

Zonificación de suelos en superficie de la ciudad de Tunja, Colombia

John Jairo Guacaneme Berbeo*

RESUMEN

Este artículo presenta la zonificación de suelos en superficie de la ciudad de Tunja, localizada a 135 kilómetros al Norte de Bogotá sobre la cordillera oriental de los Andes. La región esta ubicada en una zona con amenaza sísmica importante, ha registrado daños significativos durante varios eventos sísmicos; la concentración de daños en algunas zonas de la ciudad parecen indicar la presencia de suelos blandos que generan aumento de la señal sísmica; adicionalmente también se ha presentado evidencia de amplificaciones debido a cambio en la topografía. El artículo muestra un análisis de la sismicidad histórica; luego, una descripción detallada de la geología regional y finalmente una zonificación de los suelos en superficie.

Palabras clave: Tunja, Colombia, sismos, geología, suelo, efectos sísmicos locales.

SOIL SUPERFICIAL ZONING IN TUNJA – COLOMBIA

ABSTRACT

This paper presents the zoning of the soils in the city of Tunja, which is located 135 Kilometers North far from Bogotá, over the Andes eastern ranges. The region, that is located in a zone with a significant seismic hazard, has recorded heavy damage during several earthquakes. Concentration of damage in certain zones seems to indicate soft soils, which generates amplification of the seismic signal. Additionally, there has been evidence of topographic amplification due to topographic changes. The article shows an analysis of historic seismicity, then, a detailed description of the regional geology, and finally a soil superficial zoning.

Key Words: Tunja, Colombia, Earthquakes, Geology, Soil, local seismic effects.

* Ingeniero Civil Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C.Colombia. J&G Asociados. Correo electrónico: jjg@internetya.com.co
Fecha de recepción: febrero 1 de 2006.
Fecha de aprobación: marzo 1 de 2006.

INTRODUCCIÓN

Tunja, capital del departamento de Boyacá, fue fundada en 1539; está ubicada en la cordillera oriental colombiana a los 05° 32' 07" de latitud Norte y 73° 22' 04" de longitud oeste, a una altura de 2.775 msnm y presenta una precipitación media anual de 634 mm. Dista de Bogotá 135 km y tiene un área aproximada de 207 km². Según datos del censo de 1993, la población superaba los 100.000 habitantes. El municipio en su mayor parte es montañoso y entre los accidentes orográficos se destacan las cuchillas del Perico, Cazadero y Peñanegra y las lomas de la Sierra y la Cascada. En su territorio nace el río Chulo, el cual lo recorre de Sur a Norte, posteriormente se une con otras corrientes menores y da origen al río Chicamocha; también se destaca el río Teatinos. Por lo accidentado del relieve el municipio presenta el piso térmico frío (140 km²) y piso bioclimático páramo (67 km²). La ciudad está ubicada en una pequeña meseta de la cordillera Oriental perteneciente a la unidad morfológica conocida como altiplano cundiboyacense (IGAC, 1996).

Tunja es el centro donde confluyen todas las vías que se extienden por el territorio boyacense, las que conducen hacia la capital de la república, hacia Santander, Casanare y los departamentos del noroeste de Colombia. La ciudad, en su calidad de capital histórica y cultural, cuenta con numerosos sitios, monumentos y museos de interés arquitectónico, religioso, arqueológico y turístico. Diversos estudios realizados por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS (1984,1998) AIS, *et al.* (1996), muestran que Tunja se encuentra en un área propensa a la actividad sísmica; en la zona se desarrollan varios sistemas de fallas activas. Según datos históricos, en los últimos 500 años la sismicidad de Tunja y su área cercana ha sido destacada. El departamento de Boyacá ha sido epicentro de más

de 15 importantes sismos que se han sentido en Colombia, mientras que en Tunja según diversos catálogos sísmicos se han presentado más de 280 sismos con magnitudes Ms o mb superiores a 2.5 en los últimos 400 años, dentro de los que se destacan los de los años 1785, 1826, 1926, 1923, 1962 y 1967, los cuales causaron graves daños a las edificaciones de la ciudad (Ramírez, 1975).

Los daños que puede ocasionar un evento sísmico en las construcciones y líneas vitales de una ciudad dependen de varios factores: sismológicos, geológicos y locales. En los primeros, la profundidad y magnitud del evento, tipo de fuente sísmica, así como la distancia al sitio de interés, son los que influyen en las características del movimiento que llega al basamento rocoso. En los aspectos geológicos, son las características de las formaciones geológicas las que influyen en los daños. Finalmente, se encuentran los factores locales: tipo de suelo y topografía del terreno, los cuales pueden influir en la respuesta del suelo ante la señal sísmica, los cuales se denominan efectos locales (AFPS, 1995). El objetivo general del estudio fue realizar una caracterización de los suelos en superficie con el fin de contribuir a los estudios de amenaza sísmica local en la ciudad de Tunja.

METODOLOGÍA

El primer paso consistió en la revisión de eventos sísmicos previos ocurridos en el área, se hizo una recopilación de información de interés de los catálogos del Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos en la Región Andina (SISRA), generado por el Centro Regional de Sismología para América de Sur (CERESIS); y los catálogos sísmicos del Preliminary Determination of Epicenters (PDE), disponibles en la página Web del United States Geological Survey (USGS, 2005).

Adicionalmente, se consultaron reportes en periódicos, relacionados con sismología histórica, a fin de determinar los daños causados por los sismos en el área de interés y así ubicar a partir de la localización e intensidad de los daños en el área urbana de Tunja, posibles zonas susceptibles a presentar efectos locales. A continuación se realizó un análisis de la geología, geomorfología y geotecnia de la ciudad a fin de establecer la posibilidad de generación de fenómenos locales inducidos por sismos tales como deslizamientos y licuación, para este fin, y en general para todo el proceso de obtención de información (Guacaneme, 2000, 2001).

ANÁLISIS DE SISMICIDAD

Según datos históricos, en los últimos 500 años se han presentado gran cantidad de sismos en Tunja y su área aledaña. Catálogos sísmicos del SISRA muestran que en Tunja se presentaron 253 temblores entre 1643 y 1981 con magnitudes Ms y mb variables entre 2.0 y 5.5 en lo que se observa un promedio de un sismo cada dos años. Por otra parte, catálogos del Preliminary Determination of Epicenters (PDE) muestran que entre 1973 y 2005 se presentaron en la misma zona 28 sismos con magnitudes Ms y mb que varían de 3.7 a 5.8 con un promedio aproximado de un sismo por año (USGS, 2005). Dentro de los más de 300 sismos reportados para Tunja hasta diciembre de 2005, se destacan en especial cinco que han causado daños a estructuras y que han producido importantes pérdidas.

SISMO DEL 12 DE JULIO DE 1785 - 7:45 A.M.

Según informes históricos este ha sido el mayor y más destructor terremoto que experimentó Bogotá y en general, el virreinato de la Nueva Granada en el siglo XVIII. Abarcó un gran radio de acción, desde Popayán hasta Pamplona causando grandes daños;

en la zona urbana de Tunja se desplomó el edificio de la iglesia y la capilla de Nuestra Señora del Rosario, sin embargo, al ser reportados los daños en otras ciudades afectadas por el sismo se calificaron como menores los sufridos en Tunja (Ramírez, 1975).

SISMO DEL 17 DE JUNIO DE 1826 - 10:30 P.M.

Los daños se extendieron desde Popayán hasta el Norte de Boyacá, viéndose fuertemente afectada Bogotá, donde gran parte de las estructuras sufrieron daños. En Tunja, el sismo ocasionó el daño de la Iglesia del Colegio de Boyacá, se reportaron agrietamientos en el edificio del mismo colegio, en la sede de la Gobernación, en el hospital y en el cuartel militar (Academia Boyacense de Historia, 1962).

SISMO DEL 22 DE DICIEMBRE DE 1923 - 4:55 A.M.

Importante sismo con magnitud Ms de 5.5 que se sintió en toda la parte central de Colombia, ocasionó 7 víctimas mortales, en este evento las poblaciones más afectadas fueron Gachetá y Ubalá ubicadas aproximadamente a 70 kilómetros al noreste de Bogotá. Solamente se presentaron daños leves en algunas estructuras antiguas en la ciudad de Tunja, a pesar de lo fuerte que se sintió según los reportes históricos que mencionan igualmente daños menores a estructuras en Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Caldas y Nariño (Piles, 1924).

SISMO DEL 30 DE JULIO DE 1962

Tuvo origen en el departamento de Caldas y produjo daños importantes a lo largo de la cordillera central y en el valle del Cauca. Las ciudades más afectadas fueron Pereira, Manizales y Sonsón (Ramírez, 1975). Según el diario El Espectador (01/08/1962),

en la ciudad de Tunja se reportaron daños en el edificio Suárez Rondón sede de la Gobernación de Boyacá el cual sufrió principalmente agrietamientos.

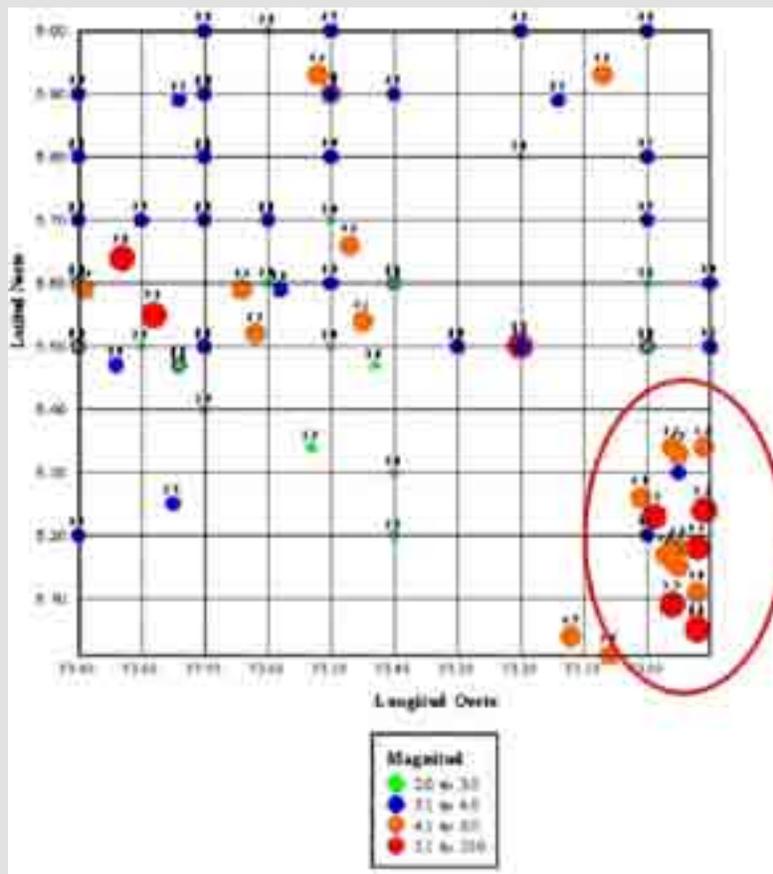
**SISMO DEL 29 DE JULIO
DE 1967 - 5:25 A.M.**

Sismo sentido en toda Colombia, con magnitud epicentral de 6.3 en la escala de Richter; en Betulia, más de un 60% de las casas sufrieron daños. Hubo 20 muertos y más de 150 heridos, víctimas que se presentaron principalmente en las poblaciones vecinas a Bogotá y en Antioquia (Ramírez, 1975). El diario El Espectador (05/08/1967) reportó que en Tunja se presentaron graves daños en la torre de la

Catedral; en la Gobernación, la cual había sido afectada anteriormente por otros dos sismos, en la Catedral y en la sede del Club Boyacá.

En la Figura 1 se ve un área de 100 km por 100 km en cuyo centro esta ubicada Tunja, se observa la ubicación de los sismos con epicentro entre las latitudes 5,1 y 6,1 Norte y las longitudes oeste 72,9 y 73,9; donde se puede ver como se encuentran distribuidos a lo largo y ancho del área de estudio los sismos y dónde se presenta una leve concentración en el área comprendida entre las latitudes 5,1 y 5,4 y las longitudes 72,9 y 73,0 oeste. Se observa un predominio de sismos con magnitud Ms entre 4.1 y 5.0.

FIGURA 1. **DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS SISMOS EN UN ÁREA DE 100 KM² ALREDEDOR DE TUNJA, EXISTE UNA CONCENTRACIÓN DE EVENTOS EN EL SURESTE DE LA REGIÓN (USGS, 2005).**



POSIBLES EVIDENCIAS DE EFECTOS LOCALES

Para estudiar la posibilidad de generación de efectos locales, se analizaron los daños generados por

los sismos de mayor importancia para Tunja, su ubicación y las estructuras que se vieron afectadas. El resumen de las estructuras afectadas se puede ver en la Tabla 1.

TABLA 1. RESUMEN DE DAÑOS GENERADOS POR SISMOS EN TUNJA (GUACANEME 2000, 2001).

Fecha	Estructuras Afectadas	Ubicación		Referencia
		N (m)	E (m)	
Julio 12 de 1785	Catedral	103.550	79.400	Ramírez (1975)
Junio 17 de 1826	Colegio Boyacá	103.520	79.200	Academia Boyacense de Historia (1962)
	Gobernación	103.660	79.350	
	Hospital	103.870	79.850	
	Cuartel Militar	105.000	79.900	
Julio 30 de 1962	Gobernación	103.660	79.350	Ramírez (1975), El Espectador (01/08/1962)
Julio 29 de 1967	Catedral	103.550	79.400	Ramírez (1975), El Espectador (05/08/1967)
	Gobernación	103.660	79.350	
	Club Boyacá	103.800	79.260	

Al ubicar las construcciones que se vieron afectadas en algún grado por estos sismos en un mapa de la ciudad (Figura 2), se puede observar que en la zona central, donde se localizan el Club Boyacá, el edificio de la Gobernación, la Catedral y el colegio Boyacá; algunas de las cuales sufrieron daños en varios de los sismos reportados, posiblemente se presente una importante modificación de la señal sísmica, ya sea por las características mecánicas de las formaciones superficiales del suelo, geometría

de dichas formaciones o configuraciones especiales de suelos.

Una situación análoga se presenta en la zona oriental de la ciudad, donde se localizan el antiguo Hospital de Tunja, hoy facultad de ciencias de la salud de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y los cuarteles militares (Figura 2). En esta zona se presenta un cambio fuerte de topografía, el cual podría causar efectos de amplificación topográfica.

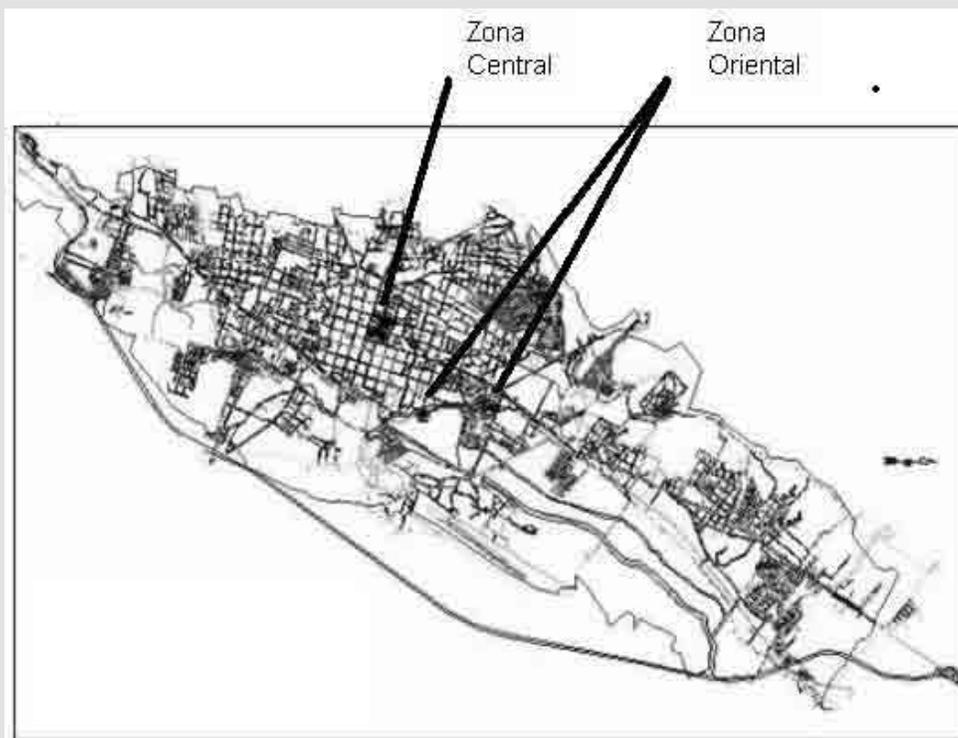
GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

El área de estudio se encuentra ubicada en la cordillera oriental y hace parte de la meseta Cundiboyacense. Las formaciones presentes en la zona hacen parte de la secuencia conformada por rocas de origen sedimentario depositadas durante los períodos cretáceo, terciario y cuaternario; entre las cuales, en desarrollo del presente estudio, fueron identificadas las siguientes formaciones.

GRUPO CHURUVITA (Ksch)

Etayo (1976) llamó grupo Churuvita a un conjunto formado por la formación San Rafael y la formación Churuvita: esta formación la componen arenisca basal de 105 m, alternada hacia la parte media con arcillolitas, arenisca y calizas presentando exogiras u ostreas, lo cual indica un ambiente de depositación marina y un espesor de 75 m. La formación San Rafael se encuentra formada por 60 m de lutitas grises y por 15 m. de pequeñas capas limolítico - silíceas

FIGURA 2. LOCALIZACIÓN DE LOS DAÑOS EN LOS EVENTOS SÍSMICOS DE LA TABLA 1 (GUACANEME 2000, 2001).



FORMACIÓN CONEJO (Kscn)

Sucesión sobre la vía Oicatá Chivatá bordeando el alto del conejo. Esta formación fue datada entre el Cenomaniano Superior, Turoniano y Coniaciano inferior por la presencia de fauna típica de ambien-

te de sedimentación marino. La formación presenta un espesor aproximado de 273 m formado por bancos de areniscas intercaladas con niveles de lutitas gris oscuro a amarillento; en su parte superior, presenta esporádicos estratos de caliza. Regionalmente la formación conejo se encuentra aflorando en el

Puente de Boyacá, abarcando los dos flancos del anticlinal del mismo nombre y hacia el flanco oriental del sinclinal de Tunja sobre el municipio de Oicatá (Ingeominas, 1981).

GRUPO GUADALUPE (Kg)

Data de edad Coniciano-Maestrichtiano, este grupo está compuesto por las formaciones Plaeners, Labor y Tierna. La formación Plaeners presenta un espesor aproximado de 110 m de porcelanitas, chert y esporádicas fosforitas, con una parte intermedia de arcillas y areniscas, con presencia de foraminíferos, vértebras y escamas de peces. Se observa en el sector de Soracá y sobre la vía Tunja-Villa de Leiva (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999).

La formación Labor y Tierna en el sector de Soracá se encuentran conformada por unos 117 m inferiores de lutitas grises oscuras con pequeñas intercalaciones de arenisca y por 50 m superiores de arenisca. El grupo Guadalupe es de origen marino como lo indica la presencia de la fauna típica en toda la sección. Esta formación es componente base del sinclinal de Tunja. (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999).

FORMACIÓN GUADUAS (TKg)

Se denomina formación Guaduas al conjunto de estratos que contienen los mantos de carbón explotables. Se encuentra en forma concordante sobre la formación Guadalupe y esta compuesta en su gran mayoría por arcillolitas carbonáceas, areniscas y arcillas abigarradas, con la presencia de mantos de carbón de diferentes espesores que son económicamente explotables. Su espesor presenta variaciones considerables a lo largo de la región, en algunos

sectores de la cuenca presenta 1200 m de espesor como en Samacá y en sectores como Tunja difícilmente alcanza los 600 m. (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999).

FORMACIÓN CACHO (Tc)

Se presenta como componente básico de los anticlinales de Gachaneca y Puente de Boyacá y los sinclinales de Tunja y Ventaquemada. Por presentar areniscas de buena calidad se ha incrementado su explotación para la obtención de arenas. De acuerdo con Hubach (1957), las areniscas del Cacho constituyen la base de la formación Bogotá conformadas por areniscas cuarzosas de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio en la parte superior de la secuencia y arena gruesa en los niveles inferiores. Presenta algunos niveles conglomeráticos de grano redondeado a subredondeado, con matriz arcillosa y cemento ferruginoso; es muy frecuente la estratificación cruzada y marcas de corriente en los niveles superiores. En la parte media existen horizontes arcillolíticos grises y blancos con estratificación fina a delgada y niveles alterados de color rojo a rosado. La base de las areniscas marca el techo de la formación Guaduas (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999).

Al nivel inferior conformado por areniscas se le ha dado un espesor total de 66,2 m, al nivel medio arcillolítico un espesor total de 75 m y al conjunto superior conformado por areniscas un espesor total de 76 m, para un espesor total de la formación de 217 m (Agudelo y Castro, 1999). La formación Cacho fue datada del Paleoceno por Van Der Hammen (1958). Esta formación se encuentra aflorando en gran parte de la zona de estudio, ya que comprende los dos flancos de la estructura sinclinal presente.

FORMACIÓN BOGOTÁ (Tb1, Tb2)

Esta formación se compone de una sucesión monótona de arcillolita abigarrada de colores gris, violeta y rojo en forma de bancos, separados por niveles de areniscas arcillosas blancas a amarillas. Aflora en ambos flancos del sinclinal de Tunja y Ventaquemada y también en algunas zonas del anticlinal de Puente de Boyacá. Según Van Der Hammen (1958), ha sido datada del paleoceno superior y eoceno inferior, presenta concordancia con las areniscas de la formación Cacho y hacia el techo yace en discordancia con la formación Tilatá.

En la zona de estudio afloran en un área bastante extensa rocas de esta formación distribuyéndose ampliamente en ambos flancos de la estructura, constituyendo una de las unidades sobre la cual se han desarrollado profundas y extensas cárcavas. Esta formación se divide en cuatro conjuntos litológicos de los cuales el cuarto o superior es el que no aflora en toda su potencia (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999).

El conjunto inferior se compone en su parte basal, de areniscas arcillosas variocoloreadas, sobre las que yacen unas areniscas compactas y cuarzosas de grano fino; presenta ocasionales alternancias de arcillolitas grises. Sobre las anteriores, se encuentran unas arcillolitas grises y amarillas con un banco de arenisca gris blancuzco de grano grueso y matriz caolinítica, friable, la cual se encuentra hacia el techo en contacto con una arenisca gris clara de grano fino y matriz caolinítica. Suprayaciendo se presentan unas arcillolitas grises con delgadas alternancias de areniscas amarillentas (Agudelo y Castro, 1999).

Seguidamente, se presenta un banco de 8 m de espesor constituido por una arenisca de color gris de

grano fino, cuarzosa, con muscovita y biotita dispuestas en formas de lentes, lo cual le imprime un bandeamiento oscuro no continuo. Reposando sobre estas se observan unas arcillolitas amarillas y habanas con alternancias de limolitas amarillas. La parte más superior de este conjunto la conforman unas areniscas grises de grano fino de 12 m de espesor constituidas por ortoclasa, cuarzo y biotita. El espesor aproximado de este conjunto es de 130 m. El conjunto medio en el área se encuentra totalmente cubierto por depósitos coluviales y fluviolacustres. En el conjunto superior constituido en su gran mayoría por arcillolitas rojizas y grises, se observa hacia la base, una arenisca gris rojiza con manchas verdosas, de grano fino, alto contenido de óxidos y compacta, sobre esta reposan unas arcillolitas rojas con ocasionales alternancias de arcillolitas amarillas y blancas. Hacia la parte media se observa una arenisca amarilla rojiza de grano fino a muy fino. El espesor medio de este conjunto es de 117 m (Agudelo y Castro, 1999).

FORMACIÓN TILATÁ (Tst)

Se da el nombre de Tilatá a una formación que se encuentra en capas horizontales entre Tilatá y la represa del Sisga, formada alternativamente de gredas, capas arenosas y cascajos con unos 150 m de espesor visible. Presenta materiales horizontales homogéneos. A lo largo del sinclinal de Tunja, Oicatá, Paipa se observa un conjunto grueso arcilloso – arenoso, que forma una terraza de unos 150 m, aproximadamente conformada por arenas y limos de color variable entre amarillo y rojizo, con intercalaciones conglomeráticas y frecuente estratificación cruzada (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999). Esta formación aflora en los bordes del valle central extendiéndose preferentemente en una dirección NE-SW, exhibiendo geomorfológicamente pequeñas colinas sobre parte de los flancos del sin-

clinal, principalmente en el oriental. Al oriente del campamento de Caminos Vecinales (barrio Los Patriotas) se aprecian capas de arenas de litificación incipiente, blancas, de grano medio a fino, cuarzosas, con matriz arcillosa y ocasionales niveles de gravas, subyaciendo a una sucesión de arcillas blancas, grises y verdosas. El borde oriental de la pista de aterrizaje «Gustavo Rojas Pinilla» de la ciudad de Tunja, esta conformada por arcillas blancas y grises, subhorizontales y compactas; el lado occidental de la pista lo conforma una sucesión de arenas y arcillas variocoloreadas, todo este sector se halla fuertemente afectado por procesos erosivos proporcionando una morfología característica de cárcavas profundas y amplias. La formación posee en el área de estudio un espesor aproximado de 72 m y yace discordante sobre la formación Bogotá (Agudelo y Castro, 1999).

DEPÓSITOS COLUVIALES (Qc)

En la zona de estudio se localizan especialmente hacia la parte baja y media del flanco occidental de la estructura, cerca de los barrios Muiscas y Asís, cubriendo buena parte de las laderas, estos depósitos se formaron a partir de los bloques de areniscas desprendidos de los niveles de roca competente (formación Cacho y algunos niveles de la formación Bogotá principalmente) y el material removido de las formaciones no competentes (parte de la formación Bogotá); también es posible observarlos cerca de la base de los escarpes producidos por la formación Cacho o aledaños al trazado de fallas que han debilitado buena parte de los materiales, como es el caso del depósito coluvial presente al noroccidente del barrio La María y Sur de la hacienda San Ricardo. Este tipo de depósito básicamente se compone de fragmentos heterométricos esencialmente areniscas, son de formas angulares a subangulares y su distribución es errática; en el área, no presentan espesores superiores a los 20 m. La matriz en que

se hallan embebidos es generalmente arcillosa y limoarenosa; no obstante muchos de estos bloques se hallan en superficie reposando sobre asomos de unidades litológicas consolidadas (Agudelo y Castro, 1999).

DEPÓSITO LACUSTRE (Qd)

Se trata de una unidad arcillosa con tierra de diatomeas. Según Reyes (1990) son depósitos típicos lacustres con intercalaciones de diatomitas, tal como se presentan en Tunja, y pueden ser contemporáneos con capas similares existentes en la sabana de Bogotá, datados del pleistoceno superior. Existe una transición gradual entre arcillas y diatomitas, en la parte inferior predominan arcillas y en la parte superior se presentan diatomitas con delgadas intercalaciones de arcillas. Esta formación yace discordante sobre las formaciones Tilatá, Bogotá y Cacho. En la zona de estudio esta unidad se encuentra localizada en el sector Suroriental, en ambos costados del flanco oriental de la estructura presente. Esta constituida por una sucesión de arcillas plásticas, grisáceas y blancuzcas, con intercalaciones de diatomitas que van desde los 0,1 a 9,0 m de espesor, presentándose ligeramente inclinadas hacia el oriente, dando la apariencia de encontrarse estratificadas. Dicha formación tiene un espesor aproximado de 50 m, yace discordantemente sobre la formación Tilatá y sobre las formaciones Bogotá, Cacho y Guaduas (Agudelo y Castro, 1999).

DEPÓSITO FLUVIO-LACUSTRE (QAc)

Se encuentra formando los valles de los ríos Chulo y La Cascada. Presenta una morfología de relieve suave a plano; son depósitos no consolidados y su composición varía lateralmente, así como la granulometría de sus elementos; situación que refleja la frecuente variación de la intensidad de las corrientes hídricas que los depositaron. Sobre el eje

del sinclinal su espesor alcanza unos 37 m; los materiales que lo componen están constituidos por intercalaciones de arena y arcilla de color carmelita y con oxidaciones rojizas, lo que sugiere la alternancia de episodios lacustres y fluviales en su formación. Estos depósitos reposan discordantemente sobre la formación Tilatá ocupando los paleocauces definidos por el relieve post-erosivo, esto significa que la fase fluvio-lacustre es netamente posterior a la sedimentación de la formación Tilatá, es decir del pleistoceno superior (Agudelo y Castro, 1999).

DEPÓSITO ALUVIAL (QAL)

Hacia el flanco occidental del sinclinal, en el sector noroccidental de la ciudad se localiza un cono aluvial que forma el valle de la quebrada La Vega, la cual sirvió como medio de transporte. Está constituido por grava, gránulos de arenisca blanca de grano fino con una matriz arcillosa, *chert*, arcilla amarilla, arena arcillosa de grano fino a medio, fragmentos de arena roja y amarilla; sobre la parte más superior presenta una intercalación de limos, arcillas y arenas. El material ubicado sobre los márgenes del lecho del río la Vega en el sector de Puente Restrepo, al occidente del barrio La María, se halla retrabajado, es por esta razón que su orientación no es representativa de las paleocorrientes. Este conjunto tiene un espesor variable, alcanzando los 83 m en la parte más profunda hasta ahora conocida, determinado en diferentes perforaciones de pozos para agua realizados en la ciudad (Agudelo y Castro, 1999).

ESTRUCTURAS TECTÓNICAS

Según el Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas) (1981), Ramírez (1990), Agudelo y Castro (1999), las principales estructuras que presenta la zona son:

Sinclinal de Tunja. Es una amplia estructura de dirección SW-NE, que comienza al Sur de Tunja, abarca gran parte de la zona de estudio y termina en la localidad de El Manzano, probablemente contra la falla de Boyacá. La tectónica que afecta el sector, está ligada al tipo de esfuerzo ya sea de compresión o de tensión que afectaron la cordillera Oriental, presentando plegamientos y fallas con dirección SW-NE y transversales. Limitado por el oriente por la falla de Chivata. Esta estructura se encuentra afectada por fallas que han dislocado sus flancos, incrementando o disminuyendo sus buzamientos, afectando las rocas aflorantes en diferentes sectores del mismo.

Sinclinal de Ventaquemada - Tunja. También conocido con el nombre de sinclinal de Albarracín, va desde la población de Suesca hasta la zona occidental de Tunja. Presenta una estructura asimétrica con una dirección SW-NE y se encuentra afectado por fallas transversales que desplazan su eje e incrementan o disminuyen los buzamientos.

Anticlinal del Consumidero. Estructura asimétrica conformada por el flanco oriental del sinclinal de Lenguazaque y el flanco occidental del sinclinal de Ventaquemada, presenta una dirección predominante SW-NE.

Anticlinal de Puente Hamaca. Ubicado sobre el flanco oriental del sinclinal de Tunja. Es una estructura local de pequeña longitud y de fácil reconocimiento por la cercanía al batallón en la vereda de Pírgua.

Anticlinal de Puente de Boyacá. Es una estructura regional pasando por el Puente de Boyacá hasta el occidente de Tunja con una dirección SW-NE, su eje pasa por el filo de las areniscas de labor y tierna.

FALLAS GEOLÓGICAS

La zona de estudio se encuentra afectada por fallas cuya descripción y caracterización se presenta a continuación:

Falla Tras el Alto. Es una falla inversa, cuyo trazado pasa cerca del borde occidental de la zona y es esencialmente paralela al rumbo de las formaciones litológicas que afecta, su alineamiento corresponde exactamente con un contacto fallado entre la formación Guaduas y la formación Cacho, en una longitud aproximada de 9,5 Km. Afecta el flanco occidental del sinclinal de Tunja y se halla a su vez cortada o dislocada por fallas transversales de carácter local con desplazamientos menores de 140 m, a excepción de la falla central o de Tunja, originadas durante eventos tectónicos posteriores. Tiene un rumbo medio de N36°E y un buzamiento de 65° a 1 NW. El desplazamiento generado sobre las formaciones afectadas no es uniforme, ya que se observa un movimiento diferencial (en forma de tijera), por las diferentes litologías que pone en contacto en diferentes partes de su trazado, pero que puede indicarse desde el punto de vista práctico no inferior a 180 m (Agudelo y Castro, 1999).

Falla El Asís. Es una falla de desplazamiento de rumbo, ligeramente ortogonal al de la falla anterior, afecta rocas de la formación Bogotá, y su extensión dentro de la zona de estudio es de tan solo 450 m en el extremo Norte de la ciudad. A esta falla se le atribuye parte de la complejidad tectónica que presenta el flanco occidental del sinclinal en este sector, afectando la zona aledaña al Norte del barrio Asís y el oeste del barrio los Muiscas; sectores que se hallan sobre el bloque hundido. Evidencias adi-

cionales sobre la existencia de esta falla se encontraron en una perforación realizada en este sector, la cual resultó no productora de agua (Agudelo y Castro, 1999).

Falla de Tunja o Central. Es una falla de rumbo, su alineamiento posee una dirección N31°W, cortando ambos flancos del sinclinal de Tunja en forma transversal a la orientación de este. Su desplazamiento direccional corta y desplaza los flancos en una distancia aproximada de 500 m, aunque su efecto es menos notorio en el flanco oriental. La falla se encuentra cubierta por depósitos no consolidados y es probablemente la responsable de facilitar la apertura de la brecha que comunica dos microcuencas (Agudelo y Castro, 1999).

GEOTECNIA

La información geotécnica presentada en este documento fue obtenida a partir del análisis de la zonificación efectuada por Ramírez (1990). Adicionalmente, para dar consideración a los diferentes fenómenos de inestabilidad que se pueden presentar, se tuvieron en cuenta dos grandes zonas: la zona Montañosa (M) y la zona Plana (P). En la zona Montañosa, se evalúa la susceptibilidad de los materiales al deslizamiento; en la zona Plana se califica la aptitud de los materiales para soportar las fundaciones de las estructuras. Cada zona se dividió en tantas subzonas como fue necesario, de acuerdo con las características geotécnicas previstas para los materiales presentes. Los materiales se clasifican como IM, IIM, IIIM, IVM ó IP, IIP, IIIP, IVP de más competentes a menos competentes, el resumen de dicha información se puede observar en las tablas 2 Y 3.

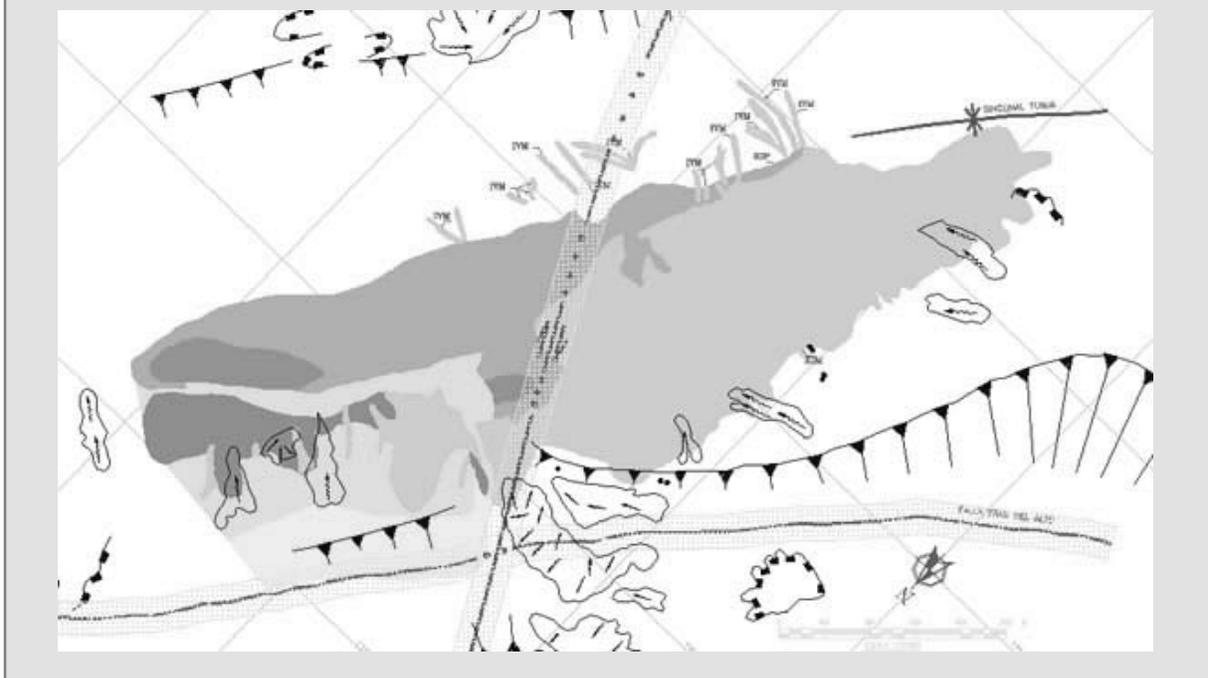
**TABLA 2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA EN LA ZONA MONTAÑOSA
(ALFARO ET AL., 2000; GUACANEME, 2000)**

SUBZONA	DESCRIPCIÓN	SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTO
IM – Roca arenisca de la formación Cacho.	De capacidad portante alta y estable.	Estable
IIM - Suelos residuales de la formación Bogotá.	Arcillolitas plásticas que pueden ser expansivas. Se presentan áreas erosionadas con carcavamientos y surcos activos.	Baja
IIIM - Suelos de consistencia alta a moderada.	Taludes potencialmente inestables.	Moderada
IVM - Suelos de consistencia blanda o de baja compacidad.	Taludes inestables.	Alta

TABLA 3. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA EN LA ZONA PLANA (ALFARO ET AL., 2000; GUACANEME, 2000).

SUBZONA	DESCRIPCIÓN	CAPACIDAD PORTANTE
IP	Suelos de capacidad portante moderada y de gran espesor.	Moderada
IIP	Depósitos del cuaternario: arcillas arenosas con bloques de arenisca; con espesor variable, alcanzando 83 m en la parte más profunda.	Baja
IIIP	Suelos de capacidad portante baja, algo expansivos, con mal drenaje y subestrato profundo.	Baja
IVP	Suelos de baja capacidad portante, muy expansivos, con mal drenaje, subestrato profundo e inundable.	Baja

FIGURA 4. ZONIFICACIÓN DE SUELOS EN SUPERFICIE DE LA CIUDAD DE TUNJA, COLOMBIA (GUACANEME, 2001).



DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se pueden describir de manera clara algunos de los aspectos de susceptibilidad que presenta el área urbana de Tunja. La ubicación se puede observar en la Figura 4 donde se ilustra la Zonificación de Suelos en Superficie de la Ciudad de Tunja. Predominio de depósitos de ladera de formas angostas y continuas, en suelos de muy baja capacidad portante, muy expansivos, con mal drenaje, substrato profundo e inundables; localizados en la zona central de la ciudad, con susceptibilidad alta por su caracterización geotécnica, donde se presenta densa concentración de viviendas y estructuras y en muchos casos rellenos artificiales. Por el valle del río Chulo transcurre el eje de la estructura del sinclinal de Tunja, el cual en su sector central se presenta desplazado por una falla transversal, con movimiento de rumbo y orientación NNW. Presencia de escarpes estructurales continuos y profundos localizados en los bordes oriental y occi-

dental de la ciudad; el occidental es definido por la falla Tras el Alto. En muchos casos, se asocian a estos escarpes desprendimientos de material y cicatrices de deslizamiento. Abundante conformación de zonas erosionadas, con desarrollo de «*Bad Lands*», localizadas en los alrededores del aeropuerto (Jaramillo *et al.*, 2000).

Concentración de posibles puntos de amplificación topográfica en los bordes del escarpe estructural que se localiza a lo largo del borde occidental de la ciudad de Tunja. Concentración de eventos previos en el sector central de la ciudad, ubicado sobre taludes potencialmente inestables con suelos de capacidad portante alta a moderada, de susceptibilidad alta por su caracterización geotécnica.

En la zona oriental de la ciudad, donde se localizan el antiguo hospital, actual sede de la Facultad de Medicina de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y los cuarteles militares, se pre-

senta un cambio fuerte de topografía por la presencia del río Chulo, que puede estar causando efectos de amplificación topográfica dada la concentración en esta zona de eventos previos. Se observa un gran número de cárcavas en el área urbana, distribuidas por toda la ciudad, las cuales presentan tamaños relativamente grandes y compuestas por materiales que generan una preocupante susceptibilidad a fenómenos inducidos por sismos. Se presenta la amenaza generada por la presencia en aumento de rellenos antrópicos distribuidos por la ciudad, los cuales no solo preocupan por su presencia sino por el hecho de que sobre estos se ha construido. Se presenta un caso a tener en consideración y es el del actual hospital, que se encuentra ubicado en una zona aledaña a uno de los rellenos antrópicos distribuidos por la ciudad. Una zona de susceptibilidad por fallamiento bastante amplia, que atraviesa la ciudad casi simétricamente en sentido occidente-orientado, en la cual, además de estar construidas líneas vitales y zonas residenciales, se encuentran edificaciones como colegios, el estadio Independencia, el coliseo y una estación de policía.

Se presentan varias áreas erosionadas con cárcavamiento y surcos activos en zonas de expansión a corto plazo en la parte occidental de la ciudad.

Una importante zona de desprendimiento de material en un área residencial al Sur de la ciudad. Los problemas geotécnicos se consideran controlables siendo estos los de mayor extensión en el perímetro urbano de la ciudad. La estabilización de taludes identificados como de alta susceptibilidad debe obedecer a un estudio más detallado y a un seguimiento y monitoreo de los mismos, el cual debería iniciarse de la forma más rápida posible.

Debido a que gran parte de la información empleada para este estudio fue obtenida a partir de fotointerpretación, se recomienda que todos los aspectos tratados tengan una verificación en el campo para establecer su grado de exactitud. El estudio realizado debe tomarse como información general para la realización de estudios de suelos en cada sector y como medio para la prevención de problemas en el desarrollo futuro de la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo financiado parcialmente por Consultoría Colombiana S.A. y por el Instituto Geofísico Universidad Javeriana. Se agradece a los Ingenieros Guillermo Pabón y Oscar Ramírez por la revisión y comentarios que hicieron al estudio.

BIBLIOGRAFÍA

Academia Boyacense de Historia. *Repertorio Boyacense*. Tunja, 1962.

AFPS-Association Française du Génie Parasismique *Guidelines for Seismic Microzonation Studies. Delegation of Major Risks of the French Ministry of the Environment*. Paris, 1995.

Agudelo, A. y Castro, M. *Estudio de Vulnerabilidad de Tunja*. Tunja: UPTC, 1999.

Alfaro, A.; et al. *Microzonificación Sísmica Preliminar de Tunja. Memoria Técnica*. Bogotá: Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana, 2000.

Ariza, M. y Barrera, N. *Inventario de Zonas Subnormales*. Tunja, 1996.

Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja. *Diagnóstico Dimensional Ambiental*. Tunja: Plan de Ordenamiento Territorial 1999.

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS; Ingeominas y Universidad de los Andes. *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia*. Bogotá, 1996.
- - -. *Estudio General de Riesgo Sísmico en Colombia*. Bogotá, 1984.
- Etayo, F. «Contorno Sucesivo del Mar Cretáceo en Colombia». *Memorias del Congreso Colombiano de Geología 1*. Bogotá, 1976.
- Guacaneme, J. *Microzonificación Sísmica Preliminar de Tunja*. Trabajo de Grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2000.
- - -. «Zonificación Morfodinámica de la Ciudad de Tunja». *Memorias XI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana y IV Foro Sobre Geotecnia de la Sabana de Bogotá*. Bogotá, 2001.
- Hubach, E. «Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y sus Alrededores». *Boletín Geológico 5 2*. Bogotá, 1957.
- Instituto de Geología y Minería Ingeominas. *Geología del Cuadrángulo J-12 Tunja*. Informe 1546, 18 p, *Boletín Geológico 24 2*, Bogotá, 1981.
- IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. *Plano Urbano de la Ciudad de Tunja. Escala 1:10000*. Bogotá, 1979.
- - -. *Estudio General de Suelos Altiplano Tunja – Sogamoso*. Bogotá, 1981.
- - -. *Diccionario Geográfico de Colombia*. Bogotá: Subdirección de Investigaciones y Divulgación Geográfica. CD Rom, 1996.
- Jaramillo, M.; Pabón, G. Ramírez, O. y Guacaneme, J. Amenazas Sísmicas y Geotécnicas en Tunja. *Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia*. Bogotá, 2000.
- Ramírez, J. *Historia de los Terremotos en Colombia*. Bogotá: IGAC, 1975.
- Ramírez, O. *Zonificación Geotécnica de Tunja*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1990.
- Reyes I. «Observaciones sobre el Cuaternario del Altiplano Tunja – Sogamoso». *Geología Colombiana 18*. Bogotá, 1990.
- Ujueta, L. «Lineamientos Muzo, Tunja y Paipa en los Departamentos de Boyacá y Casanare, Colombia». *Geología Colombiana 22*. Bogotá, 1993.
- USGS - United States Geological Survey. URL: <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html> [2005].
- Van Der Hammen, T. «Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y Tecnogénesis de los Andes Colombianos». *Boletín Geológico VI*. Bogotá, 1958.