

V ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS

EL SISMO DE QUETAME (Cundinamarca)

UN SISMO DE LABORATORIO

Por: Augusto Espinosa Silva

1. OBJETO

El sábado 24 de mayo de 2008 tuvo ocurrencia el sismo de Quetame, con epicentro en esta vecina población de Cundinamarca, situada a 39 km de distancia de la ciudad de Bogotá.

El evento, que ocurrió a las 2:20pm hora local, fue precedido por tres (3) sismos premonitorios y seguido por sesenta y cinco (65) réplicas de alguna importancia, grabadas en la red nacional, en las siguientes 24 horas después del evento principal.

La red local de Bogotá, compuesta por 30 estaciones, de ellas dos dobles, también registró el sismo. Podría decirse que este es el temblor mejor registrado de la historia sísmica de Colombia, y ya se empiezan a recibir los estudios que este volumen de información produce naturalmente en la comunidad científica.

Algunos aspectos pertinentes se tratan en este escrito, preparado para el V Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras de la ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA.

2. ANTECEDENTES

2.1 Tectónica

Desde el Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia (1984), quedó claramente definido que una de las zonas sismogénicas más activas del país era precisamente la Falla Frontal de la Cordillera Oriental, más un paquete de

fallamiento compuesto por una serie de fracturas más o menos paralelas, que son la expresión del empuje de la Placa Tectónica de Nazca que deriva hacia el oriente varios centímetros al año, sometiendo a compresión la zona central del país. Inicialmente se citaba la secuencia de las fallas de Santa María, Guaicaramo y Yopal como una síntesis incompleta del fenómeno; hoy se sabe que las fracturas que le sirven de expresión son un número considerablemente más grande.

Por los mismos años Espinosa (1982) postuló la existencia de la Microplaca de Macondo, que vendría a explicar el movimiento tectónico del país, al menos desde su expresión en superficie. Lobo Guerrero ha explicado cómo en la frontera de la placa se ponen en contacto rocas de edad Jurásica y Pre-Devónica, que se deslizan sobre rocas del Cuaternario como efecto final de la compresión transversal de la cordillera. Entre las dos rocas que patinan una sobre la otra, median 200 millones de años de edad.

2.2 La Región de Chivor

Cuando se construyó el proyecto Hidroeléctrico de Chivor, se evaluó detalladamente la amenaza sísmica de una zona caracterizada por cañones más o menos paralelos al borde llanero, uno de los cuales sería ocupado por el embalse.

Con posterioridad a la construcción se detectaron fugas de agua presumiblemente provenientes de las tuberías de carga, y una cierta sismicidad difusa. Como resultado de este fenómeno el Ingeominas instaló en la zona una serie de estaciones sismológicas portátiles, que darían por resultado la implantación por la red Nacional de Acelerógrafos de Colombia–RNAC, de la Estación de Quetame (Cundinamarca), CQUET, gracias a la cual se debe el registro del sismo homónimo, en la zona epicentral.

2.3 El sismo de Tauramena

El 19 de enero de 1995, en Tauramena, Casanare, ocurrió un sismo de carácter superficial al que se le midió una magnitud, $m_b=6.5$. Este sería el primero de una serie de sismos de significación registrados en Colombia en ese año de 1995. Se sintió con fuerza en Bogotá, produjo 10 muertos y recibió considerable atención por parte de la comunidad científica por la cercanía al proyecto petrolífero de Cuisisana.

Algunos datos básicos del sismo de Tauramena se presentan en paralelo con el de Quetame en el **Cuadro No.1**

CUADRO No.1 SISMOS RECIENTES DEL BORDE LLANERO

No.	DESCRIPCION	TAURAMENA	QUETAME
1	FECHA	19 ENERO 1995	24 MAYO 2009
2	HORA LOCAL	10:05 AM	2:20 PM
3	LATITUD	5.03° N	4.40 N
4	LONGITUD	72.95° W	73.81 W
5	MAGNITUD	$m_b = 6.4$	$M_L = 5.7$ $M_w = 5.9$
6	PROFUNDIDAD	16 km	0.2 km
7	ACELERACION EPICENTRAL	-----	$a_{max} = 0.62g$
8	PREMONITORIOS		3, $M_L = 2.5 \rightarrow 4.1$
9	REPLICAS (<26 Mayo)	29, $m_b = 3.5 > 5.7$	65, $M_L = 1.6 \rightarrow 4.2$
10	FALLA ACTIVADA	Guaicaramo	Naranjal

3. REGISTROS

3.1 Generalidades

A diferencia de los sismos anteriores ocurridos en el país antes de las redes de instrumentos, éste de Quetame es el más registrado de la historia local.

En efecto:

Red Sísmica Nacional de Colombia – RSNC

21 estaciones de esta red grabaron el evento y permitieron su localización inmediata.

Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia – RSNC

La estación doble CBOG1, registró el sismo en Ingeominas Bogotá en superficie y en roca a 181m de profundidad.

Red de Acelerógrafos de Bogotá – RAB

27 de las estaciones de Bogotá registraron el sismo, dos de ellos de manera doble y cada uno con tres componentes: N-S, E-W, y vert.

Lo anterior equivale a 96 acelerogramas locales en la ciudad de Bogotá, lo que corresponde a un acervo invaluable de información y una excelente oportunidad de aprender sobre el depósito de suelo.

3.2 Distribución

Los acelerogramas son de diverso origen, en el sentido de que hay unos registros en roca y otros en suelo blando y otros en suelo granular; unos epicentrales, otros en la zona de la falla frontal y amplia gama en el depósito de suelos de la Sabana de Bogotá, lo que permite un análisis más completo y gran variedad de conclusiones.

En concreto, se tiene lo siguiente.

- Registros Epicentrales: 1, tres componentes.
- Registro Zonales: 1, tres componentes.
- Registros en roca: 5, tres componentes.
- Registros en suelo arcilloso: 11, tres componentes.
- Registro en suelo granular: 5, tres componentes.
- Registro en piedemonte: 4, tres componentes.
- Registros dobles: 3, cada uno con tres componentes.

3.3 La Red de Bogotá

Este sismo de Quetame, o de El Calvario, por la población ubicada en las cercanías del epicentro, llega en un momento crítico de la Red de Bogotá–RAB. La instalación cuenta con 30 estaciones provistas de acelerógrafos, 28 de las cuales registran en superficie y dos (Uniagraria y Escuela General Santander) con registro doble en superficie y en el fondo (down-hole) en roca. Su materialización ocurrió entre julio de 1998 y junio de 2000.

Desde enero de 1999, la RAB registró mayormente sismos sin importancia del Nido de Bucaramanga, Los Santos (Santander), Zapatoca (Santander) y Cepitá (Santander) como quien dice, más nido, hasta el punto de que algunos críticos empezaron a cuestionar la inversión como inútil.

Vino, por fortuna, este evento de 2008, que no se ha vacilado en calificar como un **sismo de laboratorio** donde se activaron 27 de 30 estaciones y junto con la Red Nacional permite calibrar todo el sistema, en relación con una de las fuentes más activas en el área de influencia de la ciudad capital, sin que se haya producido un daño de consideración ni a la vida ni a los bienes de sus residentes. Con ésto no se busca soslayar el daño inmenso sufrido por las poblaciones y por las zonas rurales cercanas al epicentro.

4. CARACTERISTICAS DEL SISMO DE QUETAME

4.1 Información Geográfica Básica

El sismo de Quetame (Cundinamarca), se originó en una de las fallas del séquito de la llamada Falla Frontal de la Cordillera Oriental. El epicentro se detectó a 8.6 Km al noreste de la cabecera municipal, en uno de los valles abruptos que bordean la cordillera. La distancia desde Bogotá fue fijada en 39 Km por los expertos de INGEOMINAS.

En esta zona de la cordillera los valles siguen una dirección predominante N40°E, que es aproximadamente la misma dirección del fallamiento, si se exceptúan algunas fallas transversales a la cordillera, menores en número.

Si se traza una línea recta entre Bogotá y Villavicencio, esta línea tendrá aproximadamente 70 Km de longitud. A 31 Km de Villavicencio se encuentra el pueblo de Quetame, destacado en este caso por coincidir en forma aproximada con el epicentro del sismo del que se trata en este documento.

4.2 Datos Epicentrales

Las coordenadas del epicentro fueron determinadas como 4.399°N y 73.814°E; el foco, propiamente dicho, fue estimado a 0.2 Km de profundidad.

En el **Cuadro No.2** se presenta la información pertinente al registro epicentral.

CUARO No.2 ESTACION DE QUETAME (CQUET)

No.	INFORMACION EPICENTRAL			
1.	COORDENADAS	4.399° N -73.814° W		
2.	MAGNITUD	M _L = 5.7 M _W = 5.9 (Grupo de Harvard)		
3.	DISTANCIA	8.6 Km		
4.	PROFUNDIDAD	0.2 Km		
5.	DURACION Mov. Fuerte	7.2 sec		
6.	ACELERACION MAXIMA	NS + 605.63	cm/seg ²	0.62g
		EW - 460.58	cm/seg ²	0.47g
		Vert - 297.49	cm/seg ²	0.30g
7.	MATERIAL	Roca		

Como es fácil advertir, un sismo de sólo 7.2 seg de duración fuerte, desarrolló en el epicentro una aceleración de 0.62g. La aceleración transversal a la ruptura es solo 75% y alcanza a 0.47g.

4.3 Datos en Bogotá

En Bogotá, a 39.0 Km del epicentro, se registraron datos en la Red Nacional (RNAC) y en la Red de Bogotá (RAB). La red nacional lo grabó en la estación de Ingeominas (CBOG1), en suelo y en roca, y la Red de Bogotá (CBART), también en roca, para efectos de la comparación. La información se presenta en el **Cuadro No.3**

CUADRO No.3 EL SISMO DE QUETAME EN BOGOTA, EN ROCA

No.	DESCRIPCION	INGEOMINAS	SAN BARTOLOME
1	Aceleración		
	E-W	9.008 cm/seg ²	25.0
	Vert	5.511 cm/seg ²	10.0
	N-S	6.485 cm/seg ²	18.0
2.	Aceleración Espectral		
	E-W	24.0	75.0
	Vert	23.0	45.0
	N-S	33.0	65.0
3.	DURACION	35.0 seg	25.0 seg

La comparación entre las estaciones de Ingeominas y San Bartolomé, en roca, permite concluir lo siguiente:

- i. La aceleración que llega a Bogotá, en roca a profundidad, es una fracción insignificante de la registrada en la zona epicentral.

- ii. Los valores de la aceleración espectral son más parecidos, pero de todas formas insignificantes comparados con lo registrado en el epicentro.
- iii. El registro en San Bartolomé debe ser en roca blanda o meteorizada, porque seguramente tiene alguna amplificación implícita en el registro.

4.4 Datos en Villavicencio

El registro en Villavicencio fue hecho a través de la Estación de Villavicencio (CVIL1) de la red nacional, ubicada en roca.

Los valores obtenidos en estos registros se resumen en el **Cuadro No. 4**.

CUADRO No.4 EL SISMO DE QUETAME registro en Villavicencio, en Roca

No.	DESCRIPCION	INFORMACION VILLAVICENCIO
1.	ACELERACION	
	E-W	59.43 cm/seg ² 0.06g
	Vert	42.58 cm/seg ² 0.04g
	N-S	71.76 cm/seg ² 0.07g
2.	ACELERACION ESPECTRAL	
	E-W	190.0
	Vert	160.0
	N-S	190.0

Es evidente que el registro de Villavicencio es numéricamente mayor que el Bogotá, con todo y que el epicentro es casi equidistante entre Bogotá y esta ciudad del registro.

Debe presentarse una discusión sobre si la cuestión tectónica es más favorable para la transmisión de las ondas a través de la estratigrafía o paralela al plano predominante de los estratos. Se tenía la idea, probablemente equivocada, en el sentido de que sería más favorable llegar del borde llanero a Bogotá.

4.5 Mecanismo Focal

El grupo de sismología de la universidad de Harvard calculó el mecanismo focal del sismo, con resultados interesantes para la comprensión del fenómeno ocurrido.

La interpretación arrojó los siguientes resultados:

- DIRECCION DE FALLAMIENTO: Azimut 198°
- BUZAMIENTO: 83° W
- RUPTURA: Rumbo; lateral derecha

Quiere decir, en confirmación con lo que ya se sabía de la falla frontal que es una falla de alto ángulo, con una fuerte componente de rumbo en esta zona de la cordillera.

El fallamiento se presentó en la denominada falla de Naranjal, aunque todavía está por confirmar por los expertos.

4.6 Sismos Acompañantes

Se presentaron los siguientes sismos premonitorios, 3 con magnitudes locales entre 2.5 y 4.1, poco después de la 12 del día 24 de mayo.

Por otra parte se registraron 65 réplicas hasta el día 26, con magnitudes (M_L), entre 1.6 y 4.5.

Con posterioridad se han seguido presentando replicas en la zona epicentral, que trazan una línea en dirección SSW-NNE.

4.7 Los Registros en Bogotá

Como ya se ha indicado, 6 estaciones de la RAB registraron el sismo de Quetame, en dos de ellas en superficie y en roca. Además, la estación de Ingeominas registró el sismo en superficie y en roca.

Se ha dicho, por parte de la DPAE, que los registros logrados hasta la fecha han sido de eventos pequeños y moderados, por lo cual ninguno ha excitado el depósito de suelo más allá del comportamiento elástico.

En todo caso es tan numerosa y variada la cantidad de registros que se tiene, que es imperativo revisarlos, y concluir sobre ellos.

Sobretudo los relacionados con el sismo de Quetame que presentan una sola expresión del fenómeno en más de 60 acelerogramas.

4.8 Registros Dobles

Se entiende por registros dobles aquellos con un sensor en superficie y otro (down-hole) a profundidad, en el mismo sitio. En este caso, La estación de la Red Nacional, estación CBOG1, registró el evento en superficie y a 186m de profundidad. También la estación (CUAGR) registró en superficie y mediante down-hole a 130m de profundidad. La comparación entre resultados, para ver la amplificación originada en el estrato blando se presenta en el **Cuadro No.5**.

Como puede verse en CBOG la amplificación toma valores de 5.81 para NS, pasando por 3.74 para E-W y 2.57 para vertical.

En el caso de CUAGR, los valores son: 5.0 y 4.4 y 3.3, respectivamente.

CUADRO No: 5 ESTACIONES CON DOBLE LECTURA

No.	COMPONENTE	SUPERFICIE	DOWN-HOLE	REL. AMPL
CBOG 1	N-S	37.68 cm/seg ²	6.48	5.81
	E-W	33.69 cm/seg ²	9.00	3.74
	VERT	14.18 cm/seg ²	5.51	2.57
CUAGR	N-S	20.0	4.0	5.0
	E-W	22.0	5.0	4.4
	VERT	10.0	3.0	3.3

5. CONSECUENCIAS DEL SISMO DE QUETAME

5.1 Generalidades

La acción preponderante de los sismos en la ingeniería es el movimiento del terreno, y sobre todo el movimiento oscilatorio que implica cambios bruscos de la aceleración con la que el cuerpo se mueve.

5.2 Efectos del Movimiento del terreno

Se han agrupado estos efectos en cuatro principales que tienen ocurrencia individualmente o en forma colectiva según el área afectada permite que todos se manifiesten.

Estos efectos son:

- i. **Amplificación.** El depósito de suelos está en capacidad de amplificar las ondas sísmicas, dependiendo de la relación de impedancia entre la roca por la que accede la onda y el depósito de suelos al que llega. La no linealidad de la respuesta del suelo conduce a que cuando la aceleración incidente es baja ($a_i \leq 0.4g$) tiende a ocurrir una amplificación de la onda al pasar de roca a

suelo. Por el contrario, cuando el movimiento incidente posee alta aceleración ($a_i > 0.4g$) tiende a ocurrir una deamplificación.

- ii. **Asentamiento.** Los suelos granulares se densifican bajo la influencia de un movimiento sísmico. Los suelos finos o cohesivos se densifican bajo la misma acción, en este caso por consolidación.
- iii. **Licuación.** Cuando las sobre presiones de poros, bajo la acción sísmica, igualan los esfuerzos totales de un depósito de suelos granulares, el esfuerzo efectivo se reduce técnicamente a cero y sobreviene la licuación donde los granos de suelo flotan en el agua intersticial que ahora toma el exceso de presión.
- iv. **Deslizamiento.** Los deslizamientos de tierra generalmente acompañan la ocurrencia de sismos, en las colinas de la **zona epicentral**.

En el caso analizado del sismo de Quetame, es evidente que se puedan encontrar los efectos locales de **amplificación** de la onda que llevaron al daño o a la destrucción de numerosas construcciones rurales o en los pueblos de la zona de influencia. Lo mismo puede decirse del **asentamiento por compactación** de los depósitos granulares en los antiguos lechos de ríos compuestos por gravas y arenas de compactación deficiente. No puede decirse lo mismo sobre la posibilidad de licuación que en este caso por la limitada duración del sismo puede decirse que no ocurrió por el limitado número de ciclos significativos, entre 3 y 8 que se produjeron en los depósitos granulares, que para este efecto deberían estar saturados. En cambio, ciertamente se produjeron numerosos deslizamientos de tierras y caída de bloques, ayudados por el agua lluvia, en el área epicentral, como mandan los cánones.

5.3 El efecto de artesa en los depósitos arcillosos blandos

Se ha discutido ampliamente del efecto pernicioso de las artesas de material blando, porque por leyes del movimiento ondulatorio tienden a atrapar la onda que penetra por refracción en la artesa pero no puede salir porque

encuentra una condición supercrítica que conduce a una reflexión total dentro del depósito arcilloso de la misma artesa.

En estas condiciones las ondas van y vienen dentro de la artesa, rebotando en sus paredes sin poder salir.

El resultado es el alargamiento del sismo por el efecto de la triple resonancia, definida por Espinosa (95) como ampliación de una propuesta de Rosenblueth (1991) sobre doble resonancia, formulada en 1985, a raíz del terremoto de Mexico.

Véase el **Cuadro No. 6**

CUADRO No. 6 EL EFECTO DE ARTESA Y LA TRIPLE RESONANCIA

No.	LUGAR	DISTANCIA	DURACION	$a_{\max}$	$Sa_{\max}$
1	Zona epicentral	8.6 km	7.2 seg	0.62 g	
2	Zona de influencia Villavicencio	31.0 km	45.0 seg	0.07 g	0.19
3	Bogotá en Roca - Ingeominas - San Bartolomé - Colegio Sierra Morena	39.0 km	35.0 seg 25.0 seg	0.009 g	0.03 0.07
4	Bogotá en la artesa - CBOG1 - CUAGR		55.0 seg 60.0 seg	0.04 g 0.02 g	0.18 g 0.12 g

La consecuencia de estos efectos sumados produce el resultado casi inverosímil de un sismo que se origina en Quetame, Cundinamarca, zona epicentral, con:

- 7.2 segundos de duración; llega a Villavicencio a 31km de distancia, con
- 45.0 segundos
A Bogotá situada a 39.0 km, llega en roca con
- 25.0 segundos en San Bartolomé, y
- 30.0 segundos en las demás estaciones en roca; y en Ingeominas en la base, en roca, con
- 35.0 segundos. Luego el tren de ondas cae en la artesana de Bogotá, y allí se llega a
- 25.0 segundos en la Escuela de Ingeniería; a
- 40.0 segundos en el Banco de la República y en la Escuela de Tejedores; luego a
- 48.0 segundos en el Parque del Tunal
- 50.0 segundos en el Parque Timiza
- 55.0 segundos en la Escuela General Santander
- 58.0 segundos en la Estación de Fontibon y
- >60.0 segundos en la U. Corpas en la U. Agraria y en la Escuela Usaquén

Esta variedad de tiempo es producida por un solo sismo, lo cual debe destacarse para futuras interpretaciones.

5.4 Clasificación de los Acelerogramas

El mapa de Bogotá con 30 estaciones potenciales de registro es de por sí confuso; cuando aparecen sobre él los resortes alargados de los acelerogramas, a razón de dos direcciones mutuamente ortogonales por punto de registro, la situación se torna más compleja, sobre todo porque al principio parece rechazar el análisis racional.

Poco a poco, sin embargo, el ojo entrenado con el conocimiento geotécnico de la ciudad, empieza a encontrarle un sentido a los registros y a desentrañar la verdad que traen consigo.

En efecto, se pueden agrupar las estaciones según su respuesta en las estaciones identificadas con sus números, así:

Registro en Roca

- 10. TV CABLE
- 16. SAN BARTOLOME
- 25. COLEGIO SIERRA MORENA

Registro en Piedemonte

- 2. UNIVERSIDAD DE LA SALLE
- 7. COLEGIO ESCUELA USAQUEN
- 17. UNIVERSIDAD MANUELA BELTRAN
- 24. BOMBEROS LA MARICHUELA

Arcilla de Bogotá

- 1. ESCUELA DE INGENIERIA
- 4. UNIVERSIDAD CORPAS
- 5. UNIVERSIDAD AGRARIA
- 9. BANCO DE LA REPUBLICA
- 13. PLANTA DE BOMBEO DE FONTIBON
- 14. CLINICA DEL NIÑO
- 15. JARDIN BOTANICO
- 19. CITEC
- 30. COLEGIO KENNEDY
- 20. CLUB EL TIEMPO
- 11. PARQUE DE LA FLORIDA

Material Granular

- 3. COLEGIO FERNANDO MAZUERA
- 22. PARQUE EL TUNAL
- 26. ESCUELA DE TEJEDORES
- 21. PARQUE TIMIZA
- 29. ESCUELA GENERAL SANTANDER

6. REFERENCIAS

- 1. AIS. INGEOMINAS. **Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia.** Comité AIS 300- Amenaza Sísmica. 1998.
- 2. ESPINOSA, Augusto. **Geotecnia Sísmica de Bogotá.** Sociedad Colombiana de Ingenieros, VIII Jornadas Geotécnicas. II Foro Sobre Geotecnia de La Sabana de Bogotá. 1995.

3. ESPINOSA, Augusto. **La Micro-Placa de Macondo y la Actividad Sísmica Reciente en Colombia.** Seminario de Sismo-Resistencia SCA. Cali, 1995.
4. LOBO-GUERRERO U., Alberto. **La Infraestructura de Colombia.** V Congreso Colombiano de Geotecnia. SCI, 1994.
5. SARRIA, Alberto. **Comentarios sobre el Registro de Quetame. 2008**
6. DIMATÉ, Cristina-Ingeominas. **El Sismo de Quetame del 24 de mayo de 2008.** Aspectos Sismológicos. Mayo de 2008.
7. GALLEGU, Mauricio. **Los Registros de la Red de Bogotá (RAB) con relación al sismo de Quetame.** Comunicación Personal. 2008.