

Metodología para la respuesta dinámica del subsuelo en la Microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja

Methodology for the dynamic subsoil response in the seismic microzonation of Tunja city

Edgar Eduardo Rodríguez Granados *
Miguel Ángel Sánchez Salinas **
Carlos Javier Sainea Vargas ***

Resumen

De acuerdo con los requerimientos de la NSR-10, la ciudad de Tunja requiere del estudio de microzonificación sísmica. Para avanzar en este propósito el presente documento incluye el marco metodológico para la ejecución del estudio de respuesta dinámica del subsuelo para el área urbana de Tunja, la cual se localiza en el altiplano Cundi-Boyacense de Colombia, donde las condiciones tectónicas generan una sismicidad apreciable.

En el documento se presentan los aspectos generales de geología, tectónica, sismicidad y geotecnia del área del proyecto, se describen conclusiones relevantes de estudios previos orientados hacia la evaluación preliminar de respuesta dinámica, y finalmente se detalla la metodología propuesta para el estudio de respuesta dinámica de la ciudad.

Palabras claves: Respuesta dinámica, sismicidad, fallas geológicas, geología, tectónica, amenaza sísmica.

Abstract

According to the requirements of the NSR-10, Tunja City requires the seismic microzonation study. This document includes the recommendation of a methodological framework for the implementation of dynamic response study of Tunja urban area. The project area is located in the Cundi-Boyacense highlands of Colombia, which presents a special tectonic condition that generate significant seismicity.

The paper presents the general aspects of geology, tectonics, seismicity and geotechnical engineering of the project area, are described relevant findings of previous studies oriented preliminary to evaluate the dynamic response and finally, details the methodology proposed for the study of dynamic subsoil response of the Tunja city.

Keywords: Dynamic response, seismicity, geological faults, geology, tectonics, seismic hazard.

* Ingeniero Civil, M.Sc. Geotecnia U. Nacional, Esp. Ing. Sísmica y Dinámica Estructural U. Politécnica de Cataluña, Prof. Asistente de la U. Nacional de Colombia y Esc. Col. de Ingeniería, Gerente de Ingeniería y Geotecnias IGR SAS.

** Ingeniero Civil U. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Estudiante Maestría Geotecnia UPTC, Jefe de Proyectos y Geotecnista de Ingeniería y Geotecnias IGR SAS.

*** Ingeniero Civil U. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, M.Sc. Geotecnia U. Nacional de Colombia, Prof. UPTC.

I. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Tunja con más de 170000 habitantes (DANE-2013), está localizada en el altiplano Cundi-Boyacence, formado por el levantamiento de los Andes colombianos debido la colisión simultánea de las placas Nazca, Suramericana y Caribe. Este fenómeno ha originado los sistemas de fallas características de Colombia con orientación preferencial noreste-suroeste con actividad sísmica importante y el plegamiento de rocas con orientación similar.

Desde el punto de vista sísmico la ciudad está ubicada en una zona de amenaza sísmica intermedia con valores de $A_a = 0.2g$ y $A_v = 0.2g$, con la influencia significativa de los sistemas de fallas del tramo sur de la falla Bucaramanga-Santa Marta y del tramo central de la falla Frontal de la Cordillera Oriental, con magnitudes M_w de 6.9 y 8.0 respectivamente, AIS, 2009 [1].

Estructuralmente el área urbana de la ciudad se encuentra en el denominado sinclinal de Tunja, el cual formó una cuenca de sedimentación de origen aluvial y fluviolacustre de forma alargada con orientación suroeste-noreste, cuyo ancho varía desde menos de 100m hasta cerca de 1km y con profundidad de unos pocos metros hasta 30 m aprox. Este depósito está formado por capas de suelos finos predominantemente, de plasticidad alta, consistencia blanda y alta compresibilidad, con intercalaciones de arenas en algunos casos licuables, Ramírez et al, 2002 [2].

La situación anterior ha resultado en una condición crítica para el diseño sismo-geotécnico en la ciudad dado que el perfil de suelo definido para varios proyectos de importancia clasifica como F, de acuerdo con la norma de construcciones sismo-resistentes NSR-10, para el cual es necesario la ejecución de estudios de respuesta sísmica local.

Otro aspecto importante es la condición topográfica de los flancos del sinclinal con presencia de escarpes, laderas fuertemente inclinadas y cambios abruptos de pendiente, además de su alto grado de carcavamiento y presencia de rellenos antrópicos heterogéneos, lo cual desde el punto de vista sísmico puede resultar crítico por la amplificación de las ondas sísmicas debida a efectos topográficos, Instituto Geofísico Universidad Javeriana [3].

Por las condiciones anteriores es importante la ejecución de estudios de respuesta dinámica que permitan cuantificar los valores de aceleración del terreno, factores de amplificación, y espectros de respuesta y de diseño sísmico para lograr definir la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja.

En este artículo se presenta un resumen de los resultados preliminares obtenidos en varios estudios tendientes a plantear áreas de respuesta dinámica homogénea así como las conclusiones y recomendaciones emitidas.

Finalmente, con base en la revisión de tales estudios se recomienda el marco metodológico a seguir para realizar el estudio de respuesta dinámica de la ciudad que permita llegar a un modelo racional de microzonificación sísmica a la luz de la práctica actual de la ingeniería sísmica y la dinámica de suelos.

II. CONCEPTUALIZACIÓN

La evaluación de la respuesta dinámica del subsuelo forma parte fundamental de los proyectos de Microzonificación sísmica de áreas de interés que son amenazadas por actividad sísmica. En general se parte de la evaluación de amenaza sísmica para definir señales (acelerogramas) para diseño a nivel de roca; sin embargo, gran parte de los proyectos de ingeniería y las ciudades se localizan sobre depósitos recientes cuyas propiedades mecánicas son muy inferiores a las de la roca subyacente. El estudio del comportamiento o respuesta de estos depósitos ante las señales sísmicas de diseño a nivel de roca, es lo que se denomina evaluación de respuesta dinámica del subsuelo y permite establecer zonas de comportamiento homogéneo, con parámetros de diseño sismo-resistente compatibles con las características de cada depósito.

Para realizar los estudios de respuesta dinámica o respuesta sísmica, se han desarrollado herramientas de cálculo que tienen en cuenta las características del sismo en términos de aceleración, velocidad, desplazamiento, duración y contenidos de frecuencias, las condiciones geométricas del subsuelo (suelo y roca), las propiedades geodinámicas de los materiales, y mediante la aplicación de modelos constitutivos permiten representar el comportamiento del suelo ante cargas cíclicas.

De acuerdo con Kramer 1996 [4], una evaluación de respuesta dinámica se puede realizar con modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales dependiendo de la condición geométrica del modelo de análisis.

Los estudios con modelos unidimensionales (1D) asumen que las fronteras de las capas de los depósitos de suelos son horizontales y que la respuesta del suelo es predominantemente causada por la propagación vertical de las ondas de corte provenientes desde el lecho rocoso subyacente. Adicionalmente, se asume que las capas de suelo y el lecho rocoso se extienden infinitamente en la dirección horizontal. Figura 1.

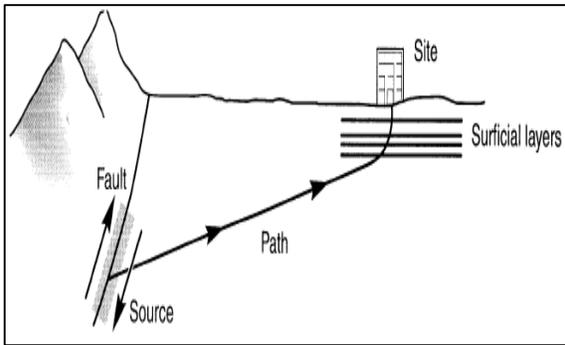


Figura 1. Proceso de refracción que produce propagación de ondas verticales cerca a la superficie, Modelo 1D.

Fuente: KRAMER, S. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall (1996)

En los modelos de respuesta es necesario tener en cuenta la definición de los registros de movimiento del terreno. El movimiento (registro) en la superficie del depósito de suelo es denominado movimiento en la superficie libre, El movimiento en la base del depósito de suelo o sobre el lecho rocoso se denomina registro del lecho de roca y el movimiento registrado en la roca expuesta en la superficie es llamado registro en afloramiento de roca. Figura 2

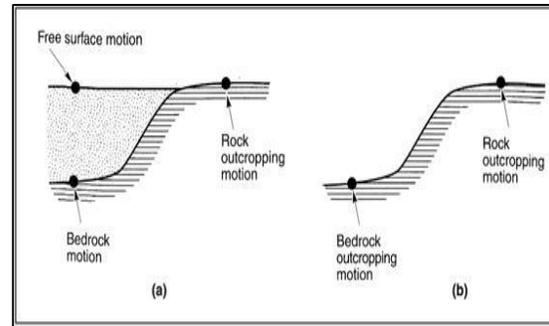


Figura 2. Nomenclatura de respuesta de sitio
Fuente: KRAMER, S. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall (1996).

Los análisis de respuesta sísmica implementados en los modelos 1D pueden ser lineales mediante el uso de funciones de transferencia, lineales equivalentes aproximados de respuesta no lineal, y de análisis no lineales completos, cada uno de los cuales utiliza procedimientos numéricos diferentes.

Los modelos de respuesta bidimensionales (2D), se han desarrollado principalmente para condiciones de deformación plana, en los cuales se presentan variaciones laterales en la geometría y rigidez de los depósitos de suelos encontrados, que no pueden ser representados por modelos 1D. Su aplicación principal está dada para estructuras de contención, presas, túneles, laderas naturales en los cuales hay uniformidad semi-infinita en el sentido longitudinal, Figura 3. Los métodos análisis de respuesta dinámica bidimensional se han desarrollado tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo y las técnicas más usadas corresponden con elementos finitos y diferencias finitas, los cuales pueden usar modelos constitutivos lineales equivalentes y no lineales.

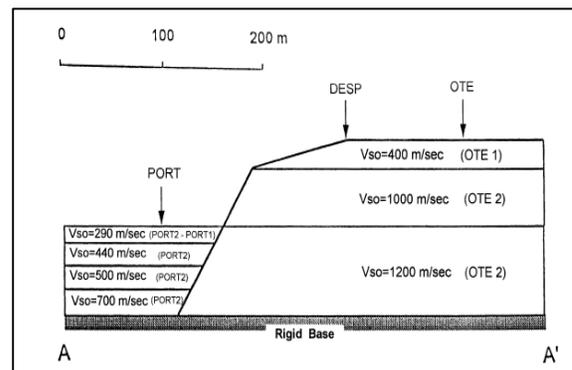


Figura 3. Modelo geodinámico típico para análisis bidimensional

Fuente: ATHANASOPOULOS G.A. et al, Effects of surface topography on seismic ground response in the Egeion (Greece) 15 June 1995 earthquake,

Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18 (1999). [5].

Los modelos tridimensionales (3D) se usan con frecuencia para la solución de problemas de respuesta dinámica e interacción suelo-estructura cuando no es confiable la aplicación de modelos 2D. Su aplicación se realiza con análisis numérico de elementos finitos y diferencias finitas, principalmente, con modelos lineales equivalentes y no lineales, Figura 4.

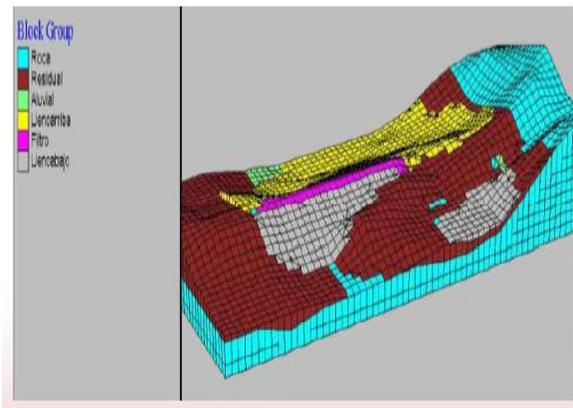


Figura 4. Modelo tridimensional para el análisis de respuesta dinámica.

Fuente: RODRIGUEZ E, Estudios de amenaza y respuesta sísmica local, Seminario Internacional Gestión Integral de Riesgo Sísmico, Bogotá 2010 [6]

III. GENERALIDADES

A continuación se presenta una breve descripción de la localización y aspectos geológicos y tectónicos generales de la ciudad de Tunja.

A. General

La ciudad de Tunja se ubica sobre la cordillera Oriental de Colombia, en la parte central del Departamento de Boyacá, localizada a $05^{\circ}32'7''$ de latitud norte y $73^{\circ}22'04''$ de longitud oeste, con alturas que van desde los 2.700 m.s.n.m. hasta 3.150 m.s.n.m. en la parte más elevada, con una extensión de 121.4 Km², y una temperatura de 13°C. Limita por el norte con los municipios de Motavita y Cóbbita, al oriente con los municipios de Oicatá, Chivatá, Soracá y Boyacá, por el sur con Ventaquemada y por el occidente con los municipios de Samacá, Cucaita y Sora. Figura 5.

B. Geología general.

Geológicamente se localiza en la parte axial de la Cordillera Oriental, sobre la unidad morfológica conocida como altiplano cundiboyacense donde se encuentra el Sinclinorio de Tunja, limitado al Oeste por el Anticlinal de Arcabuco y la Falla de Boyacá (rocas Triásico-Jurásicas y del Cretáceo Inferior), López A. y Arias M. 2007 [7].

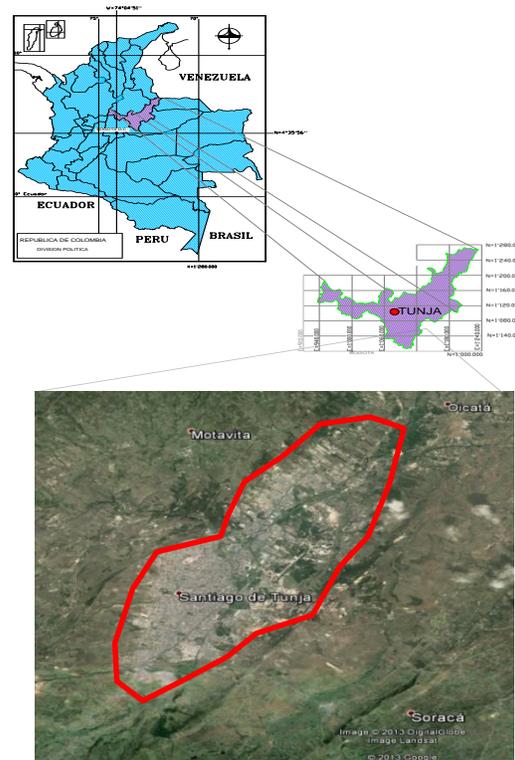


Figura 5. Localización de la ciudad de Tunja

A continuación se presenta un resumen de las principales características de la estratigrafía, geología estructural y geomorfología de la ciudad de Tunja, tomada de Cáceres 1999 [8]

1) Estratigrafía

En Tunja predominan las rocas sedimentarias que van desde el Cretáceo superior, de origen costero, hasta depósitos recientes de origen fluvioacustre del cuaternario. La estratigrafía está compuesta así, en orden desde la formación más antigua hasta la más reciente.

Formación Guaduas (Ktg). Formación constituida por estratos sedimentarios, una sucesión monótona de arcillolitas pizarrosas de color gris oscuro, intercaladas con areniscas arcillosas. En el área de estudio se encuentra aflorando esta formación en los flancos oriental y occidental del sinclinal de

Tunja, principalmente hacia el flanco occidental, tanto en el costado oeste de la loma de Cristo como del cerro de San Lázaro.

Formación Cacho (Tc). Está compuesta por potentes bancos de arenisca, que determinan una morfología peculiar reconocible en toda la ciudad, ubicada en la parte superior de los flancos del sinclinal de Tunja.

Formación Bogotá (Tb). Corresponde a niveles arcillosos con intercalaciones arenosas en una sucesión monótona. En toda la ciudad, se localiza en ambos flancos del sinclinal de Tunja en amplias fajas que se desarrollan en sentido noreste y este, cubiertas discordantemente por la formación Tilatá y la unidad de diatomitas en el sector del flanco oriental del sinclinal.

El carcavamiento típico de esta formación muestra niveles arcillosos plásticos de color rojizo, amarillo y blanco con intercalaciones arenoarcillosas amarillentas que en conjunto alcanzan espesores de más de 100 m, con unos 30 a 40 m de areniscas pardas a gris claras y amarillentas de grano medio a fino, friables con estratificación cruzada hacia la parte superior.

Formación Tilatá (Tqt). En la depresión del río Chicamocha entre Tunja y Duitama se extiende sobre una vasta superficie un conjunto formado por capas de gravas, arcillas y arenas con esporádicos lignitos. Localmente presenta fuertes buzamientos y yace discordante sobre todas las formaciones comprendidas entre la formación Bogotá y Une. En la ciudad de Tunja se localiza sobre una faja larga en sentido noreste suroeste en la parte inferior del flanco oriental del sinclinal. Se caracteriza por presentar un carcavamiento severo y profundo en material arcilloso de color blanco y con niveles de cantos rodados de poco diámetro y arenas, presentando un espesor de unos 70 m en el área.

Depósito lacustre (Qd). Esta unidad se encuentra en el sector suroriental, en ambos costados del flanco oriental de la estructura. Está constituida por una sucesión de arcillas plásticas, grisáceas, y blancuzcas, con intercalaciones de diatomitas entre 0.1 y 9.0 m de espesor, ligeramente inclinadas hacia el oriente, aparentemente estratificadas.

Tiene un espesor aproximado de 50 m, yace discordantemente sobre la formación Tilatá y las formaciones Bogotá, Cacho y Guaduas.

Depósitos fluviolacustres (Qpl). Se encuentran formando los valles del río Chulo y la quebrada La

Cascada, su morfología de relieve es suave a plana, son depósitos no consolidados cuya composición y granulometría varía lateralmente, reflejando la variación de la intensidad de las corrientes hídricas que los depositaron.

En el eje del sinclinal el espesor alcanza los 37 m, sus componentes son finos constituidos por alternancias de arenas y arcillas grises y café con oxidaciones rojizas, sugiriendo la alternancia de episodios lacustres y fluviales.

Depósito aluvial (Qal). En el sector noroccidental de la ciudad se encuentra un cono aluvial formado por el río la Vega. La composición de este es esencialmente fragmentos tamaño grava y gránulos de arenisca blanca de grano fino y arenisca verdosa compacta en una matriz arcillosa, son de formas redondeadas a subredondeadas, chert, cuarzo hialino localmente oxidado, hacia la parte superior se encuentra una arena de grano fino a grueso, fragmentos de arenisca roja y amarilla y esporádicos fragmentos de carbón, hacia la superficie se encuentran intercalaciones de limos, arcillas y arenas.

Depósitos coluviales (Qc). Se localizan en la parte baja y media del flanco occidental de la estructura, cerca de los barrios Muisca y Asis, cubriendo parte de las laderas, se forman a partir de los bloques de arenisca desprendidos de los niveles de roca competente (Cacho y Bogotá) y el material removido de las formaciones no competentes (Guaduas y parte de la Bogotá), también se observan cerca de la base de los escarpes de la formación Cacho o aldeaños al trazado de fallas que han debilitado los materiales, como sucede al noroccidente del barrio La María y sur de la Hacienda San Ricardo. Esta clase de depósito presenta fragmentos heterométricos de areniscas, de formas angulares a subangulares y distribución errática con espesores inferiores a los 20 m, en matriz arcillosa o limoarenosa.

En la

se muestra el plano geológico de Tunja y en la Figura 7 se presenta la descripción de las unidades geológicas.

2) Geología estructural – Tectónica local.

Esta sección de la Cordillera Oriental presenta una tectónica compleja determinada por los esfuerzos regionales a que ha sido sometida. Reflejo de ello son las diferentes fallas de origen compresional y de distensión.

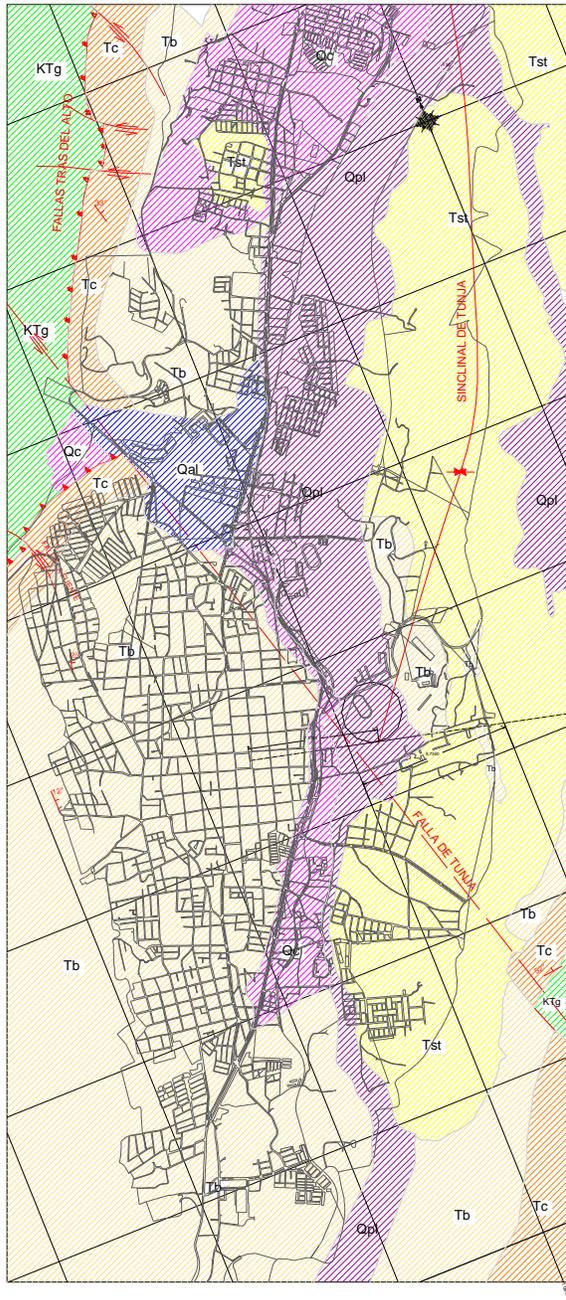


Figura 6. Plano Geológico de Tunja
Fuente: CÁCERES, Luis A. Erosión por flujo superficial y subsuperficial en los alrededores de la ciudad de Tunja. UN, Santafé de Bogotá, 1999.

EDAD	FORMACION	SIMBOLO	DESCRIPCION
CUATERNARIO	DEPOSITO ALUVIAL	Qal	Cantos y fragmentos redondeados de areniscas rojas y amarillas, resentándose hacia la parte superior intercalaciones de limos, arcillas y arenas.
	DEPOSITO COLUVIAL	Qc	Fragmentos heterométricos de forma angular y subangular enbebidos en una matriz arcillosa y limo-arenosa.
	DEPOSITO FLUVIO LACUSTRE	Qpl	Depósitos no consolidados de composición variada entre arenas y arcillas, de color gris y café con oxidaciones rojizas y violáceas.
TERCIARIO	TILATA	Tst	Capas de arcillas blancas y amarillas, caoliníticas que alternan con niveles de arenas cuarzosas de color blanco y capas de grava de arenisca, limolitas y chert, ocasionalmente bloques de arenisca color rojizo y amarillo enbebidos en arenas, limos y arcillas.
	BOGOTA	Tb	Areniscas arcillosas varicoloradas alternado con arcillolitas grises y areniscas de color café claro de grano grueso y conglomeráticas
	CACHO	Tc	Areniscas cuarzosas de color predominantemente amarillo de grano fino a medio hacia el techo y grueso en los niveles inferiores, ocasionalmente conglomerática, matriz arcillosa, es frecuente la estratificación cruzada.
CRETACEO	GUADUAS	Ktg	Arcillolitas grises y negras principalmente alternando con ocasionales niveles de areniscas blancas cuarzosas de grano fino y limosas, hacia el techo de la unidad se presentan mantos de carbón xplotable.

Figura 7. Columna estratigráfica sector urbano Tunja

La tectónica que afecta el sector está ligada al tipo de esfuerzos compresivos que afectaron la Cordillera Oriental. La dirección preferencial de los pliegues y fallas es noreste - sudoeste y corresponde con la dirección tectónica normal de la Cordillera Oriental en el departamento de Boyacá.

Sinclinal de Tunja. Es la estructura más amplia e importante en el área; tiene una orientación suroeste - noreste y va desde el sur del casco urbano de la ciudad hasta la localidad del Manzano, probablemente contra la falla de Boyacá. Se encuentra afectado por un sistema de fallas transversales que han dislocado sus flancos, modificando los buzamientos y desplazando las rocas aflorantes en diferentes sectores del mismo.

La parte central del sinclinal está afectada por una falla transversal (*Falla de Tunja*), la cual desplaza y divide la estructura en su parte central afectando por consiguiente los dos flancos, dicha falla tiene una dirección noroeste – sureste.

Falla Tras del Alto. Es una falla inversa, cuyo trazado pasa cerca del borde occidental de la ciudad, 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.

Falla del Asís. Es una falla de desplazamiento de rumbo con su trazado transversal a la dirección del sinclinal. Afecta rocas de la formación Bogotá y su extensión dentro de la ciudad es de solo 450 m en el extremo norte de esta. A esta falla se le atribuye parte de la complejidad tectónica que presenta el flanco occidental del sinclinal en este sector, afectando al sector aledaño al norte del barrio Asís y oeste del barrio Los Muiscas.

Falla de Tunja o Central. Es una falla de rumbo y su alineamiento posee una dirección N13W, cortando ambos ejes del sinclinal de Tunja en forma transversal a la orientación de éste. Su desplazamiento direccional corta y desplaza los flancos en una distancia aproximada de 200 m, aunque su efecto es menos notorio en el flanco oriental.

Otras fallas. Son de carácter local preferencialmente de desplazamiento de rumbo, con trazados transversales a la dirección tectónica de la región, que causan desplazamientos de los dos flancos. Entre estas sobresalen la falla de San Antonio, Salival, Telecom, Cooservicios y Ladrillera.

C. Sismicidad

Este aspecto se presenta de acuerdo con lo expuesto en el trabajo del Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S.A, 2000 [3], el cual describe los sismos históricos relevantes que han afectado la ciudad hasta 1999. En la

Figura 8 se muestra la sismicidad de Tunja para un radio de 50Km, en esta se aprecia una concentración de sismos hacia la parte sureste con magnitudes de hasta 6.6 correspondientes con la zona del sistema de Falla Frontal de la Cordillera Oriental o Guaicaramo.

Dentro de los sismos que han afectado la ciudad están:

Sismo del 12 de Julio de 1785, corresponde con el sismo de mayor impacto para Bogotá y sus alrededores, generó graves daños, se sintió desde Popayán hasta Pamplona y en Tunja se desplomó el edificio de la iglesia y la capilla de Nuestra Señora del Rosario.

En Junio 17 de 1826 se presentó otro sismo que generó daños en el colegio de Boyacá, en la sede de la gobernación, en el Hospital y en el cuartel militar.

El 30 de Julio de 1962 se sintió un fuerte sismo generado en el departamento de Caldas que produjo daños apreciables en la Cordillera Central y el Valle del Cauca, en Tunja se reportaron daños en el edificio Suarez Rendón sede de la gobernación.

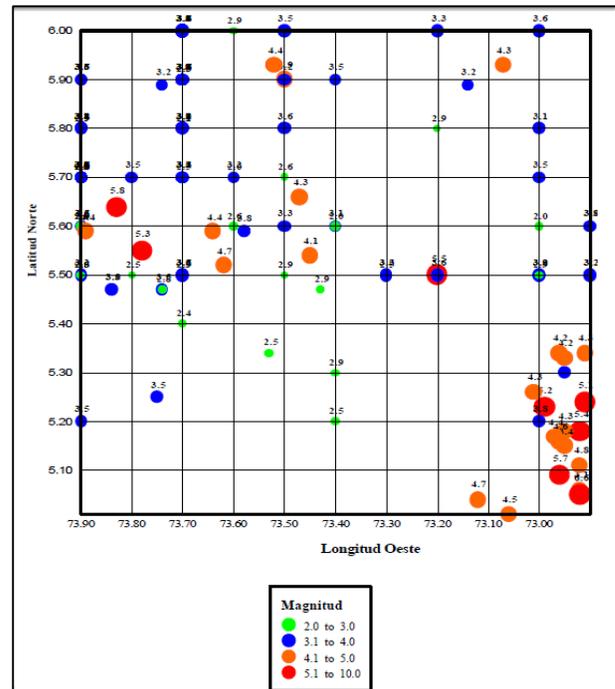


Figura 8. Sismicidad de Tunja R=50Km hasta 1999. Magnitud Ms.

Fuente: Instituto geofísico de la Universidad Javeriana y Consultoría colombiana S.A, 2000.

El 29 de Julio de 1967 se presentó un fuerte sismo con magnitud de 6.3 con epicentro en Betulia-Santander, se sintió en todo el país y produjo grandes daños y pérdida de vidas humanas, en Tunja se presentaron daños graves en la torre de la catedral, en la sede de la gobernación, en la iglesia de la catedral y en el club Boyacá.

Según el Servicio Geológico Colombiano, El 19 de enero de 1995 se presentó el sismo de Tauramena con magnitud de 6.5, es uno de los sismos más fuertes que ha afectado a la zona centro y oriental del departamento de Boyacá generando daños severos en construcciones y laderas en la mayoría de municipios, en Tunja se presentaron daños leves a moderados en algunas construcciones.

Recientemente, el 20 de agosto de 2012 se presentó el sismo de Viracachá con magnitud de 4.3 con distancia epicentral de menos de 10 Km y profundidad focal de 43Km, en Tunja se presentaron agrietamientos la torre de la catedral y una cruz de piedra se desplomó, El Tiempo-2012 [9]

La plancha 9 del Atlas de Amenaza Sísmica de Colombia (Ingeominas, 1998) [10] presenta la sismicidad y las fallas activas para el departamento de Boyacá, Casanare, Cundinamarca y otros, Figura 9. En esta figura se puede ver la influencia clara de la sismicidad generada por el sistema de fallas activas y potencialmente activas de la zona suroriental, correspondientes con las fallas de Guaicaramo norte, Guaicaramo Oeste, Guaicaramo Sur, Chameza, Yopal, Santamaría y Lengupá. Adicionalmente es importante notar que gran parte de los eventos generados presentan profundidades focales menores a 20Km.

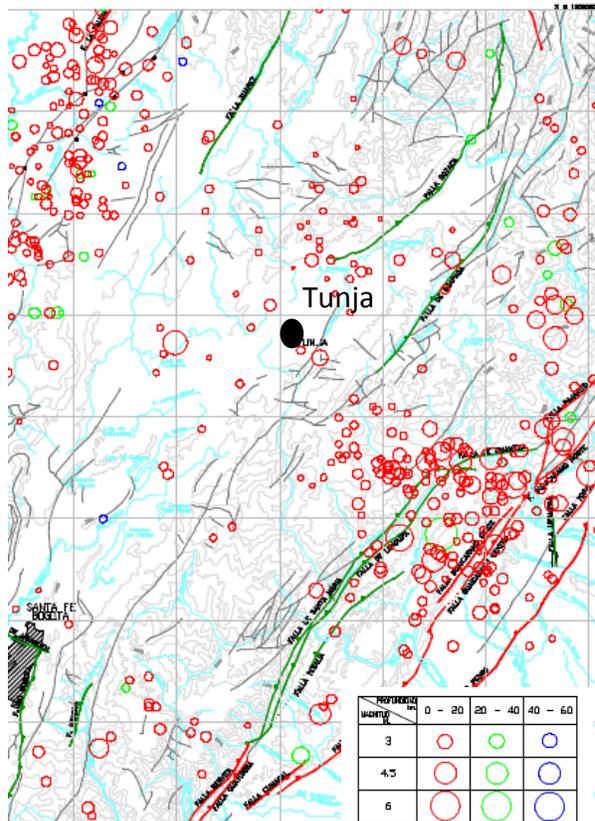


Figura 9. Sismicidad y fallas activas para la zona de influencia de Tunja

Fuente: INGEOMINAS, Atlas de amenaza sísmica de Colombia, 1998.

Con lo antes descrito se puede concluir que en el área de la catedral y sus alrededores se han presentado efectos sísmicos importantes, situación que puede estar influenciada por efectos topográficos. Adicionalmente, se deduce que la condición de sismicidad en la ciudad es de importancia, lo cual justifica la evaluación de la respuesta sísmica cuantitativa para la ciudad como camino indispensable para la microzonificación sísmica.

IV. ESTUDIOS PREVIOS

La ciudad cuenta con una cantidad importante de estudios enfocados a la caracterización y zonificación geotecnia, entre los que se destacan los trabajos de Ramírez (1990), Lopez y Reyes (2001), Villate y Montes-2001, Instituto Geofísico U.J y Consultoría Colombiana (2000), Ramírez et al.-(2002), Bernal y Monroy (2010), entre otros.

También se han realizados trabajos para la definición de las condiciones geológicas y tectónicas locales como los presentados por Cáceres (1999), Ramírez et al (2002), López y Arias (2007), entre otros.

Para la definición de la amenaza sísmica de la ciudad se tienen los trabajos de AIS-1998, AIS-2009, Molina (2008), Molina y Alfaro (2009) y Garzón (2011).

Con respecto a los trabajos tendientes a definir la respuesta dinámica o respuesta sísmica de la ciudad, se han realizado algunos estudios que definen de manera preliminar áreas de comportamiento sísmico homogéneo, otros estudios están relacionados con respuesta dinámica local o para depósitos específicos. A continuación se presenta un resumen breve de los principales estudios ejecutados para la ciudad de Tunja.

En el trabajo de Rincón, O. y Páez, A. (1999) [11] se hizo la medición de periodos predominantes del suelo en 167 puntos de la ciudad, y se encontró una variación desde 0.01 hasta 0.85 s. Como resumen se presenta un mapa de distribución de los periodos. Los periodos más altos están localizados en la zona del valle que corresponde a los depósitos aluviales y fluvio-lacustres y los períodos menores

se encuentran hacia los flancos del sinclinal. Figura 10.

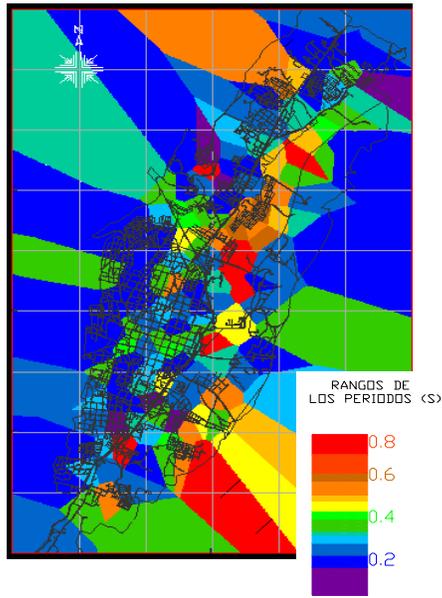


Figura 10. Distribución de Períodos predominantes en la ciudad de Tunja.

Fuente: Rincón O. y Páez A (1999)

El Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S.A-2000 [3], elaboraron el documento denominado Microzonificación Sísmica preliminar de Tunja, desde el punto de vista sísmico se incluye la descripción de algunos eventos sísmicos que han afectado la ciudad y los efectos asociados, y finalmente presenta una zonificación sísmica preliminar de la ciudad en donde se hace énfasis en presencia de efectos locales asociados a cambios topográficos fuertes, presencia de cárcavas con rellenos antrópicos, problemas de licuación de depósitos suelos y procesos de inestabilidad inducidos. Adicionalmente recomienda avanzar con un análisis de respuesta cuantitativo para definir mejor la microzonificación.

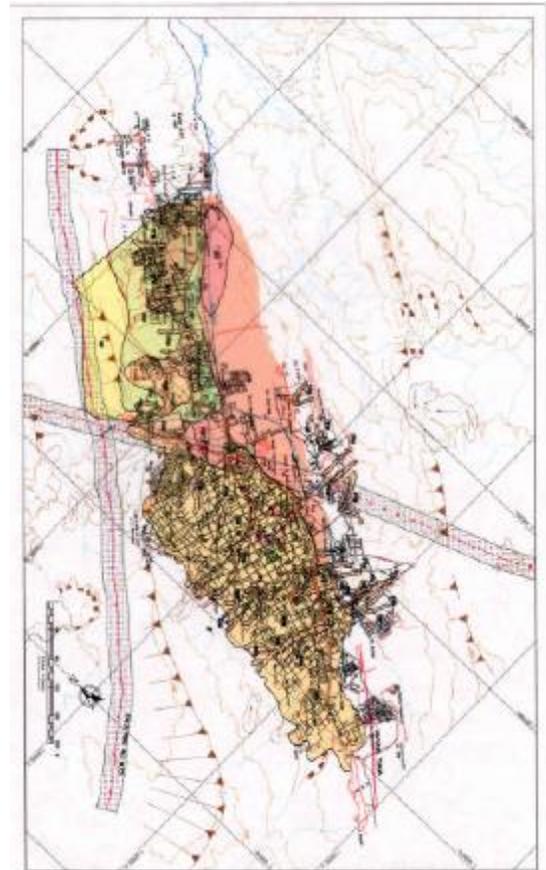


Figura 11. Microzonificación preliminar de Tunja.

Fuente: Instituto geofísico de la Universidad Javeriana y Consultoría colombiana S.A, Microzonificación sísmica preliminar de Tunja (2000).

Ramírez et al. (2002) [2] presentan la determinación de efectos de sitio a nivel preliminar para la ciudad de Tunja, en este trabajo se muestra la distribución de isoperíodos donde se aprecia claramente la distribución de los períodos fundamentales del depósito cuaternario en el área del valle alcanzando valores entre 0.05s y 0.75s, en los flancos y en el centro del valle del sinclinal, respectivamente, Figura 12. A partir del plano de isoperíodos y de la zonificación geotécnica actualizada, generan un plano de respuesta dinámica preliminar conformada por 5 zonas homogéneas donde indican áreas de potencial de licuación alta, efectos topográficos, áreas de relleno, no se indican factores de amplificación ni otros parámetros de respuesta.

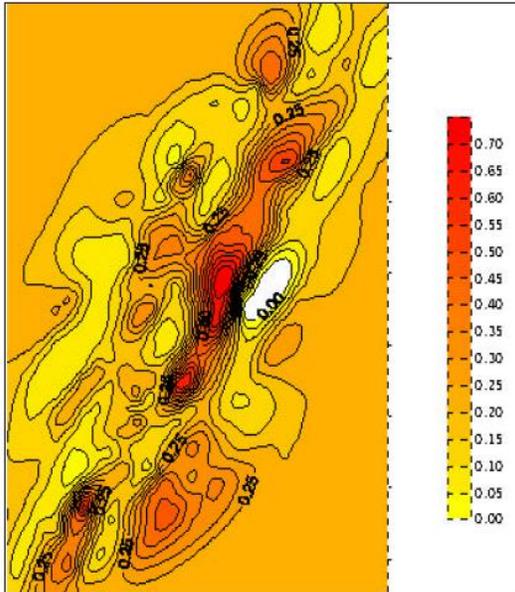


Figura 12. Mapa de isoperíodos predominantes para Tunja.

Fuente: Ramírez O, Et al. Determinación de efectos de sitio a nivel preliminar para la ciudad de Tunja, IX CCG, 2002.

Ospina (2005) [12] realizó el trabajo de Respuesta Dinámica de los rellenos Antrópicos en Cárcavas en la Ciudad de Tunja, en el cual se muestra como es la respuesta dinámica de los rellenos existentes en cárcavas y también la respuesta de áreas de cárcavas sin relleno con geometrías típicas para los sistemas de cárcavas de la ciudad, de éste trabajo se pudo establecer que hacia los bordes se presentan factores de amplificación de hasta 2.5 en tanto que hacia el eje de la cárcava los valores alcanzan 1,5. Para el caso de las cárcavas con rellenos antrópicos también presentan factores de amplificación superiores a 2,0 tanto en los bordes como en la superficie del relleno.

Molina y Alfaro (2009) hicieron un estudio de evaluación probabilística de la amenaza sísmica regional para la ciudad de Tunja, considerando sismos de magnitud $M_s = 4.0$ a 7.0 ocurridos entre 1566 y 2005. Los autores emplearon seis ecuaciones de atenuación diferentes para la evaluación de la amenaza sísmica y encontraron aceleraciones pico para diferentes períodos de retorno según se muestra en la Tabla 1.

También encontraron varios espectros de respuesta sísmica mediante el programa SPECEQ/UQ a partir de registros de 9 sismos de contenidos frecuenciales, distancias epicentrales, magnitudes y aceleraciones diferentes, y propusieron un espectro de diseño, según se muestra en la Figura 13.

Tabla 1. Aceleraciones pico encontradas a partir de diferentes ecuaciones de atenuación y períodos de retorno.

Período de Retorno TR en años	Aceleración en Gales para Tiempo Parcial (70 años)						Aceleración en gales Según NSR-98	Promedio	Diferencia porcentual con la NSR-98
	Atenuación Ambraseys & Douglas (2000)	Atenuación Sarna y Sribulov (1998)	Atenuación Sarna y Sribulov (1996)	Atenuación Fukushima et al. (1998) & Fukushima & Takada (1990)	Atenuación Smit et al. (2000)	Atenuación Patwardha, K. Sadigh, I. M. Idriss, R. Youngs (1978)			
475	310	325	380	405	-	325	196	349	78
1000	360	420	-	460	-	395		409	-
2000	395	530	-	500	-	425		463	-

Fuente: Molina G y Alfaro A. Evaluación de la Acción sísmica para Tunja (2009).

Adicionalmente, mediante el análisis de registros de microtrepidaciones se concluye que los suelos Tipo IIIP (suelos blandos del depósito fluviolacustre) son los que presentan mayor espesor y se caracterizan por capacidad portante baja, algo expansivos y con sustrato profundo.

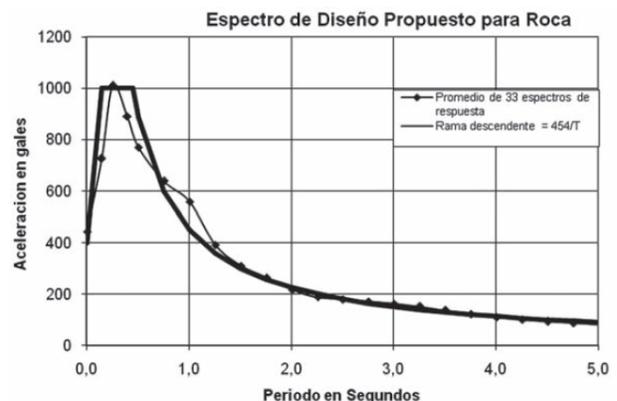


Figura 13. Espectro de diseño propuesto para Roca.

Fuente: Molina G y Alfaro A. Evaluación de la Acción sísmica para Tunja (2009).

este estudio tomando como base el numeral A.2.9.3 de la NSR-10, el cual da los alcances generales para tales estudios.

En la Figura 16 se presenta el marco metodológico para el estudio de respuesta sísmica el cual se detalla a continuación indicando los alcances específicos para el caso Tunja.

A. Estudios básicos.

En esta etapa se debe realizar el estudio topográfico del área de interés mediante la integración de cartografía local con cartografía regional para generar el modelo digital del terreno a escala 1:10000 y con curvas de nivel principales cada 10m y secundarias cada 2m es importante que el modelo topográfico involucre todo el ancho del sinclinal de Tunja.

Se la actualizará la geología y la tectónica regional y local mediante la integración de la información existente con el análisis de fotografías aéreas, imágenes satelitales y trabajo de campo.

Se analizará con más detalle las evidencias de campo de la actividad de fallas locales como es el caso de la falla de Tunja y de Tras del Alto y de fallas regionales como la fallas de Soapaga y Boyacá, de forma que se puedan obtener los parámetros de sismicidad representativos para estas estructuras.

B. Estudio de amenaza sísmica

En esta etapa se incluirán los siguientes aspectos:

- Recopilación y actualización de información de estudios de amenaza sísmica local y regional.
- Identificación de las fuentes sismogénicas activas y potencialmente activas con base en los estudios de geología y tectónica.
- Obtención del catálogo actualizado y depurado de sismos históricos e instrumentales para la actualización de la amenaza sísmica.
- Asignar los eventos sísmicos a cada una de las fuentes sismogénicas y determinación de los parámetros de recurrencia de magnitudes.
- Evaluación de la amenaza sísmica probabilística y determinística teniendo en cuenta ecuaciones de atenuación que representen la tectónica local y regional.

➤ Evaluación de los espectros de amenaza uniforme para períodos de retorno de 100, 500, 1000 y 2500.

➤ Definir mínimo tres acelerogramas representativos para cada fuente representativa que serán utilizados en el estudio de respuesta sísmica.

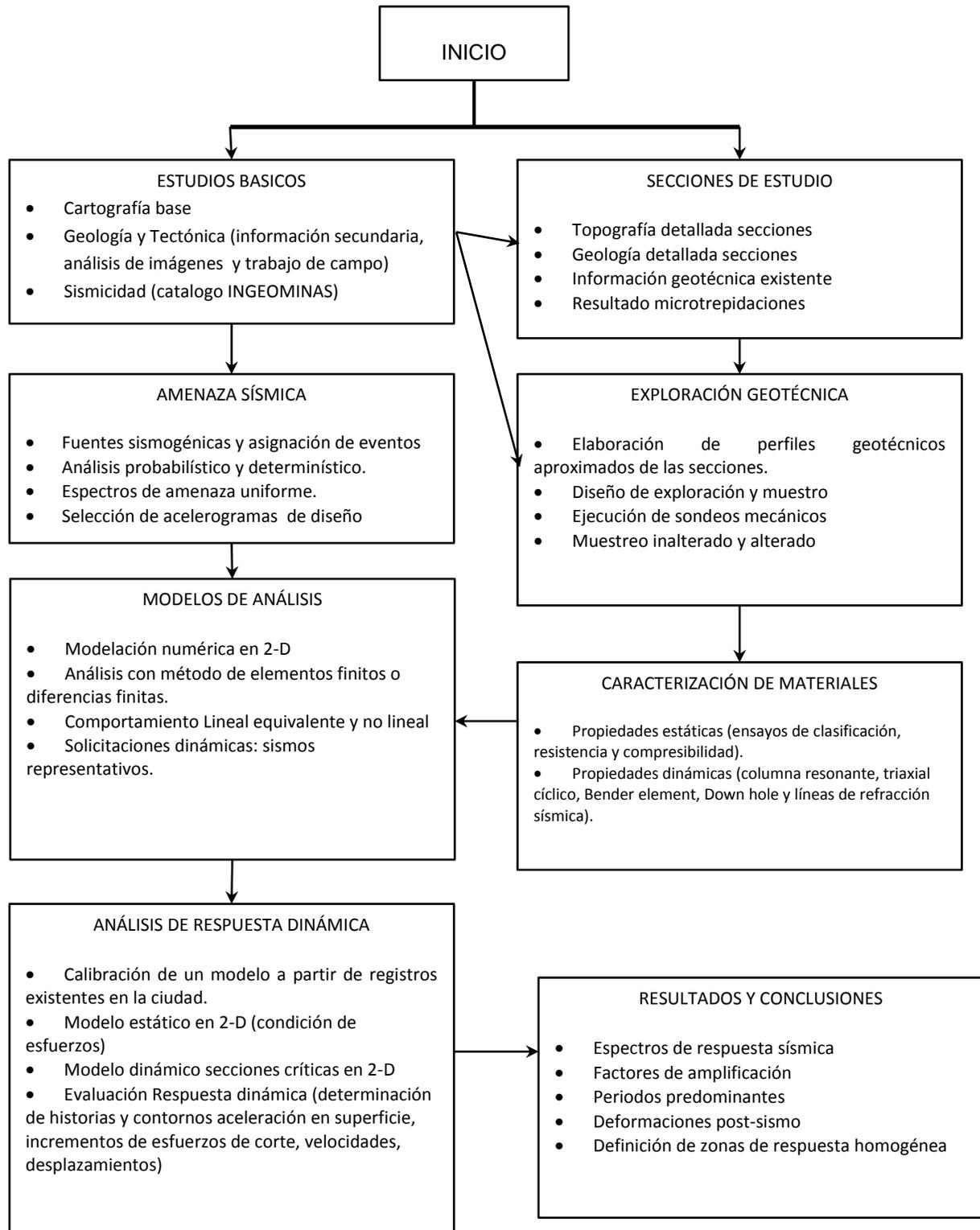
C. Secciones de estudio

De acuerdo con la distribución urbanística de la ciudad, la condición topográfica, geológica y geomorfológica, así como la zonificación geotécnica y distribución de isoperiodos; se hará un análisis de respuesta sísmica con modelos numéricos dinámicos 1D y 2D.

Estos deben corresponder con secciones transversales al eje del sinclinal que coincide aproximadamente con la dirección del desarrollo urbanístico de la ciudad, La localización de las secciones debe ser tal que representen de la mejor forma las diferentes áreas geológica y geotécnicamente homogéneas. Adicionalmente, es importante que cada sección involucre todo el valle del sinclinal y sus correspondientes flancos.

De manera inicial se recomienda utilizar las 9 secciones 2D que se muestran en la Figura 17, las cuales cubren franjas relativamente homogéneas que pueden ser representadas por cada sección planteada.

Figura 16. Marco metodológico para el estudio de respuesta dinámica del subsuelo en la ciudad de Tunja.



D. Exploración geotécnica

Para definir el número de perforaciones y su localización de manera que la información obtenida sea representativa se debe proceder de la siguiente manera:

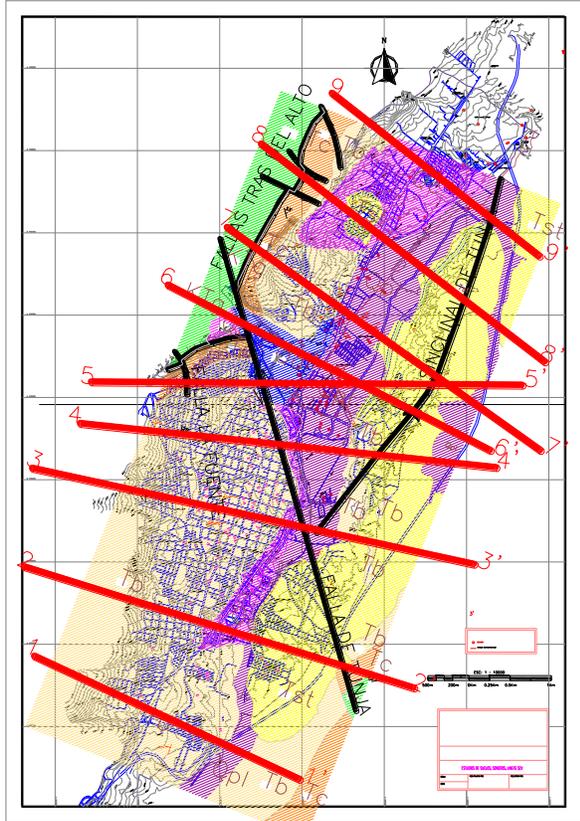


Figura 17. Localización de secciones recomendadas.

Con la información geotécnica existente de trabajos de zonificación geotécnica y de nuevos estudios geotécnicos para proyectos importantes de fuentes confiables, y adicionalmente, con la información del estudio de microtrepidaciones existente para la ciudad, en cada sección se debe hacer un perfil geotécnico aproximado de forma que se pueda establecer tipos de suelo y su distribución en profundidad.

Con estos perfiles se proyectará la exploración para caracterizar dinámicamente los tipos de suelos representativos cada sección. Para cada sección se deben realizar mínimo tres perforaciones mecánicas debidamente localizadas de manera que se obtenga

información de la parte plana y de cada flanco del sinclinal para obtener el perfil geotécnico representativo hasta alcanzar el lecho rocoso.

Se requiere la toma muestras inalteradas para ejecutar ensayos de laboratorio para determinar propiedades índice, de resistencia, compresibilidad y dinámicas (módulos de corte y amortiguamiento en función de la deformación por corte) en las capas representativas, y la ejecución de ensayos de penetración estándar cada 1.5 m de profundidad.

En las perforaciones realizadas se ejecutarán ensayos de Down-Hole para cada zona preestablecida. Es ideal que para la zona de suelos blandos de origen fluviolacustre y aluvial se realicen sondeos con piezocono SCPTu con el fin de establecer el perfil continuo de resistencia y de velocidades de ondas de corte y de compresión.

Como complemento, en las zonas de transición de los depósitos blandos con los niveles rocosos se recomienda realizar líneas geofísicas (refracción o Remi o SASW) para definir adecuadamente la distribución de los materiales y sus propiedades.

E. Caracterización de los materiales.

Con las muestras recuperadas se realizarán ensayos de caracterización física como humedad natural, límites de Atterberg, granulometría, gravedad específica, peso unitario, corte directo, consolidación, compresión triaxial, etc, para la caracterización dinámica se ejecutaran ensayos de triaxial cíclico, columna resonante, corte simple cíclico y Bender Element para suelos arcillosos y limosos, de forma que se puedan obtener curvas de degradación del módulo de rigidez, y curvas de amortiguamiento para diferentes propiedades Índice de forma que se pueda tener una familia de curvas características para interpolar y extrapolar curvas para materiales con propiedades diferentes.

F. Modelos de análisis.

Para el análisis numérico los modelos dinámicos que se utilicen deben ser 1D y 2D. El análisis numérico debe realizarse utilizando el método de los elementos finitos o de diferencias finitas mediante el uso de herramientas computacionales apropiados para análisis de respuesta dinámica como SHAKE, QUAD4M, FLAC2D o FLAC3D, Plaxis Dinámico u otra herramienta de igual potencial que permitan

obtener resultados de historias de aceleración, velocidad, desplazamiento, e incrementos de esfuerzos de corte, etc.

G. Análisis de respuesta dinámica.

Para el análisis de respuesta dinámica es necesaria la calibración de un modelo a partir de los registros de los acelerómetros existentes en la ciudad para ajustar y asignar las curvas dinámicas.

Una vez calibrado el modelo se deben asignar los parámetros a los demás perfiles de análisis, se realizarán los modelos estáticos para evaluar el estado de esfuerzos iniciales y a partir de esto se hará la modelación dinámica y la evaluación de la respuesta dinámica incluyendo los acelerogramas seleccionados.

H. Resultados

Del análisis de respuesta se deben obtener resultados como espectros de respuesta en diferentes puntos de los perfiles estudiados, los cuales será la base para la definición de Zonas de respuesta homogénea.

Se determinaran factores de amplificación, periodos predominantes, deformaciones post-sismo, incrementos de esfuerzos cortantes, etc. Con estos parámetros se identificarán zonas afectadas por efectos locales por resonancia (amplitud alta de desplazamientos), inestabilidad de taludes, potencialmente licuables o de ablandamiento cíclico, etc.

Con los resultados obtenidos se debe llegar a la construcción un plano de zonificación por respuesta sísmica o de microzonificación sísmica con sus correspondientes espectros de respuesta sísmica y de diseño sismo resistente.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo con los requerimientos de la NSR-10. La ciudad de Tunja debe contar con microzonificación sísmica debidamente aprobada por las entidades reguladoras del estado y debe estar integrada en su plan de ordenamiento territorial.

La historia sísmica de la ciudad indica que en algunos sectores se han presentado daños importantes tanto por sismos de fuentes intermedias y lejanas como por sismos cercanos. Demostrando los anterior que se pueden presentar efectos locales importantes en la ciudad y que pueden amplificar las ondas sísmicas a niveles superiores a los previstos por los factores espectrales de la norma NSR-10.

De estudios de respuesta local en áreas de carcavamiento, se encontró que hay evidencia de factores de amplificación cercanos a 3.0 lo cual incida una condición bastante crítica desde el punto de vista sísmico. Por lo anterior, para las áreas de carcavamiento se recomienda la ejecución de estudios de respuesta local que permitan fijar los límites de las áreas de influencia, las cuales deberán tener un tratamiento diferente a las zonas homogéneas definidas en el estudio de respuesta general.

Para la ejecución del estudio de respuesta dinámica del subsuelo y de microzonificación sísmica de Tunja es necesario el compromiso y participación activa de las entidades territoriales como alcaldía y gobernación y la integración de universidades locales, pues la naturaleza del estudio requiere la asignación de recursos importantes que sin el aporte de estas entidades es muy difícil llevar a feliz término el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Comité AIS-300, Estudio general de amenaza sísmica 2009, 220p.
- [2] Ramírez O, Et al. Determinación de efectos de sitio a nivel preliminar para la ciudad de Tunja, IX Congreso Colombiano de Geotecnia de 2002.
- [3] Instituto geofísico de la Universidad Javeriana y Consultoría colombiana S.A, Convenio Estudios de Amenaza y Microzonificación Sísmica, Vulnerabilidad Estructural y Evaluación de Escenarios de Daño, Microzonificación Sísmica Preliminar de Tunja, 2000.
- [4] KRAMER , Stiven. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice hall 1996, 653p.

[5] ATHANASOPOULOS G.A. et al, Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18 (1999)

[6] RODRIGUEZ E, Estudios de amenaza y respuesta sísmica local, Seminario Internacional Gestión Integral de Riesgo Sísmico, Bogotá 2010.

[7] LOPEZ A. y ARIAS M., Modelo geologico-geofísico preliminar de la ciudad de Tunja, UPTC, 2007.

[8] CÁCERES, Luis A. Erosión por flujo superficial y subsuperficial en los alrededores de la ciudad de Tunja. UN, Santafé de Bogotá, 1999.

[9] http://www.eltiempo.com/colombia/boyaca/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-12144588.htm.

[10] INGEOMINAS. Atlas de Amenaza sísmica de Colombia, Mapa de fallas activas y sismicidad de Colombia, 1998.

[11] RINCON, O y Páez, A, Estimación de los Periodos Predominantes de los Depósitos de suelo de la ciudad de Tunja a partir de Micro trepidaciones y Diseño de la red de Acelerógrafos de Boyacá etapa I, UPTC 1999.

[12] OSPINA S, Respuesta Dinámica de los rellenos Antrópicos en Cárcavas en la Ciudad de Tunja, Universidad Nacional, 2005.

[13] BERNAL M y Monroy J. Modelo para identificación de afectación sísmica en depósito fluvio – lacustre de tunja, UPTC, 2010.

[14] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente, Título A. NSR-10. Bogotá, 2010.