

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE SITIO PARA EL SECTOR DE ARAGÓN EN MEDELLÍN

SEISMIC SITE RESPONSE EVALUATION FOR THE MEDELLÍN ARAGÓN AREA

IVÁN OTÁLVARO

Profesor Asistente, Pontificia Universidad Javeriana Cali, ifotalvaro@puj.edu.co

FRANCISCO NANCLARES

Profesor Asistente, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin, fjancla@unalmed.edu.co

Recibido para revisar Septiembre 05 de 2007, aceptado Mayo 15 de 2008, versión final Junio 23 de 2008

RESUMEN: En el presente documento se describen los resultados de la investigación de campo y el análisis numérico de la respuesta de sitio para el sector de Aragón de la vertiente centro oriental del Valle de Aburrá, en Medellín. Son descritos los resultados de la exploración del subsuelo así como los perfiles de propagación de velocidad de ondas sísmicas obtenidos a partir de down-hole. En los sitios estudiados se presentan suelos originados a partir de la meteorización del Stock de San Diego en ambientes tropicales. Se presenta la modelación del movimiento del terreno para el sismo sintético de diseño desarrollado por el Grupo de Sismología de Medellín (2002) mediante modelos de propagación unidimensionales utilizando el SHAKE91. Los resultados mostrados en este trabajo pueden ser útiles en el diseño de estructuras que se planeen construir sobre el mismo cuerpo y cuyo perfil litológico difiera de los típicos propuestos en la Microzonificación Sísmica de Medellín. Adicionalmente los ingenieros geotecnistas encontraran trayectorias de comportamiento dinámico generadas en muestras con diferentes intensidades de meteorización, los cuales pueden ser útiles para análisis posteriores.

PALABRAS CLAVE: respuesta de sitio, suelos tropicales, dinámica de suelos, down-hole.

ABSTRACT: This paper describes the results of site investigation and the site response numerical analyses for the Aragón area, located on the central eastern hillside of the Aburra valley, in Medellín. Site investigation as well as in-situ measurement of shear wave velocities obtained using down-hole techniques are presented. Residual soils produced by weathering of the San Diego Stock in a tropical environment are found at the site. The shaking ground profile for the synthetic earthquake developed by the Medellin Seismologic Group (2002) was modelled using one-dimensional propagation waves model and the SHAKE91 computer program. The results presented might help in the design of structures that are planned to be constructed in the same geological body and for which the lithologic profile does not match the typical presented in the Medellin Seismic Microzonation. Additionally geotechnical engineers will find paths for dynamic behavior generated from samples which present different intensities of weathering. Such information might be useful for future analysis.

KEYWORDS: site effects, tropical soil, soil dynamics, down-hole.

1. INTRODUCCIÓN

En general el noroeste colombiano es una región tectónicamente activa donde se presentan movimientos sísmicos con cierta frecuencia. El desplazamiento de la placa Nazca hacia el oriente, hundiéndose por debajo de la placa de Suramérica que se mueve hacia el oeste, tiene como resultado el acortamiento de la corteza acompañada por levantamiento de las montañas, subsidencia de las cuencas, plegamiento y cizallamiento (Woodward-Clyde Consultans, 1986), fenómenos de los cuales provienen los sismos que afectan a la ciudad de Medellín.

Diferentes estudios locales (Grupo de Sismología de Medellín, 1999; y 2002), han preparado una serie de acelerogramas sintéticos que recogen la amenaza sísmica en la ciudad de Medellín y el Valle de Aburrá. Acelerogramas generados a partir de Funciones Empíricas de Green empleando como semilla sismos registrados en la red acelerográfica de Medellín y sus municipios vecinos. Estos acelerogramas presentan

características de aceleración, duración y contenido frecuencial acordes con el escenario sísmico esperado.

En las microzonificaciones de Medellín y el Valle de Aburrá se contó con un número limitado de perforaciones que permitieran, primero, definir el espesor de los horizontes de suelo (las zonas y las perforaciones realizadas para la microzonificación y para el presente estudio se ilustran en la Figura 1), y segundo, realizar pruebas dinámicas de campo y laboratorio, necesarias para inferir su comportamiento dinámico, por tanto, su resolución está limitada al cubrimiento de la variabilidad de los suelos en cada una de las zonas homogéneas. La localización de las perforaciones tuvo en cuenta cubrir por lo menos cada una de las formaciones superficiales, mientras que la inclusión de la variabilidad del suelo estuvo ligada a la inclusión de bandas obtenidas a partir de ajustes por mínimos cuadrados sobre la rigidez y el amortiguamiento en función del nivel de deformación.

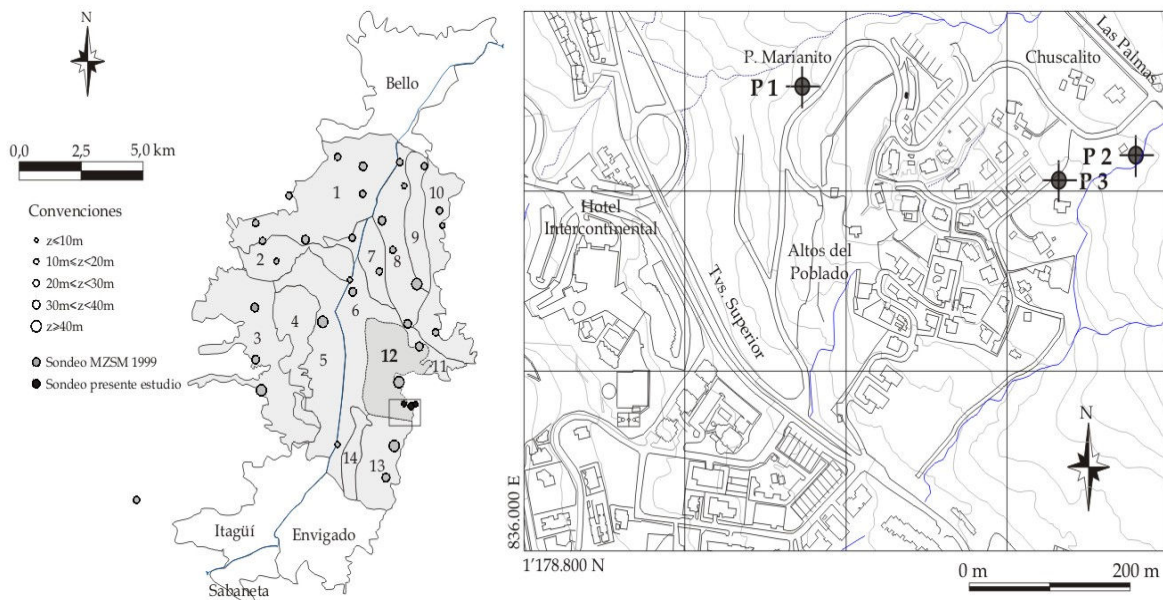


Figura 1. Zonas sísmicas de Medellín y localización de sondeos
Figure 1. Medellín seismic zones and drill hole location

Este trabajo pretende, por un lado, mejorar el conocimiento de las propiedades dinámicas de los suelos del Valle de Aburrá a partir del análisis de tres puntos específicos al interior de la Zona Homogénea 12, Transición Anfibolita-Gabro de Medellín; y por otro, verificar la validez del espectro de respuesta obtenido por el Grupo de Sismología de Medellín (1999), en la Zona Homogénea 12.

2. CONDICIONES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

La ciudad de Medellín y el valle de Aburrá se encuentran en el sector norte de la cordillera Central de la República de Colombia, en una depresión por la cual corre el río Medellín con una dirección aproximada N-S, depresión que se encuentra enmarcada por vertientes que presentan grados diferenciados de inclinación y elevación. La zona objeto de estudio se encuentra al interior de la unidad de paisaje definida como Vertiente Oriental; la cual representa una zona con una morfología particular y por lo tanto delimitable al interior del valle. Su configuración actual, si se compara con la de la vertiente Occidental, es caracterizada por laderas cortas y pendientes fuertes (Cano et al., 2001a).

Aunque en la zona se presentan rocas metamórficas e ígneas, tales como anfibolitas y gneises para las primeras, y dunitas, dioritas y gabros para las segundas, y los depósitos residuales de suelos derivados de ellas, en esta investigación se trabajó solo con suelos derivados de gabro (ver Figura 2). El sector objeto de estudio se caracteriza por la cobertura de depósitos de vertiente sobre suelos in situ y transiciones suelo-roca, donde es posible encontrar localmente materiales in situ de gabro aflorando como ventanas erosivas, de tope redondeado. De acuerdo con Cano et al. (2002), el gabro en este sector corresponde a una roca de tipo ígnea, plutónica, formada por cristalización; en su aspecto físico es maciza, masiva, de grano grueso, isogranular y holocristalina, presenta contactos gradacionales con anfibolitas y dunitas. En el sector tanto la roca como el

suelo presentan discontinuidades rellenas de cuarzo, poco alteradas y de color blanco lechoso; en el gabro, en el sitio objeto de estudio, presenta como minerales principales plagioclasa, hornblenda y pirita; con contenidos de 45%, 54% y 1% respectivamente.

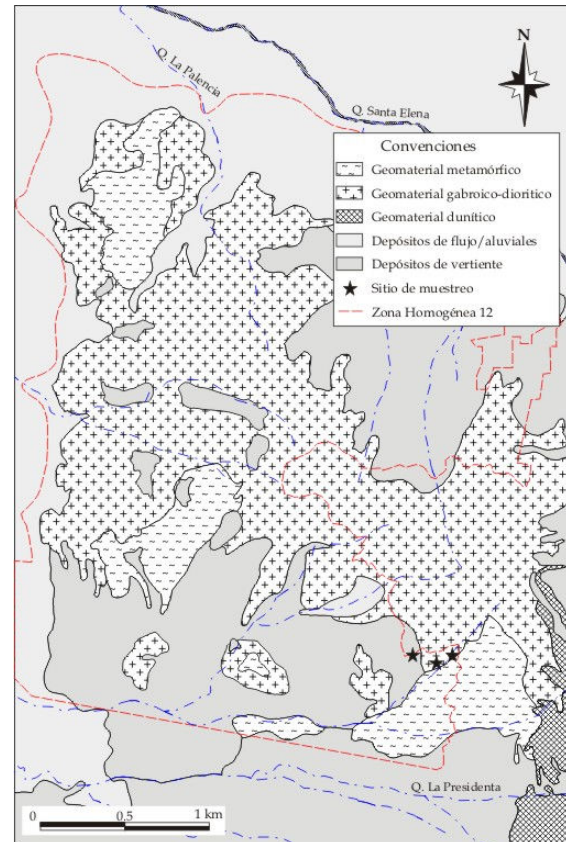


Figura 2. Mapa geológico simplificado de la zona homogénea 12

Figure 2. Simplified geological map of the 12th homogeneous zone

4. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Para la obtención de las muestras necesarias para la caracterización del suelo se realizaron tres perforaciones profundas con taladro rotatorio, dos de los cuales alcanzaron horizontes de roca; en la Figura 1 se presenta la localización de los sondeos. La secuencia estratigráfica en el sitio consiste en una cobertura superficial de depósitos de vertiente que descansa sobre el material residual. El perfil de meteorización estudiado presenta en

general una secuencia donde el suelo residual, RS o grado VI, está prácticamente ausente, es decir, los suelos se pueden considerar como jóvenes. En el documento se clasifica el perfil de meteorización de acuerdo con la metodología propuesta por Cano et al. (2001b). Los ensayos adoptados para la caracterización de los geomateriales presentes fueron efectuados de acuerdo con

las normas ASTM. Las pruebas de difracción por rayos X, microscopio electrónico de barrido, y la propagación de ondas mediante down-hole siguieron procedimientos propios, adaptados a las necesidades y limitaciones de esta investigación, tal como se discute más adelante. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados de las pruebas índice.

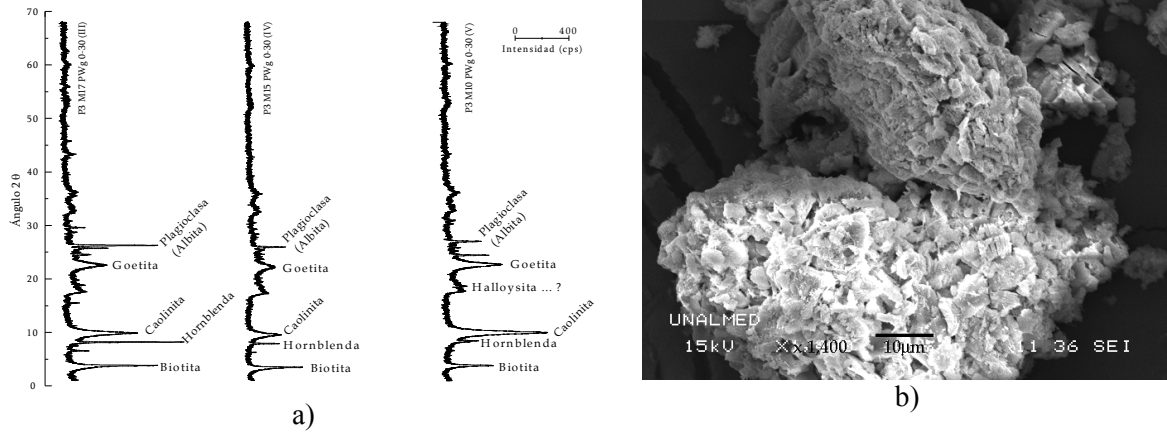


Figura 3. a) Difractogramas obtenidos para las muestras de la perforación 3; b) Agregaciones resistentes al tamizado, análisis mediante SEM en la fracción menor que 0.425 mm

Figure 3. a) X-Ray patterns obtained for drill hole 3 samples; b) Sieve analyses resistant aggregations, SEM image for the fraction smaller than 0,425 mm

Tabla 1. Resumen de las pruebas índice
Table 1. Summary of index laboratory tests

Muestra	Prof. (m)	Perfil ¹	w (%)	LL	IP	Gs	Fracciones USCS			e	γ _d (kN/m ³)
							%Arena	%Limo	%Arcilla		
P1-M5	3.8	PWg 0-30 (IV)	32			2.71	36	55	8	1.021	13.4
P1-M6	4.2	PWg 0-30 (IV)	45	43	3	2.77				1.216	12.5
P1-M7	6.5	PWg 0-30 (IV)	33	32	4	2.86				1.134	13.4
P1-M12	10.4	PWg 0-30 (IV)	18	22	5	2.96				0.721	17.2
P2-M3	1.9	GF 0-30 (VI)	97			2.65				2.770	7.0
P2-M12	6.7	GWg 0-30 (V-VI)	43			2.88	34	50	16	1.341	12.3
P2-M15	8.7	PWg 0-30 (IV-V)	36			2.90	30	51	17	1.087	13.9
P3-M4	2.4	GW 0-30 (V-VI)	47	17	30		19	52	29	1.728	11.6
P3-M9	5.1	PWg 0-30 (V)	48	8	32		19	65	16	1.386	12.2
P3-M10	5.6	PWg 0-30 (V)	38			2.56	10	71	19	0.939	13.2
P3-M14	7.8	PWg 0-30 (IV)	37	10	27		61	16		1.463	13.0
P3-M15	8.3	PWg 0-30 (IV)	37			2.54	59	18	1	0.954	13.0
P3-M16	8.7	PWg 0-30 (III)	33	11	26		46	11		1.359	13.6
P3-M17	9.4	PWg 0-30 (III)	26			2.67	36	11	1	0.894	14.1
P3-M18	9.8	PWg 0-30 (III)	25	5	23		43	45	8	0.967	15.1
P3-M19	10.4	PWg 0-30 (III)	27	4	26		39	53	7	1.050	15.0
P3-M26	18.3	PWg 30-50 (III)	26	8	26		38	46	13	1.199	16.1

En los perfiles de meteorización predominan los horizontes saprolíticos, cuya intensidad se caracteriza por preservar algunas características y minerales del material parental, zona PW 0-30 y grados IV y V, correspondiendo a limos de baja plasticidad cuyos minerales constituyentes, de acuerdo con las pruebas de difracción en rayos X mostradas en la Figura 3a, son plagioclasa, caolinita, hornblenda, goetita y biotita.

Al observar la distribución granulométrica se encontró que el porcentaje de partículas tamaño arena, entre 4.75 mm y 0.075 mm de acuerdo con el USCS, es un buen trazador para inferir el grado de meteorización en los suelos derivados de gabro; para el grado V es inferior al 10%; oscila entre el 23% y 36% para el grado IV; y superior al 38% para el grado III. Combinando el tamizado mecánico con los análisis del Microscopio Electrónico de Barrido, SEM, se observa que en algunas ocasiones las partículas tamaño arena corresponde en realidad a agregaciones de partículas de menor tamaño, tal como se aprecia en la Figura 3b, adicionalmente se pudo observar que el tamaño promedio de poros intra-agregados es inferior a 5 μm , mientras que los poros inter-agregados oscilan entre 40 μm y 150 μm de diámetro. En este contexto poros inter-agregados se refiere a los vacíos que quedan entre las agregaciones de partículas y se asumen interconectados, mientras que poros intra-agregados se refieren a los micro poros que quedan al interior de las agregaciones y es posible que estén asilados unos de otros.

5. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

Se utilizaron técnicas de Down Hole para determinar la velocidad de propagación de ondas de corte. Para tal fin se revistió cada una de las perforaciones con un tubo de PVC y la interfase entre la tubería y el terreno natural se llenó con una lechada de cemento para que no se disipara la energía. Se midió en cada metro de perforación el tiempo de llegada desde la superficie del pozo hasta el fondo de las perforaciones. Para ello se

utilizó un sismógrafo de doce (12) canales marca Geometrics-Nimbus modelo ES1210F, un geófono multiaxial y un cable dotado de un sistema neumático para fijar el geófono a la superficie del tubo de PVC. La generación de las ondas de corte se efectuó por medios manuales, golpeando lateralmente con un mazo una platina de 200 mm de espesor que se insertó verticalmente en el terreno.

La velocidad de propagación de ondas de corte promedio en los sondeos fue de 170 m/s, presentó una pequeña variación con la profundidad en las perforaciones 1 y 2, tal como se ilustra en la Figura 4; mientras que en la perforación 3 la velocidad medida no exhibe una tendencia clara con la profundidad (ver Figura 4). En la figura citada se observa, en general, que la variación en la magnitud de la relación de Poisson puede asociarse con el horizonte del perfil de meteorización; así en las subzonas que corresponden a suelo, PW 0-30, el valor de la relación de Poisson es del orden de 0.4; y en las zonas de transición entre horizontes este valor es cercano a 0.2; mientras en los contactos o discontinuidades texturales del perfil se presenta una reducción entre el 25% y 50% del valor promedio obtenido en el horizonte. En general, las profundidades en las cuales se presentan los valores mínimos de la relación de Poisson coinciden con los contactos entre las subzonas del perfil de meteorización, y con diferencias texturales en el material parental o a contactos entre materiales in situ y transportados.

La degradación del módulo de rigidez a cortante, G , y el incremento de la fracción de amortiguamiento crítico, β , se determinaron a partir de ensayos sobre probetas inalteradas obtenidas de la Perforación 3. Las pruebas se ejecutaron de acuerdo con el procedimiento ASTM D4015-92, en muestras con el contenido natural de humedad, utilizando un equipo de Columna Resonante GCTS #7711444 en el cual se registraron deformaciones angulares entre $6 \times 10^{-3}\%$ y $2 \times 10^{-1}\%$. En la Tabla 2 se presentan las condiciones iniciales de las muestras ensayadas.

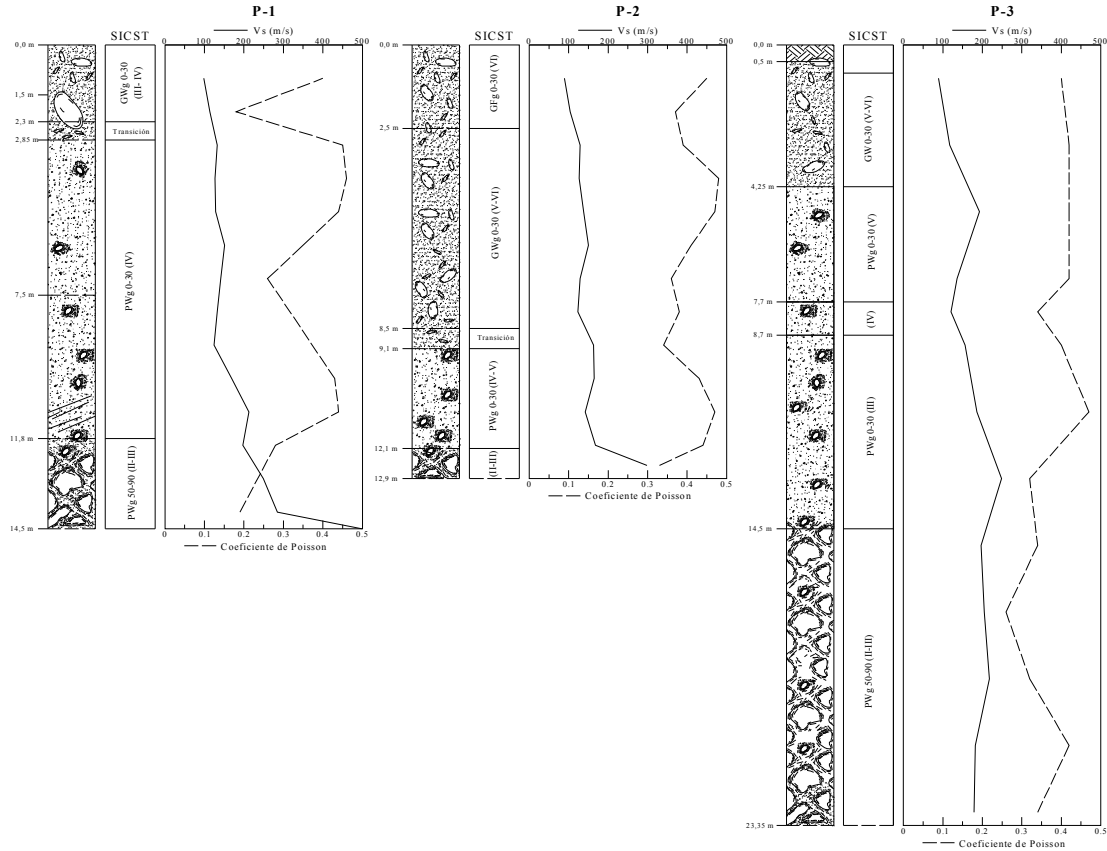


Figura 4. Resultados de la prueba de down hole
Figure 4. Down-hole test summary

Tabla 2. Condiciones iniciales de las muestras para las pruebas de columna resonante
Table 2. Initial conditions of the resonant column test samples

Muestra	Prof. (m)	Intensidad de meteorización	W (‰)	W _{res} (‰)	% S	e	σ _c (kPa)	u _a -u _w (kPa)*	χ(u _a -u _w)** (kPa)
P3M10	5.6	V	40	9.4	100	1.06	100	~0	0.0
P3M15	8.3	IV	28	12.0	85	0.90	150	287	153.0
P3M17	9.3	III a IV	28	15.0	94	0.83	180	42	37.0

*Estimada a partir de la SWCC.

**Esfuerzo debido a la succión según Bishop (1960).

El módulo de rigidez a cortante (G) para deformaciones del orden de 10⁻²% varió entre 30 MPa y 45 MPa, incrementando con el aumento en el nivel de esfuerzos, los cuales incluyen tanto el confinamiento como la succión inicial. Los menores valores de G se registraron en la muestra con mayor intensidad de meteorización, de manera similar a lo reportado por Macari y Hoyos (1996) y Otálvaro et al. (2004).

La degradación de G con el nivel de deformación sigue una trayectoria no lineal, tal como se aprecia en la Figura 5. La trayectoria seguida por las muestras P3M15 y P3M17 es prácticamente igual, posiblemente debido al efecto combinado de diferentes condiciones iniciales, índice de plasticidad y grado de meteorización. Para las condiciones iniciales en la muestra P3M15 se tiene una

Presión de cámara de 150 kPa y una succión estimada de 287 kPa, mientras que para la muestra P3M17 la presión de cámara es de 180 kPa y la succión inicial estimada es de 42 kPa.

La tasa de degradación del módulo de rigidez a cortante con el nivel de deformación medida es mayor respecto a las tasas medidas por el Grupo de Sismología de Medellín (1999), en muestras de la misma formación (ver Figura 6). La tendencia de los datos coincide con los reportados por Otálvaro et al. (2004) para los saprolitos del mismo sector.

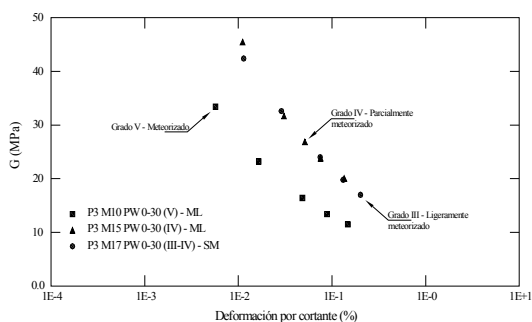


Figura 5. Variación del módulo de rigidez con la deformación por cortante

Figure 5. Variation of shear modulus with shear strain

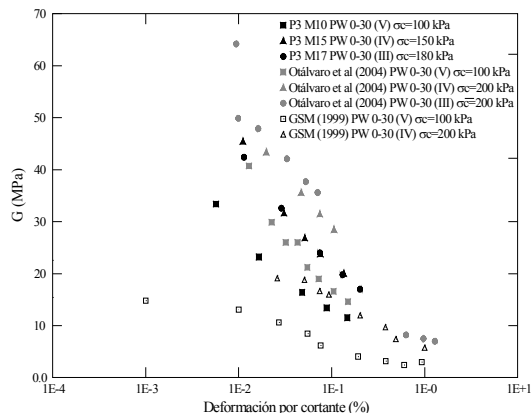


Figura 6. Comparación de la degradación del módulo de rigidez en los saprolitos de gabro

Figure 6. Comparison of the shear modulus reduction in gabro saprolite soils

La fracción de amortiguamiento crítico de los suelos estudiados está controlada por la amplitud de la deformación por cortante y el estado de esfuerzos; la dispersión de los

resultados obtenidos en la presente investigación se agrupa dentro de los reportados en otros trabajos (ver Figura 7). En los resultados no se aprecian tendencias claras con diferencias significativas, como en el caso del módulo de rigidez, debido a la dificultad que representa la evaluación del amortiguamiento.

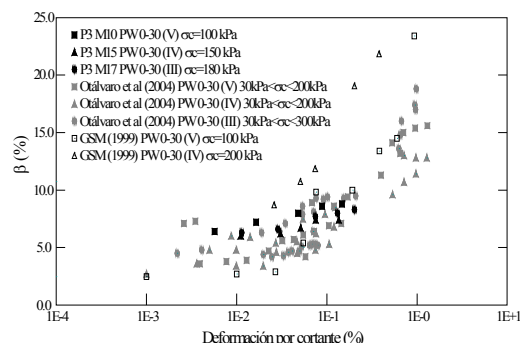


Figura 7. Variación de la fracción de amortiguamiento crítico con el nivel de deformación

Figure 7. Damping ratio variation with shear strain

6. RESPUESTA DE SITIO

A partir de las perfiles geotécnicos de las tres perforaciones y teniendo como señal de excitación el sismo sintético de diseño del Grupo de Sismología de Medellín (2002), se evaluó la respuesta dinámica en superficie, mediante el programa SHAKE91 de propagación unidimensional. Respuesta que es controlada fundamentalmente por los contrastes de los materiales y los espesores de los horizontes que componen las secuencias de suelo en los cuales se propagan las ondas sísmicas; así como por las características del movimiento sísmico (Zeevaert, 1984; Kramer, 1996).

En el análisis numérico se tuvo en cuenta la variabilidad propia del suelo, reflejada en las curvas de degradación del módulo de rigidez a cortante, la fracción de amortiguamiento crítico y la velocidad de propagación de ondas de corte; con base en la realización de treinta (30) análisis por cada sitio. Para esta condición se definió la variabilidad a partir de la estimación de la desviación estándar

mediante la regla Three-Sigma descrita por Dai y Wang (1992) y Duncan (2000), teniendo como base los resultados reportados por Cano et al. (2002) y el Grupo de Sismología de Medellín (1999 y 2000) para los suelos derivados del Stock de San Diego. En la Figura 8 se presentan los espectros de respuesta obtenidos a partir de la RRS para un amortiguamiento del 5%. En general los espectros promedio de los perfiles de poca profundidad, correspondientes a las perforaciones P1 y P2, conservan una forma similar al espectro en roca, mientras que la forma espectral en superficie del perfil correspondiente a P3 es bien diferente de la forma espectral en roca; por tanto es posible que para los perfiles cortos predomine la señal de excitación y para perfiles más profundos las propiedades del suelo y los contrastes entre materiales.

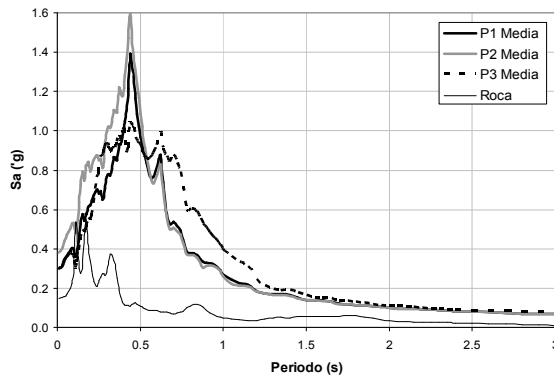


Figura 8. Espectros de respuesta obtenidos a partir de la RRS, para el 5% de amortiguamiento
Figure 8. Response spectral for 5% critical damping ratio, obtained with RRS

Al comparar las formas espectrales obtenidas con la sugerida para la Zona Homogénea 12 de la Microzonificación Sísmica de Medellín (Grupo de Sismología de Medellín, 1999), se puede decir que la forma espectral propuesta por la Microzonificación alcanza a cubrir la variabilidad de la respuesta para el sitio de la perforación P3 (ver Figura 9), mientras que los picos para los períodos fundamentales de vibración de los perfiles P1 y P2 están por fuera de la forma espectral. Es posible que esto se deba a que el espesor de los perfiles de las perforaciones P1 y P2, menor de 15 m,

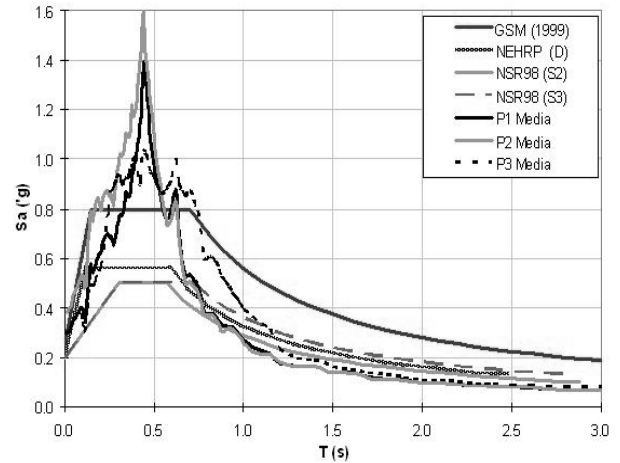


Figura 9. Comparación de las formas espectrales obtenidas con la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (Grupo de Sismología de Medellín, 1999) y la NSR-98
Figure 9. Comparison with Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (Grupo de Sismología de Medellín, 1999) y la NSR-98 spectral forms

está por debajo de los espesores promedio para la Zona Homogénea 12, ya que de Acuerdo con lo reportado por Villarraga (2003), los espesores de suelo para esta zona varían entre 20 m y 40 m, con un promedio de 30.8 m y una desviación estándar de 8.4 m.

7. CONCLUSIONES

Con las pruebas de caracterización de difracción de rayos X, Microscopio Electrónico de Barrido, así como las pruebas convencionales de identificación y descripción visual, se encontró que los suelos estudiados son relativamente jóvenes, puesto que conservan minerales y texturas del material parental.

La inclinación de las curvas de degradación del módulo de rigidez para los saprolitos originados a partir de la meteorización del Stock de San Diego es similar, y parece responder a un valor único para el cuerpo.

El espectro de respuesta propuesto por el Grupo de Sismología de Medellín (1999) para la Zona Homogénea 12 presenta un cubrimiento aceptable de la respuesta máxima esperada en los sitios analizados.

La utilización de los espectros consignados en la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín para la Zona Homogénea 12 debe incluir la comparación del perfil geotécnico y no sólo limitarse a la ubicación en el mapa propuesto.

REFERENCIAS

- [1] BISHOP A.W., ALPAN S., BLIGHT T.E. and DONALD T.B. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. Proceedings of the ASCE Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder Colorado, 1960.
- [2] CANO C., OTÁLVARO I. y SALAZAR I. Clasificación y caracterización de suelos tropicales originados del Stock Gabroico de San Diego [Tesis de Pregrado]. Medellín, Antioquia: Universidad Nacional de Colombia, 2001a.
- [3] CANO C., HINCAPIÉ J. E., OTÁLVARO I. y SALAZAR I. Hacia una Propuesta Metodológica de Clasificación Integral de Suelos Tropicales. Bogotá, XI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, 2001b.
- [4] CANO C., HINCAPIÉ J. E., OSORIO R. I. y OTÁLVARO I. Perfiles sismogeotécnicos en suelos gabroicos y duníticos. Medellín: Universidad EAFIT, 2002.
- [5] DAI, S.-H. and WANG, M.-O. Reliability analysis in engineering applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [6] DUNCAN J.M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126 (4), 2000.
- [7] GRUPO DE SISMOLOGÍA DE MEDELLÍN. Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín. Medellín: Sistema Municipal Para la Prevención y Atención de Desastres, Alcaldía de Medellín, 1999.
- [8] GRUPO DE SISMOLOGÍA DE MEDELLÍN. Microzonificación Sísmica de los Municipios del Valle de Aburrá y Definición de Zonas de Riesgo por Movimientos en Masa e Inundación en el Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2002.
- [9] KRAMER S. L. (1996) Geotechnical earthquake engineering. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [10] MACARI E. and HOYOS L. Influence of in situ factors on dynamic response of piedmont residuals soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122(12), 1996.
- [11] OTÁLVARO I., CANO C., OSORIO R. e HINCAPIÉ J. E. Efecto de la meteorización en las propiedades dinámicas de un suelo gabroico. Medellín: Revista Universidad EAFIT; Vol. 40, No. 133, pp 120-132, 2004.
- [12] ILLARRAGA M. Perfiles de suelo para la aplicación de la microzonificación sísmica del área urbana de la ciudad de Medellín. Medellín: II Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Universidad de Medellín, 2003.
- [13] WOODWARD-CLYDE CONSULTANS Geología Sísmica y Sismicidad del Nordeste de Colombia. Medellín: Informe presentado por William Page a ISA, Interconexión Eléctrica S.A., 1986.
- [14] ZEEVAERT L. Condiciones ambientales en el diseño de la cimentación de edificios. Querétaro (México): Séptima Conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1984.