 24 de diciembre siguiente, tomadas previamente todas las precauciones que el caso demandaba para poner a salvo a los peones. Llevaban ya diez y siete días en tan ruda labor empleados con febril entusiasmo sin que nadie presintiera la proximidad de una catástrofe. Ya fuera por la excavación ejecutada en la parte libre, ya por la inmensa presión que ejercían las aguas por su parte, se efectuó de súbito la ruptura del muro en altas horas de la noche del día 10 de enero del siguiente año. Un trueno prolongado, aterrador, espantoso. se dejó oír por todos los ámbitos de la comarca. Aquella estupenda mole de agua se lanzó con una velocidad que daba vértigo; llega al Magdalena, que a la sazón venía creciendo, rechaza sus aguas con ímpetu horrible, y ya aumentado el caudal de su corriente sigue destruyendo todo cuanto encuentra a su paso... (Subrayado fuera de texto)

(...)

Sismo de 1834

“Bajo auspicios nada favorables se inició el año de 1834, pues el 20 de enero a las siete de la mañana fue poco menos que convertida en ruinas la ciudad de Pasto, por un terremoto cuyas violentas sacudidas duraron varios días; por la misma causa quedó destruida la ciudad de Almaguer, en la provincia de Popayán, y también el pueblo de Santiago de Sibundoy (...)

El foco del fenómeno, según informe del gobernador de Pasto, estaba en la Cordillera Oriental, hacia las fuentes del Caquetá y el Putumayo.

(...)

“En tiempo de los viejos hubo un terremoto en Santiago; fue hirviendo la tierra, se elevó y formó una masa de tierra que formó una montaña que se llama Cuandasoy”

(...)”

Sismo de 1967

1967, febrero 9, 10:24 a.m. –Esta convulsión telúrica centralizada en el departamento del Huila, causó pérdidas de vidas u daños sin cuento. (Subrayado fuera de texto)

“Las regiones circunvecinas de los Llanos Orientales y de los departamentos de Cundinamarca; Tolima, Valle y Cauca participaron también de la desgracia, aunque en menor escala. El mismo del 9 de febrero se sintió en varias Repúblicas desde Caracas hasta Iquitos en el Perú y desde Buenaventura en el Pacífico hasta Mitú en los límites con el Brasil y dejó una estela roja de 98 víctimas y destrozos por un valor de unos 300 millones de pesos. Por estos datos se puede juzgar de su magnitud.

(...)

El epicentro correspondió a las siguientes coordenadas geográficas que lo determinaron así: 2.9 N. y 14.80, lo que corresponde a un punto de la superficie en la Cordillera Oriental a unos pocos kilómetros al E. de Vegalarga y a unos 40 kilómetros al NE de Neiva. El hipocentro se localizó a 50 kilómetros debajo de la Cordillera Oriental.

En general el sismo fue más intenso de N. a S. a lo largo de la Cordillera Andina que de E. a O. En Bogotá alcanzó una intensidad de VII, en Pasto de IV, en Quito de III y en Iquitos y en Caracas de I en la escala de Mercalli. Las poblaciones más afectadas fueron sin duda: El Paraíso, Vegalarga y Colombia en el Huila. Vegalarga era un floreciente caserío asentado sobre una inclinada terraza aluvial. Sobre ella corre el río Fortalecillas encajonado por altos cerros buscando presuroso su salida al valle de Neiva. En Vegalarga diez casas rodaron por tierra destruidas totalmente, y el ciento por ciento del resto sufrió averías de consideración. Las piedras saltaban en las calles y hasta la pequeña construcción de ladrillo, cemento y teja de Eternit del puesto de salud se rajó en sus muros. En las veredas de Guamol, la Batalla, Balsillitas, El Cedral, El Candado y el Motilón, que rodean a Vegalarga por el norte, el este y el sur, las viviendas casi en su totalidad quedaron totalmente arruinadas y sus habitantes hubieran de echarse a tierra durante los remezones para no caer. (Subrayado fuera de texto)

En la escala de Pasadena al macrosismo del Huila le correspondió una magnitud de 6.7 y su duración fue de más de un minuto. (Subrayado fuera de texto)

(...)

Se observaron y se fotografiaron cientos de derrumbes o gritas superficiales sobre las carreteras, en las colinas y en las partes erosionadas y pendientes de la cordillera. Algunos derrumbes represaron las aguas de los ríos La Ceiba y el Motilón, aunque sin consecuencias serias, En Baraya hubo una víctima arrollada por las piedras de los cerros.

(...)

En varios sitios se dio el caso de que las fuertes presiones del suelo hicieran saltar arena o agua sola o con lodo y arena: este fue el caso en una hacienda del doctor Ignacio Solano, cerca de Fortalecillas (el agua duró saltante durante media hora). En Llano Norte, cerca de Campoalegre, brotó agua con arena grisosa. El Sr. Ramiro Bernal contó que el río Guarocó aumentó su caudal de aguas en un ciento por ciento.

En Neiva se hablaba de fenómenos raros aparecidos en las fuentes termales de Rivera, pero creo que no se diferenciaban de los ya mencionados: En Altamira existían muchas consejas acerca de un volcán, que había aparecido en la vereda de Pajijí. Los relatos de los testigos y algunas muestras del lodo del volcán indicaban que era un fenómeno natural de ignición espontánea del suelo debido a sulfuros de hierro (piritas) por descomposición química con desprendimiento de azufre y parecido a otros casos observados ya en el departamento de Cundinamarca.

De la lectura de los testimonios históricos, además de los documentos técnicos relacionados con el sismo de 1994 que generó los flujos de lodos y escombros del río Páez demuestran que la generación de deslizamientos y flujos por la ocurrencia de sismos hace parte de la dinámica natural del territorio. Estos procesos de remoción y transporte en masa pueden llegar a represar los ríos lo cual conlleva la amenaza de flujos torrenciales de altísima energía que pueden causar desastres de carácter nacional. De acuerdo con el ingeniero Manuel García López, profesor emérito de la Universidad Nacional de Colombia, los efectos de los eventos de flujo torrencial por los deslizamientos inducidos por el sismo de 1827 que represaron el río Suaza (presa que sufrió rotura súbita en enero de 1828) se evidenciaron en la depositación de grandes volúmenes de materiales en la confluencia del río Suaza y el Magdalena y en una gigantesca creciente que al parecer afectó las zonas ribereñas al menos hasta la población de Honda.

No obstante lo anterior, los cálculos de sedimentación realizados por EMGESA-Ingetec (2008) no consideran estas variables, con lo cual, ante la ocurrencia de un sismo de magnitud considerable, no solamente corren riesgo las estructuras relacionadas con la represa, sino que si soportan las cargas sísmicas, la vida útil del proyecto puede llegar a acortarse considerablemente.

3.3 SISMICIDAD INSTRUMENTAL. ANÁLISIS DE LOS SISMOS REGISTRADOS EN EL CATÁLOGO DE LA RED SISMOLÓGICA NACIONAL DE COLOMBIA (RSNC)

Para este análisis se utilizó una distancia de 25 km alrededor del embalse, dado que el reglamento colombiano de construcción sismo resistente de 2010⁵², en el que se toma esa distancia como el límite de las fuentes sismogénicas cercanas.

En dicha zona, se encontraron 1839 sismos desde el 3 de junio de 1993 hasta el 4 de noviembre de 2016 con magnitudes entre 0,6 y 4,2. En la siguiente figura se observa la distribución de estos sismos.

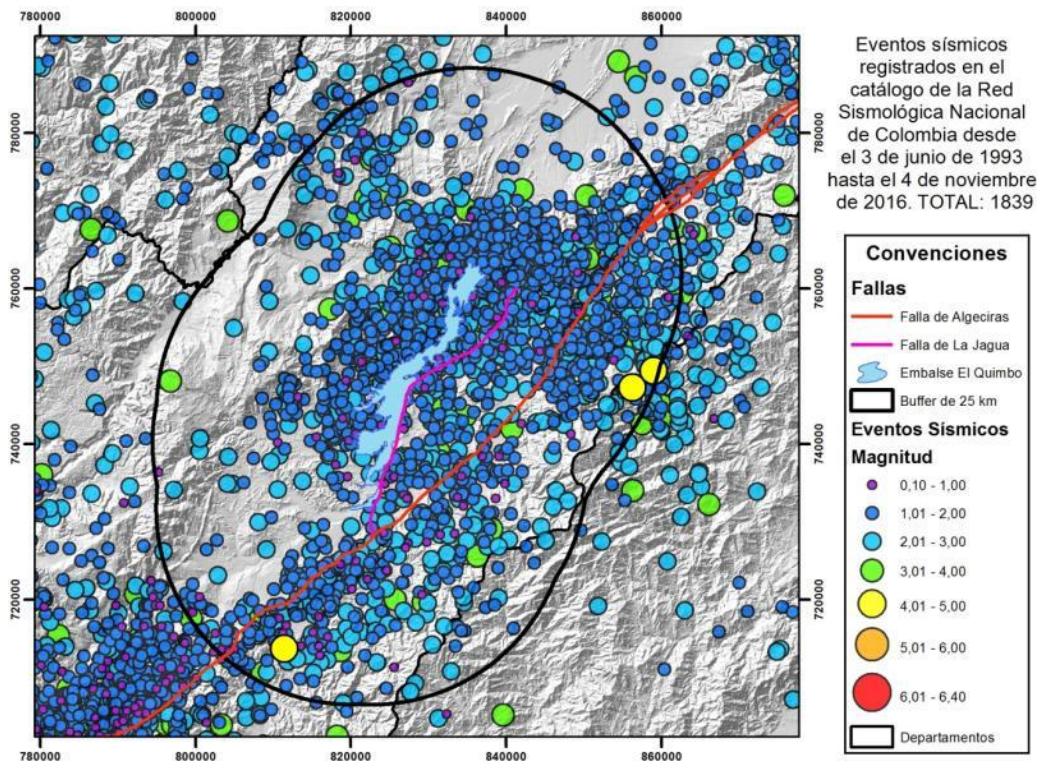


FIGURA 18. DISTRIBUCIÓN DE EVENTOS SÍSMICOS REPORTADOS EN EL CATÁLOGO DE LA RSNC. SE DESTACAN LA ZONA EMBALSADA POR EL QUIMBO Y LA FALLA DE ALGECIRAS (LÍNEA ROJA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se observa en la imagen anterior, la mayoría de los sismos se encuentran en cercanías al embalse (aproximadamente 8 km alrededor), la Falla La Jagua y hacia el oriente, evidenciando una relación con la Falla de Algeciras.

Con los datos obtenidos se generó una gráfica de frecuencias, la cual ayuda a la visualización de la cantidad de eventos sísmico por año. Dicha grafica se presenta a continuación:

⁵² MADS. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Bogotá

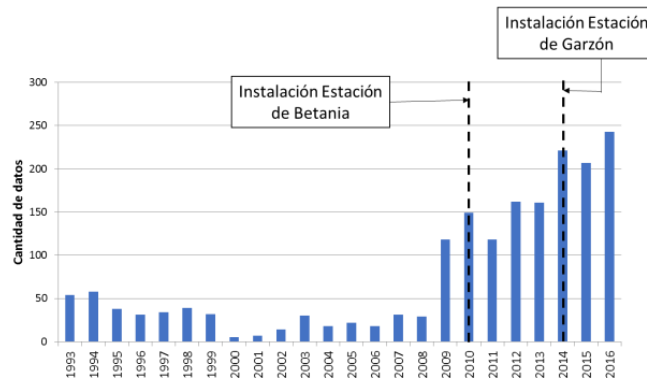


FIGURA 19. CANTIDAD DE EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS POR LA RSNC, SEÑALANDO LA INSTALACIÓN DE ESTACIONES CERCANAS AL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En la figura anterior es evidente el aumento de eventos sísmicos que se presenta a partir del año 2009. Cabe resaltar que en cercanías al área del proyecto el Quimbo el 19 de mayo de 2010 se instaló la estación sismológica de Betania, ubicada aproximadamente a 34 km y el 24 de febrero de 2014 se instaló la estación sismológica de Garzón a 18 km del embalse, por lo que se cree que el aumento presentado a partir de 2010 y 2014 puede estar debido a la efectos de mayor instrumentación en la zona.

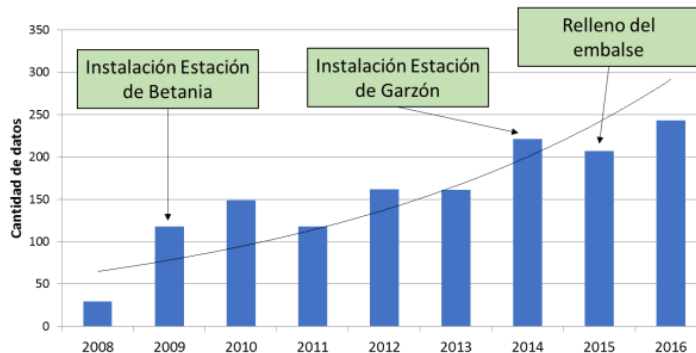


FIGURA 20. DETALLE SOBRE LA FRECUENCIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS A PARTIR DE 2008, MOSTRANDO LOS EVENTOS QUE SE CONSIDERAN PODRÍAN MODIFICAR SU COMPORTAMIENTO NORMAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Sin embargo, esto no logra explicar el repentino aumento dado para el año de 2009, pasando de un promedio de 28 sismos por año a 118 eventos registrados en 2009. Esta tendencia a aumentar persiste hasta la actualidad, incluso, en lo que va corrido del año 2016 se han registrado más eventos sísmicos que en el año 2015 en donde se comenzó el proceso de llenado del embalse.

También se graficó la cantidad de sismos por año diferenciados por magnitud y profundidad.

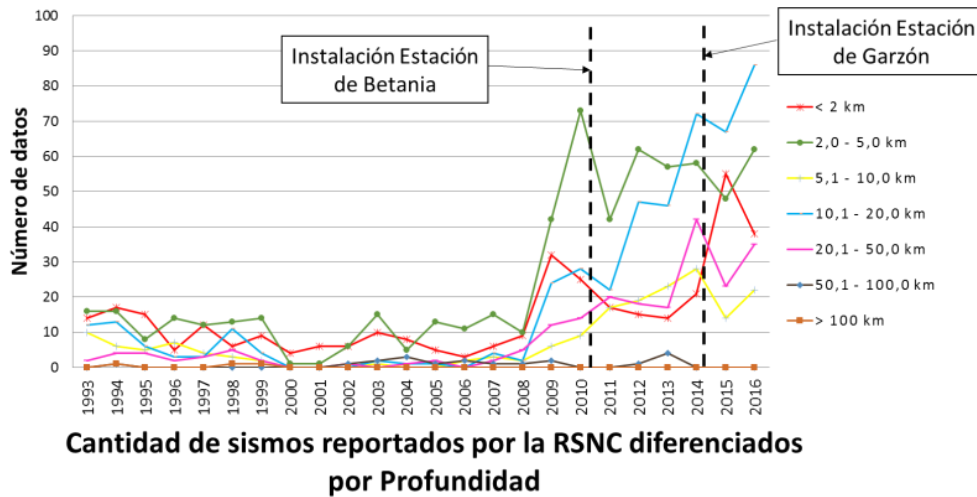


FIGURA 21. CANTIDAD DE EVENTOS SÍSMICOS REPORTADOS POR LA RNSC DIFERENCIADOS POR PROFUNDIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

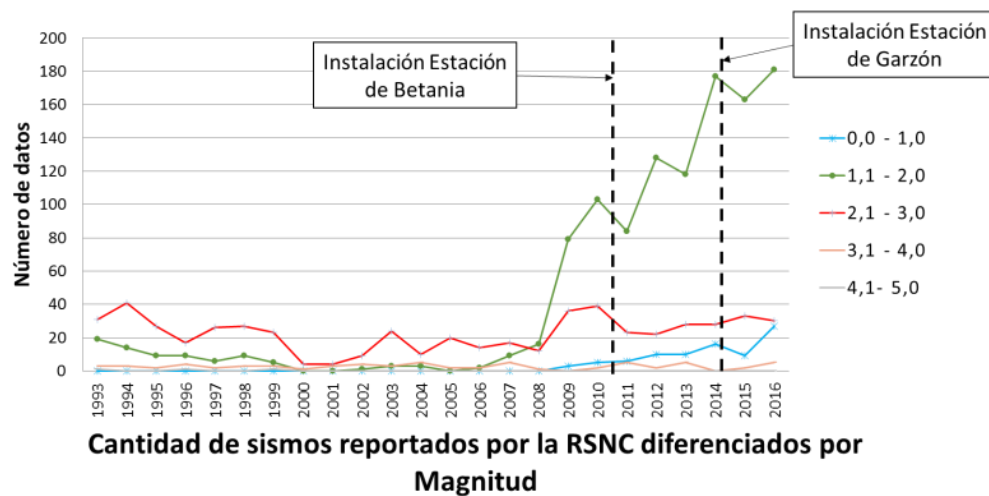


FIGURA 22. CANTIDAD DE EVENTOS SÍSMICOS REPORTADOS POR LA RNSC DIFERENCIADOS POR MAGNITUD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En las gráficas se logró observar que, en cuanto a profundidad, la mayoría de los eventos sísmicos (33,4%) ocurren a una profundidad entre 2 y 5 km, el 24,7% de los eventos tienen una profundidad entre 10,1 y 20 km y el 19,1% corresponden a sismos muy someros con profundidades menores a 2 km. Los sismos menos frecuentes son los que tienen una profundidad mayor a 100 km, representando el 0,1% de los eventos y registrándose sólo 3 entre los años 1994 y 1999. A partir de 2009 todos los rangos de profundidad aumentan su frecuencia, excepto los mayores a 100 km, que en este periodo de tiempo no se han presentado.

Con respecto a las magnitudes, los sismos más frecuentes son los que presentan magnitudes entre 1,1 y 2,0 con un 61,8% del total, seguido de los sismos con magnitudes

2,1 a 3,0 representando el 29,6%. Los sismos que presentan menor frecuencia son los que presentan magnitudes entre 4,1 y 5,0 consistiendo en el 0,1% de los datos.

Debido a aparente aumento de eventos sísmicos que presenta el área estudiada, se recomienda que en la zona del embalse se haga un monitoreo sísmico detallado en el que se pueda estimar una relación con los cambios del nivel del agua, teniendo en cuenta que esto representa cambios en la presión hidráulica, que puede inducir a la generación de sismos más frecuentes.

3.4 INSTRUMENTACIÓN

La ubicación de sismos depende de los registros sísmicos, la densidad de estaciones y un modelo de velocidades de ondas para poder determinar la ubicación del hipocentro (tiempo de viaje, velocidad de propagación y se estima distancia). En el caso de los sismos inducidos requiere de una caracterización detallada que en muchos casos no es posible con la red de estaciones sísmicas nacional (Duncan⁵³ P., 2012), particularmente, por la densidad de estaciones y el modelo de velocidades considerados en el territorio Colombiano la precisión en la ubicación puede estar en el orden de la decena de kilómetros.

Por ejemplo en un análisis sismológico realizado para el Acueducto de Bogotá (EAB) se reubicó sismos detectados por la red sismológica nacional con el fin de disminuir el error, en este caso se ha logrado una precisión en la ubicación de los sismos de 18 km en latitud y de 17 km en longitud para la mayoría de eventos (EAB-GMAS⁵⁴, 2015). Es por esto que el uso de otras estaciones o red local y un mejor modelo de velocidades permiten ubicar con una precisión del orden de las decenas a centenas de metros, lo cual en parte ayuda a verificar o descartar la sismicidad inducida y desencadenada por la presa.

En cuanto a la ubicación de microsismos el mayor avance se ha dado en el sector petrolero y geotérmico, en donde el fracturamiento hidráulico genera sismos de baja magnitud y para los cuales es necesario tener una ubicación detallada de los eventos, en este sentido en el territorio colombiano Rodríguez⁵⁵ (2014) mediante un arreglo de 60 geófonos realizó el seguimiento de microsismos antes, durante y después de una operación de fracturamiento hidráulico en la cuenca Cesar-Ranchería, con el esquema de trabajo desarrollado se logró tener precisión en ubicación en el orden de los metros, así como determinación de mecanismos de la fuente con magnitudes momento en el orden de -2,73 a -0,86 (escala relacionada con el logaritmo del momento sísmico y dimensiones de la fractura). Otra experiencia con una metodología similar es presentado por Birkelo et al. (2012) quienes encontraron un condicionamiento de los microsismos a la red de fracturas.

⁵³ Duncan P. (2012), Induced Seismicity: Monitoring to mitigation, SEG Annual meeting Las Vegas.

⁵⁴ EAB - GMAS (2015), Investigación de carácter aplicado a través de un estudio geofísico para el desarrollo del modelo tridimensional en la cuenca del río Chuza Fase II, Bogotá D.C.

⁵⁵ Rodríguez G. (2014), Análisis de la microsismicidad generada en un yacimiento de hidrocarburos por una operación de fracturamiento hidráulico mediante el uso integral de técnicas de sísmica pasiva, Tesis maestría Universidad Nacional de Colombia.

- Modelo de velocidades

El modelo de velocidades actual para la ubicación de sismos en Colombia es una aproximación muy gruesa de las condiciones superficiales, por tanto, estudiar y ubicar en detalle un sismo en la corteza requiere de otra fuente de información. Una de las referencias en cuanto a los modelos de velocidades del territorio Colombiano es dada por el servicio geológico en sus publicaciones, donde Franco y Ojeda⁵⁶ (2004) indican que los modelos de velocidades usados para la ubicación de sismos con profundidades menores a 45 km son modelos que homogenizan toda la corteza pese a los grandes cambios que en ella se presentan y en general se consideran modelos de capas, en la siguiente grafica se puede ver un ejemplo de los modelos de velocidades.

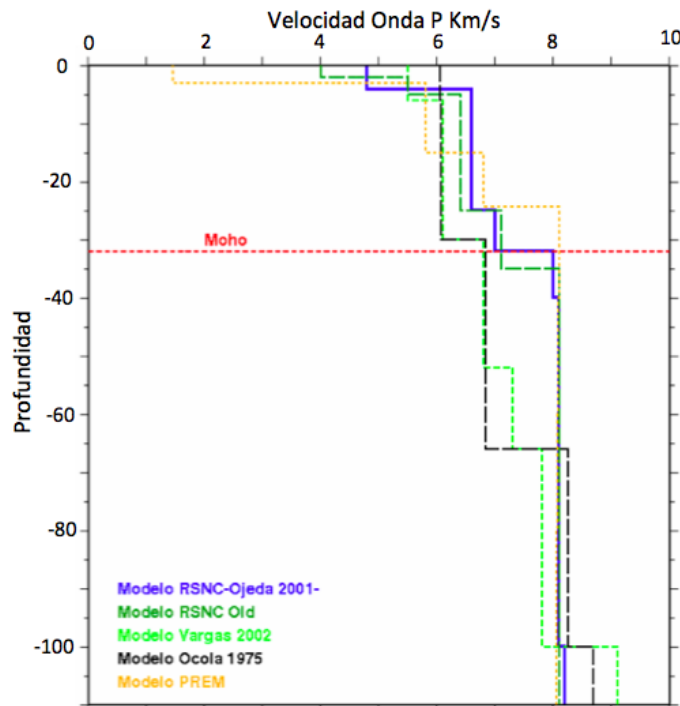


FIGURA 23. MODELOS DE VELOCIDADES DE ONDA P, EN ROJO SE RESALTA EL LÍMITE PROMEDIO DE LA DISCONTINUIDAD DE MOHOROVICH. ADAPTADO DE FRANCO Y OJEDA (2004)

El autor señala que en estos modelos es primordial la ubicación de la discontinuidad de Mohorovich (zona de transición entre la corteza y el manto), modelos más elaborados de carácter 3D o 2D se han generado para Colombia también basados en datos sismológicos los cuales tienen resolución del orden de la decena de kilómetros (ver Vargas, Pujabes & Montes⁵⁷, 2007)

⁵⁶ Franco & Ojeda (2004), Mejoras al modelo de velocidades para la localización de sismos en Colombia. Instituto Colombiano de Geología y Minería, Red sismológica Nacional de Colombia, Publicaciones Servicio Geológico.

⁵⁷ Vargas, Pujabes & Montes (2007), Seismic structure of South-central Andes of Colombia by Tomographic inversión, Geofísica internacional 2007.

Para mejorar estos modelos se deben considerar otras fuentes de información y para el caso de El Quimbo las secciones sísmicas existentes y los registros de pozos levantados por el sector petrolero permiten la construcción de un modelo más detallado que el que se pueda llegar a construir con información sismológica (similar a la metodología usada por Rodríguez G., 2014). En caso contrario, dada la posibilidad de que se mejore la densidad de estaciones o sensores sísmicos, se puede pensar en estimar las propiedades del subsuelo con dicha red. Es de notar que aunque se trabaje con una mejor densidad de estaciones pero no se mejore el modelo de velocidades se genera incertidumbre en la ubicación de los sismos.

- Sensor

El monitoreo de microsismos, que ha sido llevado a cabo en detalle principalmente en la caracterización del fracturamiento hidráulico, es común en este caso y una forma de reducción de costos es la instalación de geófonos, pero el monitoreo se puede llevar a cabo con sismómetros de banda ancha y acelerógrafos con registro continuo de la sismicidad. Cada uno de estos sensores con las correspondientes restricciones.

- Geófonos

Estos sensores generalmente presenta un ancho de banda limitado (10Hz-100Hz), este límite de detección afecta principalmente la magnitud llevando a subestimación de magnitudes en ciertos rangos de magnitudes de sismos, sin embargo, debido al costo e instrumentación con geófonos se piensa en un cubrimiento espacial denso para la caracterización en detalle de las fracturas y la forma en que estas se propagan (Yenier, Laporte & Baturan⁵⁸, 2016).

- Acelerógrafos

Los acelerógrafos o sensores de movimiento fuerte pueden registrar movimientos hasta aceleraciones cercanas a 2g sin romperse o salirse de escala, de tal forma que la diferencia de los sensores radica en que se escoge un periodo natural mucho mayor que la frecuencia esperada de ocurrencia de los sismos (Stein & Wysession⁵⁹, 2003). Podría pensarse en usar este sensor como sustituto de las estaciones sismológicas de gran ancho de banda, pero éstas recogen información en un amplio ordenes de frecuencias y lo mas importantes es que el rango dinámico de la señal de aceleración en la banda de altas frecuencias es mucho mayor en comparación con el rango que tiene la señal registrada por el sismómetro (Havskov & Ottemöller⁶⁰, 2010). Adicionalmente los sensores son programados para que se activen luego de sobrepasado una aceleración mínima.

- Sensor de Banda Ancha

Estos sensores registran en un amplio rango generalmente entre, 0,01 Hz a 50 Hz, inicialmente los sensores eran diseñados para tener un periodo definido de tal forma que los instrumentos permitían el registro de periodo corto o largo, sin embargo, actualmente

⁵⁸ Yenier, Laporte & Baturan (2016), Induced Seismicity Monitoring: Broadband Seismometers and Geophone Comparison, SEG anual meeting.

⁵⁹ Stein & Wysession (2003), An introduction to seismology, Earthquakes and Earth structure. Blackwell.

⁶⁰ Havskov & Ottemöller (2010), Routine data processing in Earthquake seismology, Springer.

es común el uso de estaciones de gran ancho de banda cuya base tecnológica es muy similar al de acelerógrafo con la diferencia de que se registra la integral de la aceleración (velocidades) y el rango dinámico de los sensores (Havskov & Ottemöller, 2010).

3.5 INCERTIDUMBRE EN LA UBICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LA FUENTE

La ubicación de sismos es un problema de optimización o estimación de parámetros, en donde se busca determinar la posición del foco (coordenadas x, y, z) teniendo como base un modelo de velocidades, considerando la física del problema y los registros sísmicos (Stein & Wysession, 2003). En este sentido la ubicación y precisión depende fundamental del número de sensores, arreglo usado y del modelo de velocidades considerando. Por tanto, las metodologías consideradas deben estar enfocadas al uso de esquemas de trabajo desarrollados en el seguimiento del fracturamiento hidráulico. Un trabajo detallado y enfocado en este trabajo ha sido el trabajo de Maxwell⁶¹ (2014) base de la sección presentada.

Es de notar que la principal diferencia en los sensores es la capacidad de registro en diferentes bandas de frecuencia, esto se ve ligado directamente con el rango de frecuencias que puede generar un evento sísmico. En la siguiente figura se puede ver el espectro teórico de amplitudes de las velocidades que genera un evento sísmico de magnitud -1 y uno de magnitud 1. Dicha figura permite concluir que los eventos de gran magnitud requieren de un registro en las bajas frecuencias solo detectable con sensores de banda ancha.

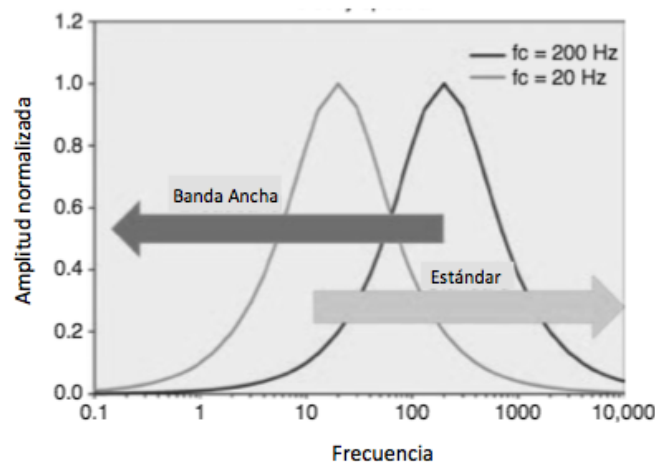


FIGURA 24. ESPECTRO TEÓRICO DE AMPLITUDES DE LAS VELOCIDADES PARA UN EVENTO DE MAGNITUD MOMENTO DE -1 (FRECUENCIA DOMINANTE DE 200 Hz) Y UNA MAGNITUD MOMENTO DE 1 (FRECUENCIA DOMINANTE DE 20 Hz). SE MUESTRA EL RANGO DE CADA UNO DE LOS SENSORES. ADAPTADO DE MAXWELL (2014)

Adicionalmente, es un hecho bien conocido que las altas frecuencias que se producen al generarse un sismo son atenuadas rápidamente por el medio, es decir, que las altas frecuencias van a ser afectadas en función de la distancia. Esto genera rangos en los

⁶¹ Maxwell (2014), Microseismic imaging of hydraulic fracturing: improved engineering of unconventional shale reservoirs. SEG.

cuales la estimación de parámetros de la fuente son subestimados con respecto a los que se obtendría con un sensor de banda ancha, este comportamiento se nota en la siguiente figura en donde se compara la magnitud momento estimada para diferentes tipos de sensores: geófonos, acelerógrafos y estaciones sismológicas de banda ancha. En la grafica se puede ver magnitudes a partir de las cuales con los sensores se estima una magnitud muy por debajo de la estimada con los sensores de banda ancha (problema asociado a atenuación de ondas y ancho de banda del sensor).

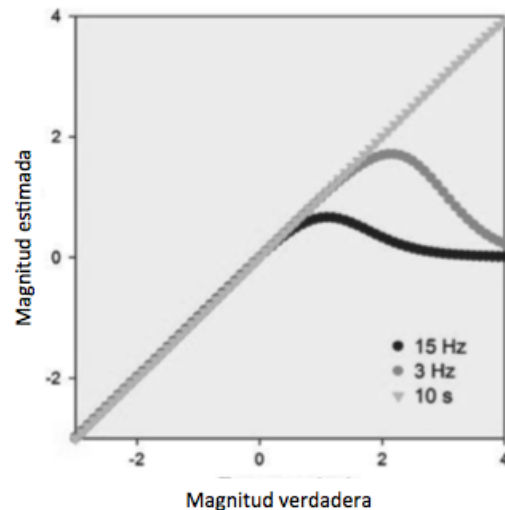


FIGURA 25. SUBESTIMACIÓN DE MAGNITUD DEL SISMO PARA UN GEÓFONO DE 15Hz, UN ACELERÓMETRO DE 3Hz Y UN SISMÓMETRO DE 10 s DE PERIODO. ADAPTADO DE MAXWELL (2014)

Pese a esto es de resaltar que a medida que el número de sensores y la densidad espacial de los mismos se mejora la precisión en la ubicación y el grado de sensibilidad a los microsismos mejora. Esto se puede evidenciar en la siguiente figura para diferentes arreglos (Azimutal, radial y con sensores en profundidad) de sensores de tres componentes ubicados en pozos en donde se resalta que para menos de 10 sensores se tiene la mayor incertidumbre en la ubicación y a medida que se aumenta el número de ellos la incertidumbre disminuye hasta un límite definido, luego de este límite la precisión depende del tipo de arreglo.

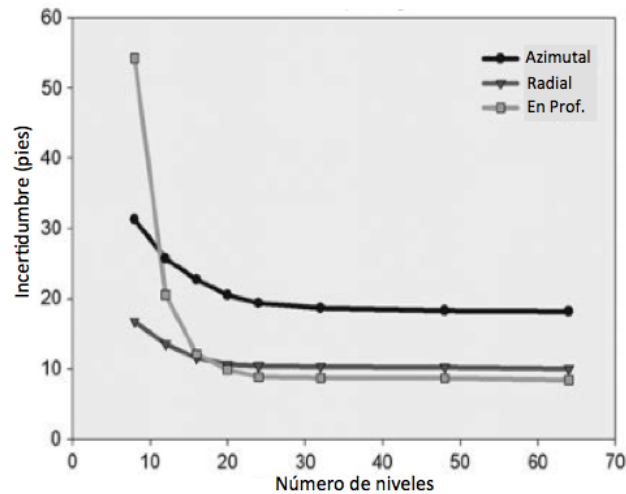


FIGURA 26. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA LOCALIZACIÓN, PARA UN ARREGLO VERTICAL EN POZO CON DIFERENTE NÚMERO DE SENSORES DE TRES COMPONENTES, EL ESPACIAMIENTO DE LOS ELECTRODOS ES DE 50 PIES. ADAPTADO DE MAXWELL (2014)

Esta densidad de sensores es difícil de lograr con la red sismológica nacional y es por esto que se debe considerar la implementación de redes locales con densidad y ubicación espacial de acuerdo con las características locales, siendo relevante para su estimación el modelo de velocidades de la zona.

4 IMPLICACIONES EN AMENAZA Y RIESGO DE LAS OMISIONES EN LA CARACTERIZACIÓN DE FALLAS GEOLÓGICAS

4.1 SISMICIDAD NATURAL

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 (ICold⁶², 1998; Allen & Cluff⁶³, 2000; Mahdavian⁶⁴, 2008) y para la misma decisión sobre si construir o no este tipo de estructuras.

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:

⁶² ICold-International Committee on Large dams (1998). Neotectonics and dams. Bulletin 112.

⁶³ Allen, C.R. and Cluff, L.S. (2000) Active Faults in Dam Foundations: An Update, Proc.12th World Conference on Earthquake Engineering, January 29-February 5, Auckland, New Zealand, Vol. II, paper no. 2490, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

⁶⁴ Mahdavian, A. (2008). Rudbar Lorestan Dam Design and local Faults. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing, China

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 (tal cual se vio de los reportes de sismicidad histórica para sismos asociados a la Falla de Algeciras, así como también del estudio realizado por EMGESA – INGETEC, 2008 para las fallas de Balseadero y Rioseco).

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.

Ninguno de estos niveles ha sido realizado de manera responsable por EMGESA en el caso de la presa de El Quimbo, tal como ha sido demostrado a lo largo de este documento.

En estudios más recientes (Wieland et al.⁶⁵, 2008), se discute la dificultad en establecer divisiones entre fallas geológicas activas e inactivas. No obstante lo anterior, establecen los autores que fallas donde no existan pruebas de que sean inactivas, deben ser consideradas como activas o potencialmente inactivas, especialmente en regiones de alta sismicidad. Aquí se puede ver como el estado del arte en estudios tectónicos y de sismogeneración para presas sigue el Principio de Precaución, pero que no fue el caso de los estudios ni de las decisiones que fueron inducidas en la ANLA por EMGESA.

⁶⁵ Wieland, M., Brenner, R. y Bozovic, A. (2008). Potentially active faults in the foundations of large dams part II: Design aspects of dams to resist fault movements. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China

De igual manera, ratifican los criterios de ICold⁶⁶ (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.

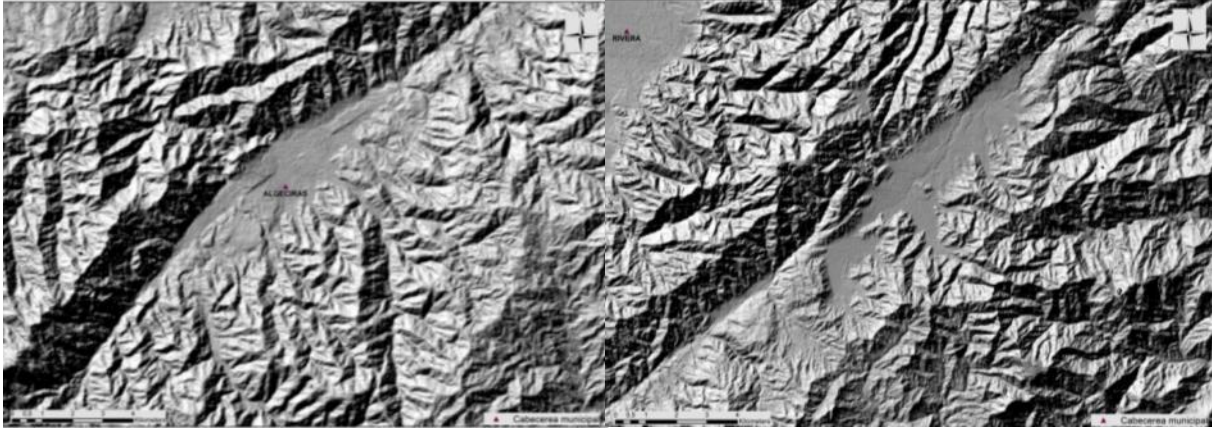


FIGURA 27. ZONAS DE DEFORMACIÓN CUATERNARIA A LO LARGO DE LA FALLA DE ALGECIRAS. PARA DATAR LAS FALLAS EXISTEN METODOLOGÍAS COMO RADIO ISÓTOPOS, CARBONO RADIOACTIVO COSMOGÉNICO O TERMOLUMINISCENCIA. ELABORACIÓN PROPIA

Como ya se ha planteado de manera reiterada, muchas de las fallas de la zona presentan evidencias de deformaciones del Holoceno y es allí donde EMGESA debe estudiar de manera detallada las fallas, así como demostrar con soportes técnico-científicos que fallas como la de Rioseco cuyo trazo, de acuerdo con los mapas de Geología General presentados como anexos al EIA (Plano PL-EIAQ-15) está a pocas decenas de metros del sitio de presa y que inexplicablemente no es estudiada ni considerada en el mapa de Geología del área de la presa y obras, no es activa o que su actividad no afectará las obras del embalse. Igual situación debe darse con las fallas de Balseadero – Matambo y con las fallas geológicas menores que fueron detectadas y medidas en la vía de acceso al vertedero y en los taludes de la casa de máquinas.

De igual manera, tanto los datos de dirección hipotética de esfuerzos tectónicos obtenidos a partir de datos sismológicos (soluciones teóricas de mecanismos focales) como de las mediciones de algunos planos de fallas mesoscópicas llevan a plantear que el sistema de esfuerzos es transcurrente y no de compresión como se plantea en el estudio de EMGESA – INGETEC⁶⁷ (2008). Estos aspectos tienen implicaciones hidrogeológicas y de sismicidad que deberían estar ya entendidos por la empresa energética, pero que evidentemente no le están, si se analizan los componentes geoambientales de los estudios presentados.

⁶⁶ ICold-International Committee on Large dams (1998). Neotectonics and dams. Bulletin 112.

⁶⁷ EMGESA - INGETEC. 2008. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo.

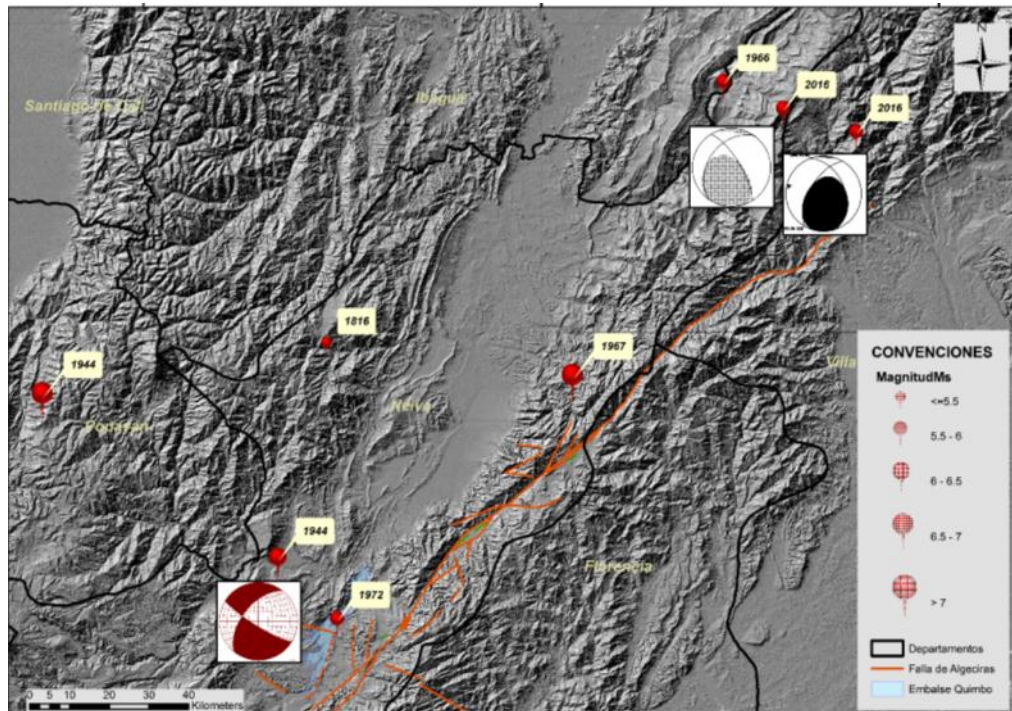


FIGURA 28. SOLUCIONES TEÓRICAS DE ESFUERZOS TECTÓNICOS. LOS DOS DIAGRAMAS AL NORESTE, CON BASE EN LOS DATOS SISMOLÓGICOS DE LOS SISMOS DEL 31 DE OCTUBRE DE 2016 (RSNC). EL DIAGRAMA AL SUR, CON BASE EN EL ANÁLISIS DE LOS DATOS DE MEDICIÓN DE FALLAS MESOSCÓPICAS TOMADOS POR EL GEOL. JULIO FIERRO MORALES EN LA ZONA DE PRESA DE EL QUIMBO. LOS DATOS PRELIMINARES INDICAN QUE EXISTE TRANSPRESIÓN HACIA EL NORTE DE LA FALLA Y TRANSCURRENCIA HACIA EL SECTOR DEL QUIMBO, NO UN SISTEMA DE COMPRESIÓN, COMO POSTULAN EMGESA-INGETEC (2008) SIN NINGÚN SOPORTE TÉCNICO. ELABORACIÓN PROPIA.

Como el aspecto quizá más relevante de las omisiones y negligencias de parte de Emgesa que se han detectado y explicado de manera detallada a lo largo de este documento, los eventos sísmicos en la zona muestran antecedentes de encadenamiento de procesos que pueden ser desastrosos para las comunidades ubicados en la zona de influencia directa del embalse y aguas abajo.

Lo anterior no es extraño en el contexto mundial. A continuación se muestra una tabla de los más conocidos antecedentes de desastres relacionados con colapso de presas relacionados con eventos sísmicos. Adicional a este efecto, por consecuencia de sismos cercanos superficiales o procesos morfodinámicos al sitio del embalse es posible que se generen Tsunamis, como el ocurrido en el embalse Vajont, Venecia, Italia, el 9 de octubre de 1963, como consecuencia de deslizamientos masivos.

TABLA 3. COLAPSO DE PRESAS POR SISMO

Nombre	Año	Lugar	Muertes	Causa
--------	-----	-------	---------	-------

Represa Malpasset. Francia	1959	Cote d' Azur. Francia	423	Posterior al desastre, se encontró una zona de falla geológica la cual se debilitó durante la construcción de la represa por el uso de explosivos en la base de la Represa, convirtiéndose en una zona de filtración y llevando a la falla de la estructura del dique. La falla generó una "pared de agua" con una altura de 40m y se desplazó a 70 km/h, destruyendo dos pequeños pueblos: Malpasset y Bozon, Francia, aguas abajo del punto de represa.
Represa Shihgang	1999	Taiwan	0	La represa fue fuertemente afectada por el sismo "921" de 1999, generando el colapso en su costado norte, reduciendo su capacidad de almacenamiento.
Represa Fujinima	2011	Japón	8	Se generó la falla de la estructura entre 20 a 25 minutos después del sismo registrado el 11 de marzo de 2011, "Tohoku earthquake", de ML=9,0, causado por la falla del material de cimentación de origen residual y falla por corte sobre el dique auxiliar.

4.2 SISMICIDAD INDUCIDA

La empresa EMGESA nunca se ha referido al tema en sus documentos públicos, lo cual es inaceptable para un proyecto de la magnitud de El Quimbo. El oficio del MAVDT de junio de 2011 en respuesta al senador Alexander López demuestra que desde el legislativo se había planteado por primera vez esta temática en lo referente a El Quimbo. Posteriormente, la CGR en el documento de 2014 aborda de manera más sistemática la problemática, a lo cual respondió la ANLA revisando de manera somera en la Resolución 759 de 2015 y quizá tratando con ligereza este riesgo, pues se anota que la sismicidad inducida es un *"fenómeno observado en algunos embalses del mundo"* y que los sismos son *"normalmente de magnitudes moderadas o pequeñas"*.

No obstante las expresiones de la ANLA, ni son pocos los sitios donde estos procesos se han documentado en relación con represas ni son necesariamente de baja magnitud. En este último aspecto pueden verse sismos con magnitudes peligrosas, que además se generan en la parte más alta de la corteza, aumentando la peligrosidad.

En cuanto a que sean "algunos" embalses, los estudios de Harsh K. Gupta⁶⁸ (2001) muestra 14 sismos inducidos/desencadenados con magnitudes mayores o iguales a 5,0 y un total de 95 casos investigados y 15 casos probables en todos los continentes del planeta.

⁶⁸ Gupta, H. (2001). A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India

Table 1
Reported cases of reservoir-associated changes in seismicity

Name of the dam/reservoir	Country	Height of dam (m)	Reservoir volume (10 ⁶ m ³)	Year of impounding	Year of largest earthquake	Magnitude/intensity	References ^a
<i>Sites where earthquakes having magnitude ≥ 6.0 were triggered</i>							
Hsinfengkiang	China (PRC)	105	13,896	1959	1962	6.1	1, 2, 3
Kariba	Zambia – Zimbabwe	128	175,000	1958	1963	6.2	1, 2, 6
Koyna	India	103	2780	1962	1967	6.3	1, 2, 4, 5
Kremasta	Greece	160	4750	1965	1966	6.2	1, 2, 4, 5
<i>Sites where earthquakes having magnitude between 5.0 and 5.9 were triggered</i>							
Aswan	Egypt	111	164,000	1964	1981	5.6	2, 7
Benmore	New Zealand	110	2040	1964	1966	5.0	1, 2, 8
Charvak	Uzbekistan	148	2000	1971	1977	5.3	55
Eucumbene	Australia	116	4761	1957	1959	5.0	2
Geheyan	China	151	3400	1993	1997	VI	48a
Hoover	USA	221	36,703	1935	1939	5.0	1, 2, 10
Marathon	Greece	67	41	1929	1938	5.7	1, 2, 4, 5
Oroville	USA	236	4400	1967	1975	5.7	2, 11
Srinagarind	Thailand	140	11,750	1977	1983	5.9	65
Warna	India	80	1260	1987	1993	5.0	51
<i>Sites where earthquakes having magnitude between 4.0 and 4.9 were triggered</i>							
Aksombo Main	Ghana	134	148,000	1964	1964	V	2, 9
Bajina Basta	Yugoslavia	90	340	1966	1967	4.5–5.0	2, 5
Bhatsa	India	88	947	1981	1983	4.9	39
Bratsk	Russia	100	169	1966	1996	4.2	48b
Camarillas	Spain	49	37	1960	1964	4.1	2, 4, 5
Canelles	Spain	150	678	1960	1962	4.7	2, 4, 5
Capivari–Cachoeira	Brazil	58	180	1970	1971	VI	31
Clark Hill	USA	60	3517	1952	1974	4.3	2, 12
Dahua	China (PRC)	74.5	420	1982	1993	4.5	56
Danjiangkou	China (PRC)	97	16,000	1967	1973	4.7	29
Foziling	China (PRC)	74	470	1954	1973	4.5	29
Grandval	France	88	292	1959	1963	V	1, 2, 4, 5
Hoa Binh	Vietnam	125		1988	1989	4.9	48c
Kastraki	Greece	96	1000	1968	1969	4.6	2
Kerr	USA	60	1505	1958	1971	4.9	1, 2, 9
Komani	Albania	130	1600	1985	1986	4.2	57
Kurobe	Japan	186	149	1960	1961	4.9	2, 13
Lake Baikal	Russia					4–4.8	49a
Lake Pukaki	New Zealand	106	9000	1976	1978	4.6	41
Manicouagan 3	Canada	108	10,423	1975	1975	4.1	2
Marimbondo	Brazil	94	6150	1975	1975	IV	32
Monteynard	France	155	275	1962	1963	4.9	1, 2, 4, 5
Nurek	Tadjikistan	317	1000	1972	1972	4.6	1, 2, 14
P. Colombia/V. Grande	Brazil	40/56	1500/2300	1973–1974	1974	4.2	33
Piastra	Italy	93	13	1965	1966	4.4	2, 4, 5
Pieve de Cadore	Italy	116	69	1949	1950	V	2, 15
Shenwo	China (PRC)	50	540	1972	1974	4.8	29
Vouglans	France	130	605	1968	1971	4.4	2, 4, 5
<i>Sites where earthquakes having magnitude < 4.0 were triggered</i>							
Acu	Brazil	31	2400	1983	1994	2.8	59
Blowering	Australia	112	1628	1968	1973	3.5	2

Table 1 (continued)

Name of the dam/reservoir	Country	Height of dam (m)	Reservoir volume (10 ⁶ m ³)	Year of impounding	Year of largest earthquake	Magnitude/intensity	References ^a
<i>Sites where earthquakes having magnitude < 4.0 were triggered</i>							
Capivara	Brazil	59	10,500	1976	1976	3.7	31
Carmo do Cajuru	Brazil	22	192	1954	1972	3.7	32
Contra	Switzerland	220	86	1963	1965	3.0	2, 4, 5
Dhamni	India	59	285	1983	1994	3.8	50
Donjiang	China (PRC)	157	81	1986	1990	3.2	48d
Emboracacao	Brazil	158	17,600	1981	1984	~ 2.0	36
Emmoson	Switzerland	180	225	1973	1973	3.0	2, 42
Fierza	Albania	167	2800	1978	1981	2.6	60
Gandipet	India	36	117	1920	1982	3.5	16
Grancarevo	Yugoslavia	123	1280	1967	1967	3.0	2, 4, 5
Hendrik Verwoerd	South Africa	66	5000	1970	1971	2.0	1, 2, 17
Huangshi	China (PRC)	40	610	1970	1974	2.3	29
Hunanzen	China (PRC)	129	2060	1979	1979	2.8	61
Idukki	India	169	1996	1975	1977	3.5	2, 18
Itezhtezhi	Zambia	65	5000	1976	1978	3.8	2
Jocasse	USA	107	1431	1971	1975	3.2	2, 19
Kamafusa	Japan	47	45	1970	1970	3.0	1, 2, 20
Katse	Lesotho	185	1950	1995	1996	3.1	52
Keban	Turkey	212	31,000	1973	1973	3.5	2, 9
Kouris	Cyprus				1994–1995	3.0	49b
Kunpsai	USSR	~ 100	500	1981	1983	Microearthquakes	30
Lake Gordon–Lake Peddar	Australia	140	13,500	1974	1978	Microearthquakes	44
LG 3	Canada	80		1981	1983	3.7	40
Lubuge	China (PRC)	103	110	1988	1988	3.4	62
Makio	Japan	105	75	1961	1978	Earthquake swarm	38 ^b
Monticello	USA	129	500	1977	1979	2.8	12, 19, 21
Mula	India	56	1017	1972	1972	1.0	1, 2, 18
Nagawado	Japan	155	123	1969	1969	Earthquake swarm	38 ^c
Nanchong	China (PRC)	45	15	1969	1974	2.8	29
Nanshui	China (PRC)	81	1220	1969	1970	2.3	63
Novo Ponte	Brazil		128		1995	3.7	49c
Oued Fodda	Algeria	101	225	1932	1933	3.0	2, 4
Paraibuna–Paraitinga	Brazil	94/105	4700	1975–1976	1977	3.0	34
Qianjin	China (PRC)	50	20	1970	1971	3.0	29
Ridracoli	Italy	103	33	1981	1988	3.5	53
Salanfe	Switzerland				1995	2.5	49d
Schlegeis	Austria	117	128	1970	1971	2.0	2
Shasta	USA	183	561.5	1944	1944	3.0	2, 9
Shengjiaxia	China (PRC)	35	4	1980	1984	3.6	58
Shuikou	China (PRC)	101	2350	1993	1994	3.2	58
Sobradinho	Brazil	43	34,100	1977	1979	~ 2.0	35
Sriramsagar	India	43	32,000	1983	1984	3.2	37
Talbingo	Australia	162	935	1971	1973	3.5	2, 14, 22
Thomson	Australia			1983	1990	3.0	54
Toktogul	Kirghizia	215	19,500	1977		2.5	2, 23
Tongjiezi	China (PRC)	74	30	1992	1992	2.9	64
Tucunui	Brazil	100	45,800	1984	1985	3.4	36
Vajont	Italy	262	150	1960	1960		1, 2, 4, 15
Zhedn	China (PRC)	62	7170	1972	1972	3.2	29

(continued on next page)

Table 1 (continued)

Name of the dam/reservoir	Country	Height of dam (m)	Reservoir volume (10 ⁶ m ³)	Year of impounding	Year of largest earthquake	Magnitude/intensity	References ^a
<i>Sites where earthquakes having magnitude < 4.0 were triggered</i>							
Wujiangdu	China (PRC)	165	2140	1979	1985	2.8	58
Yantan	China (PRC)	110	2430	1992	1994	3.5	56
<i>Decrease in microearthquake activity</i>							
Anderson	USA	72	110	1950			24
Bhakranangal	India	226	9868	1958			2, 25
Flaming Gorge	USA	153	4674	1962			2, 26
Glen Canyon	USA	216	33,305	1963			2, 26
Ikawa	Japan	104	151	1957			38
Mangla	Pakistan	116	7250	1967			2, 27
Tarbela	Pakistan	143	13,960	1974			2, 28, 66
Tsengwen Reservoir	Taiwan	128	708	1973			45
<i>Other possible cases</i>							
Cabin Creek	USA	49					2
Clark Canyon	USA	40					9
Coyote Valley	USA	50					2
Disposal Wells, northeastern Ohio	USA				1986	5.0	43
El Grado	Spain	130					2, 9
Ghirni	India	16					2, 9
Kinnersani	India	61					2, 9
Palisades	USA	82					2, 9
Parambikkulam	India	73					2, 9
Rockey Reach	USA						9
San Luis	USA	116					9
Sefid Rud	Iran	106					2
Sleepy Hollow Oil field	Canada						46, 47
Ukai	India	69					2, 9
Warragamba	Australia	137					2, 9

^a References: 1=Gupta and Rastogi (1976); 2=Packer et al. (1979); 3=Shen et al. (1974); 4=Rothe, (1970, 1973); 5=Bozovic (1974); 6=Gough and Gough (1970b); 7=Topozada (1982); 8=Adams (1974); 9=Simpson (1976); 10=Carder (1945); 11=Bufe et al. (1976); 12=Talwani (1976); 13=Hagiwara and Ohtake (1972); 14=Soboleva and Mamadaliyev (1976); 15=Caloi (1970); 16=Gupta et al. (1982); 17=Green (1973); 18=Guha (1982); 19=Talwani et al. (1980); 20=Suzuki (1975); 21=Zoback and Hickman (1982); 22=Muirhead et al. (1973); 23=Simpson et al. (1981); 24=Bufe (1975); 25=Chaudhury and Srivastava (1978); 26=Mickey (1973); 27=Gupta (1984); 28=Jacob et al. (1979); 29=Oike and Ishikawa (1983); 30=Simpson and Leith (1988); 31=Berrocal (personal communication, 1990); 32=Veloso et al. (1987); 33=Berrocal et al. (1984); 34=Ribotta (1989); 35=Berrocal et al. (submitted for publication); 36=Veloso and Assumpcao (1986); 37=Rastogi et al. (1986b); 38=Ohtake (1986); 39=Rastogi et al. (1986a); 40=Anglin and Buchbinder (1985); 41=Reyners (1988); 42=Bock and Rosa-Mayer (1980/1981); 43=Nicholson et al. (1988); 44=Shirley (1980); 45=Wu et al. (1979); 46=Rothe and Lui (1983); 47=Evans and Steeples (1987); 48a=Chen et al. (1996), 48b=Pavlenov and Sherman (1996), 48c=Tung (1996), 48d=Yang et al. (1996); 49a=Djadjkov (1997), 49b=Constantinou et al. (1997), 49c=Sellami et al. (1997), 49d=Veloso et al. (1997); 50=Rastogi et al. (1997a); 51=Rastogi et al. (1997b); 52=Bell and Haskins (1997); 53=Piccinelli et al. (1995); 54=IASPEI General Assembly (1994); 55=Plotnikova et al. (1992); 56=Guang (1995); 57=Muco (1991b); 58=Hu et al. (1996); 59=Joaquim et al. (1995); 60=Muco (1991a); 61=Hu et al. (1986); 62=Jiang and Wei (1995); 63=Xiao and Pan (1984); 64=Guo (1994); 65=Chung and Liu (1992); 66=Kalpna and Chander (1997).

^b Ohtake has reported a swarm, including a magnitude 5.3 earthquake in October 1978. In absence of a detailed report, this case is placed in the category of RIS < 4.0.

^c Ohtake has reported a swarm, including a magnitude 5 in August 1969. In absence of a detailed report, this case is placed in the category of RIS < 4.0.

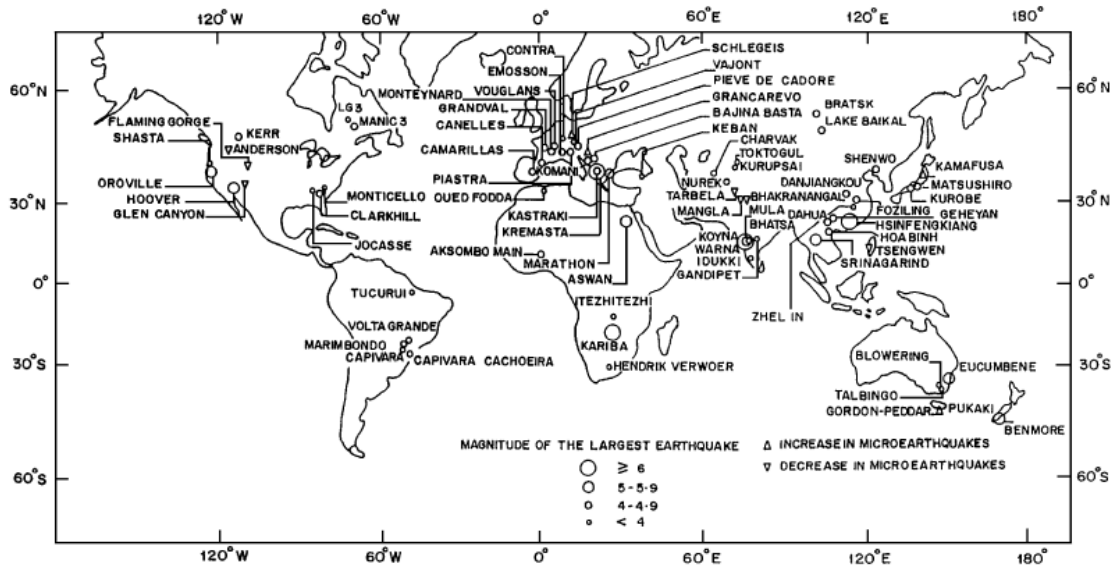


FIGURA 29. UBICACIÓN DE SISMOS DESENCADENADOS/INDUCIDOS POR REPRESAS. TOMADO DE GUPTA (1992, EN GUPTA, 2001)

Evidentemente no se puede reducir a un problema eventual y de implicaciones menores la sismicidad inducida, puesto que se ha constituido en un problema de generación de riesgo global, tal como se observa en el mapa de la figura anterior. No hay que olvidar que la recopilación de Gupta (2001), por su fecha de realización no incluye casos más recientes como los de Govind Ballav Pant en India (Gahalaut, Gahalaut & Pandey⁶⁹, 2007); Castanhão y Açú en Brasil (Ferreira et al.⁷⁰, 2008 y Telesca et al.⁷¹, (2015); Sichuan en China (Kerr & Stone, 2009), entre otros.

⁶⁹ Gahalaut, K., Gahalaut, V. & Pandey, M. (2007). A new case of reservoir triggered seismicity: Govind Ballav Pant reservoir (Rihand dam), central India. *Tectonophysics* Vol. 439.

⁷⁰ Ferreira, J. França, G., Vilar, C., Nascimento, A., Bezerra, F. & Assumpção, M. (2008). Induced seismicity in the Castanhão reservoir, NE Brazil—Preliminary results. *Tectonophysics* Vol. 456.

⁷¹ Telesca, L., Nascimento, A., Bezerra, F., Ferreira, J. (2015). Analysis of the cross-correlation between water level and seismicity at Açú reservoir (Brazil). *Tectonophysics* Vol. 658.

5 CONCLUSIONES

Los estudios sismotectónicos son la base fundamental para el entendimiento de la sismicidad naturales y también de la inducida/desencadenada. Ya existen centenas de casos de antecedentes en el mundo de relación entre embalses de agua y aumento de la sismicidad. No obstante lo anterior, los estudios básicos de geología y sismicidad entregados por Emgesa a las autoridades son deficientes e incompletos, lo cual ha sido determinado por la Contraloría General de la República.

Dentro de los estudios remitidos por Emgesa existen inconsistencias, incoherencias y contradicciones en un aspecto vital en una represa de las dimensiones de El Quimbo: la sismogeneración, pues las fallas se valoran en cuanto a su actividad sísmica con base en opiniones sin ninguna base técnico-científica, la edad de las rupturas no ha sido estudiada en absoluto y las fallas no han sido caracterizadas de manera adecuada ni suficiente.

Los estudios remitidos por Emgesa se basan en información deficiente levantada en 1997 por la consultora Ingetec, sin considerar los avances que hubo en el conocimiento tectónico de las áreas de influencia entre esa fecha y la entrega del Estudio de Impacto Ambiental (2008) o la de Amenaza sísmica (2009).

Emgesa no toma en cuenta las recomendaciones generadas en 1998 por el Comité Internacional de Grandes Represas (ICold, por sus siglas en inglés) en cuanto al mínimo de estudios requeridos para caracterizar las fallas geológicas en función de la generación de sismos. Estos incluyen la determinación del sistema regional de fallas y rupturas, la determinación de la actividad tectónica (incluyendo datación de materiales cuaternarios), determinación de actividad tectónica reciente (incluyendo datación de rupturas) y la determinación de la actividad contemporánea de las fallas.

Emgesa ha incumplido la Resolución 759 de 2015 en lo referente a monitoreo de amenaza sísmica inducida/desencadenada. El llenado se llevó a cabo sin instrumentación previa y no se han reportado los datos dentro de los Informes de Cumplimiento Ambiental. Con ello, no es posible tener la sismicidad natural de fondo, necesaria para establecer de manera más precisa la eventual influencia del embalse en la sismicidad.

Los informes de la Contraloría General de la República han sido sustentados y oportunos, pero no se observa por parte de otras entidades del orden nacional el mismo grado de compromiso en cuanto a la prevención y gestión de los riesgos que el megaproyecto de El Quimbo puede llegar a generar sobre la población aguas abajo de la presa.

Tanto los informes de la ANLA como los del MAVDT tienen serias deficiencias técnicas probablemente debido a que la empresa Emgesa ha inducido a errores con sus informes y documentos técnicos incompletos y deficientes. No es posible comprender la sismicidad natural ni la inducida si no se tienen los estudios básicos pertinentes, que se centran fundamentalmente en la tectónica, y particularmente en la actividad de las fallas geológicas.

6 RECOMENDACIONES

Es necesario que Emgesa, de manera óptima a través de un panel de expertos nacional e internacional, cumpla con las recomendaciones generadas en 1998 por el Comité Internacional de Grandes Represas (ICold, por sus siglas en inglés) en cuanto al mínimo de estudios requeridos para caracterizar las fallas geológicas en función de la generación de sismos. También se deben incluir las recomendaciones en cuanto al estudio de fallas geológicas, sismicidad natural y sismicidad inducida generadas por la Contraloría General de la República y por la Gobernación del Huila. Estos incluyen la determinación del sistema regional de fallas y rupturas, la determinación de la actividad tectónica (incluyendo datación de materiales cuaternarios), determinación de actividad tectónica reciente (incluyendo datación de rupturas) y la determinación de la actividad contemporánea de las fallas. Si para ello es necesario un desembalse controlado para poder tener certeza científica y con ello aplicar el principio de precaución, deberá llevarse a cabo la evaluación de este tipo de medidas.

Emgesa debe cumplir con la instalación de la instrumentación adecuada para evaluar la sismicidad inducida. Tanto en los términos planteados por la ANLA como en los generados por la CGR y por la Gobernación del Huila. De igual manera, es necesario que se cumpla con el carácter público del seguimiento a la sismicidad a través de su inclusión en los Informes de Cumplimiento Ambiental.

Se debe evaluar por parte de un comité independiente si Emgesa indujo a errores en las decisiones de sustracción de reserva y de licenciamiento ambiental con sus estudios omisivos en deficientes.

La normativa en materia de sismicidad inducida/desencadenada por presas debe ser reorientada, con adecuado balance entre el número de sensores a usar, el tipo de sensor y la necesidad de estimar el mecanismo de la fuente. Por tanto el agregar una estación sismológica en el área del proyecto hidroeléctrico El Quimbo contribuirá seguramente en la identificación de parámetros de la fuente pero la precisión de la ubicación será mínima (del orden de kilómetros). Además los acelerógrafos y el sismógrafo de dicho proyecto están orientados a hacer un monitoreo despreocupado y pasivo en donde debe considerarse una metodología preventiva con capacidad de análisis de los estados de esfuerzos y posible activación de fallas con una resolución adecuada.

Es indispensable el seguimiento de la sismicidad desencadenada e inducida en el tiempo de llenado de la presa o posteriormente con una red de sensores que garantice una ubicación detallada de los microsismos, se debe en todo caso hacer un diseño y evaluación de la disposición de los sensores basada en el modelo de velocidades para optimizar recursos y dar garantías en la precisión, en donde un conocimiento de las condiciones locales es imprescindible.

Se debe incluir un balance entre diferentes tipos de sensores de tal forma que se optimice recursos y se obtenga la información más completa. Entonces, resulta necesario la interacción y recopilación de información de diferentes sensores provenientes de: Red sismológica Nacional, Red de Acelerógrafos, información geofísica del sector petrolero y

levantamientos geofísicos regionales realizados en las cordilleras. Todo esto ayudará en la construcción de un modelo de velocidades de mayor detalle.

Es necesario que se lleve a cabo un estudio serio sobre amenaza sísmica, que responda al tamaño del megaproyecto, a la complejidad de la zona estudiada y a la gigantesca vulnerabilidad que en el caso de un desastre, existe en la región. Los antecedentes de encadenamiento de procesos naturales en relación con los sismos en la región son muy preocupantes y definen una altísima susceptibilidad a avenidas torrenciales destructoras que se relacionan con los sismos por la inducción de grandes deslizamientos en las laderas que han represado los ríos y que han colapsado de manera súbita.

REFERENCIAS CITADAS

Allen, C.R. and Cluff, L.S. (2000) Active Faults in Dam Foundations: An Update, Proc.12th World Conference on Earthquake Engineering, January 29-February 5, Auckland, New Zealand, Vol. II, paper no. 2490, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

Birkelo et al. (2012), High-quality surface microseismic data illuminates fracture treatments: A case study in the Montney, Passive seismic and microseismic- PART 1, The leading edge.

Carder, D. (1945). Influence of reservoir-loading on earthquake-activity in the Boulder dam area. American Geophysical Union

Contraloría General de la República. Actuación especial, ANLA. Seguimiento a denuncias ciudadanas para exigir el cumplimiento de obligaciones ambientales en la actual construcción de hidroeléctricas. Septiembre de 2014.

Cortés, M., Colletta, B. & J. Angelier, 2006. Structure and tectonics of the central segment of the Eastern Cordillera of Colombia. Journal of South American Earth Sciences 21 (4), 437-465

Duncan P. (2012), Induced Seismicity: Monitoring to mitigation, SEG Annual meeting Las Vegas.

EAB - GMAS (2015), Investigación de carácter aplicado a través de un estudio geofísico para el desarrollo del modelo tridimensional en la cuenca del río Chuza Fase II, Bogotá D.C.

EMGESA-INGETEC. (2008). Estudio de Impacto Ambiental del proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Capítulo 3, pág. 3.2-9 a 3.2-17

EMGESA - INGETEC. 2009. Evaluación de la amenaza sísmica del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Revisión 0. Volumen 1 de 1. Documento PHEQ-DGEO-DOC-0190.

Fierro, J. (2014). Estudio geológico, geomorfológico y de aspectos hidrogeológicos para la declaración del Parque Natural Nacional Serranía de San Lucas. Informe interno Parques Nacionales Naturales

Fierro Morales, J. y Ángel-Amaya, A. (2008). Tectónica activa y sismicidad en la Sabana de Bogotá, Colombia-Suramérica. Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Lima, Perú.

Franco & Ojeda (2004), Mejoras al modelo de velocidades para la localización de sismos en Colombia. Instituto Colombiano de Geología y Minería, Red sismológica Nacional de Colombia, Publicaciones Servicio Geológico.

Gupta, H. (1992). Reservoir-induced Earthquakes. Developments in Geotechnical Engineering, 64. Elsevier

Gupta, H. (2002). A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India

Havskov & Ottemöller (2010), Routine data processing in Earthquake seismology, Springer.

ICold (1998). International Committee on Large dams. Neotectonics and dams. Guidelines and case histories.

Ingeominas (2002). Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali.

Jiménez, G. (2008). Análisis de la deformación y modelo estructural basado en datos paleomagnéticos y cinemáticos en el sector sur del Valle Superior del Magdalena (Anticlinal de la Hocha).

Kerr, R. & Stone, R. (2009) A Human Trigger for the Great Quake of Sichuan?. Science, Vol. 323 (5912).

Lisle, R., Brabham, P., & Barnes, J. (2011). Basic Geological Mapping. Wiley-Blackwell – A Jhon & Sons, Ltd., Publication

Mahdavian, A. (2008). Rudbar Lorestan Dam Design and local Faults. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing, China

Maxwell (2014), Microseismic imaging of hydraulic fracturing: improved engineering of unconventional shale reservoirs. SEG.

McGarr, A., Simpson, D. & Seeber, L. (2002). Case Histories of Induced and Triggered Seismicity. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Volume 81a. International Assoc. Seismology & Physics Earth's Interior, Committee on Education.

Ramírez, J. (1975). Historia de los Terremotos en Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Rodríguez G. (2014), Análisis de la microsismicidad generada en un yacimiento de hidrocarburos por una operación de fracturamiento hidráulico mediante el uso integral de técnicas de sísmica pasiva, Tesis maestría Universidad Nacional de Colombia Toro, R & Osorio, J. (2005). Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de Los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. Revista UIS. Vol. 27, núm. 1

Stein & Wysession (2003), An introduction to seismology, Earthquakes and Earth structure. Blackwell.

Vargas, Pujabes & Montes (2007), Seismic structure of South-central Andes of Colombia by Tomographic inversión, Geofísica internacional 2007.

Velandia, F., Acosta, J., Terraza, R. y Villegas, H. (2002). The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia

Velandia, F., Terraza, M. R., & Villegas, H. (2001). El Sistema de Fallas de Algeciras hacia el suroeste de Colombia y la actual transpresión de los Andes del Norte. In VIII Congreso Colombiano de Geología. Memorias (CD–Room).

Velandia, F., & Montes, N. 2005. Actividad neotectónica del sistema de fallas de Algeciras en el departamento del Huila. In X Congreso Colombiano de Geología y IV Seminario sobre el cuaternario en Colombia.



Vergara, H., 1996. Rasgos y actividad neotectónica de la falla de Algeciras. In Memorias del VII Congreso Colombiano de Geología (pp. 491-500).

Wang, C. & Manga, M. (2010). Earthquakes and Water. Lecture notes in Earth Sciences. Springer.

Wieland, M., Bozovic, A. & Brenner, R. (2008). Dam design - the effects of active faults

Yenier, Laporte & Baturan (2016), Induced Seismicity Monitoring: Broadband Seismometers and Geophone Comparison, SEG annual meeting.