



Universidad de Oviedo

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUSTRATO DE SANTA CRUZ DE TENERIFE

**MÁSTER OFICIAL EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA
GEOLÓGICA**



TRABAJO FIN DE MÁSTER

José Fernández Linde

Febrero de 2014

D. José Fernández Linde, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Caracterización Geotécnica del sustrato rocoso de Santa Cruz de Tenerife”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 7 de Febrero de 2014.

Fdo. José Fernández Linde

El Dr. Carlos López Fernández, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “*Caracterización geotécnica del sustrato de Santa Cruz de Tenerife (España)*”, realizado por D. José Fernández Linde, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 7 de Febrero de 2014.

Fdo. Carlos López Fernández

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a D. Carlos López Fernández su ayuda en la realización de esta Tesis de Máster. Al primero por ayudarme a solucionar todas las dudas que han ido surgiendo a lo largo de la elaboración de la presente Tesis de Máster, así como de cuestiones sobre los “softwares” informáticos utilizados. También quiero agradecer a mi familia y amigos por su incondicional apoyo.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
Objetivos de estudio	1
Situación geográfica	1
Metodología	2
2.- ENCUADRE GEOLOGICO	5
Marco geológico de Canarias y Santa Cruz de Tenerife	5
Características hidrogeológicas de los litotipos de las Islas Canarias.....	11
Contexto sísmotectónico	13
3.- CARTOGRAFÍA GEOTÉCNICA	17
Criterios de clasificación y litotipos de los materiales volcánicos de las Islas Canarias	17
Características geotécnicas de Santa Cruz de Tenerife	19
Características geotécnicas del subsuelo de Santa Cruz de Tenerife	21
Unidades geotécnicas	23
Nivel freático.....	34
Ensayos in situ.....	34
Ensayos de laboratorio	37
4.- VALORACIÓN DE LOS MATERIALES COMO NIVEL DE CIMENTACIÓN	44
Cargas admisibles.....	44
Parámetros geotécnicos	48
5.- PROBLEMÁTICA GEOTÉCNICA	52
6.- RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS	58
Características generales de las cimentaciones	58
Tratamiento, preparación de la cimentación y drenaje	58
Estabilidad de taludes.....	59
7.- CONCLUSIONES	61
8.- REFERENCIAS	64

1.- INTRODUCCIÓN

En la presente Tesis de Máster se lleva a cabo la descripción y valoración de las características geológico-geotécnicas generales del subsuelo del centro de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife, que se sitúa en la zona noreste de la isla de Tenerife (Islas Canarias). El autor ha trabajado durante tres años como geólogo en esta ciudad, participando en la elaboración de informes geotécnicos y en la caracterización geotécnica de materiales.

Objetivos del estudio

El principal objetivo de este trabajo ha sido determinar las características geotécnicas generales y las condiciones generales del subsuelo de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife, así como las condiciones constructivas del terreno en relación a la tipología de cimentaciones

Como objetivos más concretos se pueden señalar los siguientes:

- Identificar las principales unidades geotécnicas.
- Evaluar la calidad de los materiales como soporte constructivo.
- Valorar las condiciones de cimentación.
- Técnicas de mejora del terreno.

Situación geográfica

La isla de Tenerife se encuentra dentro del denominado Archipiélago Canario (Fig. 1-1), el cual está formado por un conjunto de siete islas y cuatro islotes. Desde el punto de vista biogeográfico, las Islas Canarias forman parte de la región de Macaronesia. Esta región está formada por los archipiélagos de Azores, Madeira, Islas Salvajes, Canarias y Cabo Verde.

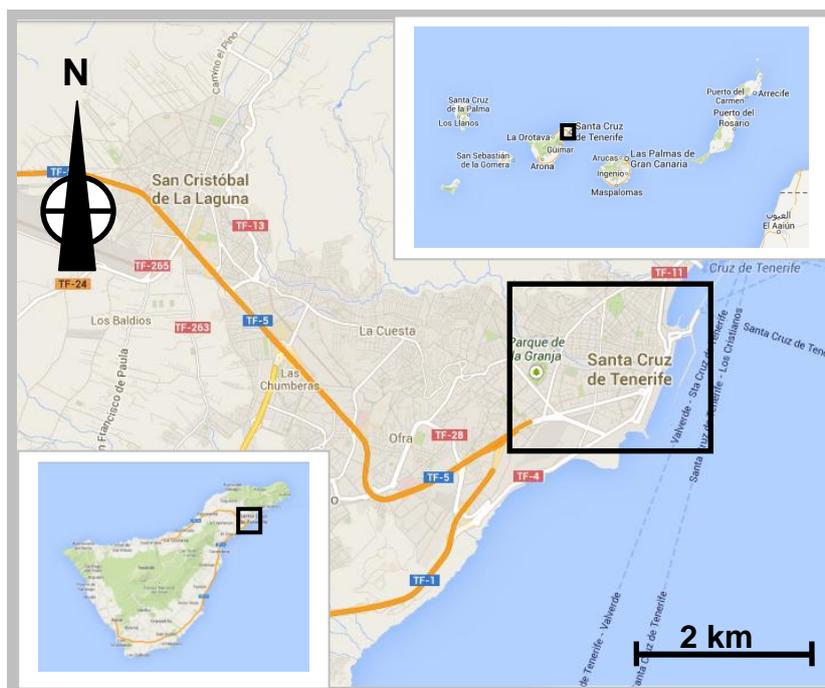


Figura 1-1. Situación de la zona objeto de estudio.

El área objeto de estudio en este trabajo alcanza gran parte del suelo urbano de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife, centrándose principalmente en la parte central y más antigua de la misma, de aproximadamente 7 km², y que abarca una de las zonas más urbanizadas de la ciudad. La zona presenta una topografía suave, con una pendiente entre 7-15%, donde las zonas más llanas corresponden a las zonas más próximas al mar y las mayores pendientes a la zona norte, lindante con el Macizo de Anaga, y la zona oeste (zonas más elevadas).

Metodología

La metodología seguida en este trabajo ha seguido las siguientes etapas:

- 1) Recopilación previa de la información geológico-geotécnica de la ciudad objeto de estudio. Una parte importante del presente trabajo ha consistido en recopilar toda la información geológica existente, para lo cual, se utilizó la información recogida en diversos cursos, jornadas geotécnicas, etc., así como la experiencia adquirida durante más de tres años en dos empresas dedicadas a prestar servicios geotécnicos (ensayos de mecánica de suelos y rocas, redacción de informes geotécnicos del terreno, etc.).
- 2) Análisis de la información recopilada. En una segunda fase se procedió al análisis de los 30 puntos de reconocimiento (Tabla 1-1; Fig. 1-2), de los que se dispone de datos de sondeos, resultados de laboratorio, pruebas in situ etc. Los mismos corresponden a estudios de parcelas donde se han llevado a cabo diferentes obras de edificación, lineales, etc.

El área estudiada limita al norte con el Macizo de Anaga, al oeste con el Barrio de Salamanca y con el Parque de la Granja (próximo a los Barrios de Los Gladiolos y Cruz del Señor), al sur con el polígono de Buenos Aires y finalmente, al este con el Océano Atlántico (Fig. 1-2).

La zona de estudio está atravesada por el “Barranco de Los Santos” (barranco principal de la ciudad), que presenta una dirección E-O atravesando la parte central de la ciudad y que se alimenta de las aguas de escorrentía procedentes del Macizo de Anaga y del entorno de la ciudad.

- 3) Identificación de la problemática geotécnica del terreno. A partir de la información disponible se procedió a identificar todas las unidades geotécnicas, definiendo sus características representativas y problemática geotécnica previsible.

Tabla 1-1. Localización de los puntos de reconocimiento en el subsuelo urbano.

Nº PUNTO DE RECONOCIMIENTO	LOCALIZACIÓN
1	C/DOCTOR GUIGOU, 29-31
2	C/ROBAYNA, 26
3	C/PADRE ANCHIETA, 41
4	C/FEBLES CAMPOS, 29-31
5	C/ANTONIO ESQ C/SAN MIGUEL
6	PLAZA IRENEO GONZÁLEZ, 3-4
7	C/ANGEL GUIMERÁ ESQ C/IMELDO SERÍS
8	C/ÁLVARO RODRÍGUEZ LÓPEZ
9	C/ 25 DE JULIO, 51
10	AVDA. 3 DE MAYO
11	C/SIN SALIDA, 6-8
12	C/CAIRASCO, 11
13	AVDA DE BÉLGICA, 28
14	C/SAN FRANCISCO ESQ C/RUIZ DE PADRÓN
15	AVDA DE BUENOS AIRES
16	C/DOCTOR ALLART Y C/CANDELARIA
17	C/TOMÉ CANO
18	AVDA ESCUELAS PÍAS, 31
19	AVDA MANUEL HERMOSO, C/3 DE MAYO Y C/ÁLVARO RODRÍGUEZ
20	C/BERNARDINO SEMAN, 18
21	AVDA BUENOS AIRES, 74
22	C/RAMÓN Y CAJAL, 16-18, 20
23	CENTRO WESTERDAHL (PTE ZURITA)
24	PLAZA DE CANDELARIA
25	C/SALAMANCA ESQ C/GENERAL MOLA
26	C/BENITO PÉREZ ARMAS ESQ C/PÍO BAROJA
27	PABELLÓN DE DEPORTES
28	C/SERRANO, 90
29	C/ÁLVARO RODRÍGUEZ LÓPEZ Y C/FUENTE
30	C/TEOBALDO POWER, 14

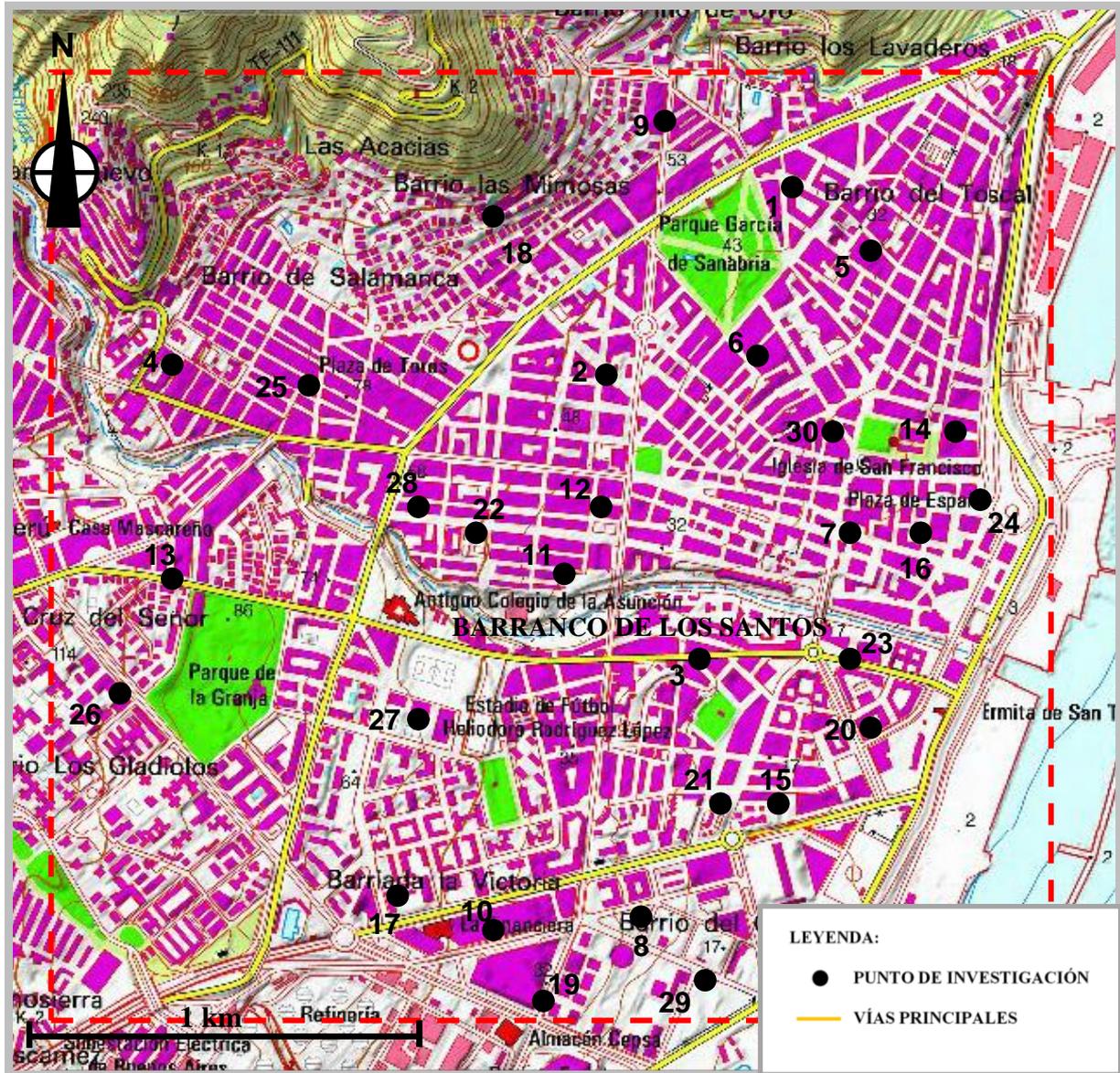


Figura 1-2. Localización de los puntos de reconocimiento.

2.- ENCUADRE GEOLÓGICO

Marco geológico de Canarias y Santa Cruz de Tenerife

Las teorías científicas sobre el origen del archipiélago canario, surgen en la década de los sesenta de forma paralela al desarrollo de la actual tectónica de placas. La primera de las hipótesis fue la del punto caliente, desarrollada por Morgan (1971) y Wilson (1973), aplicada primeramente y de forma satisfactoria, en el archipiélago de Hawái. Según esta hipótesis, un penacho térmico originado en la base del manto terrestre sería la fuente de todos los magmas del archipiélago. Al estar dicho penacho en posición fija con respecto a la placa africana, desplazándose linealmente de Oeste a Este, se irían formando un conjunto de islas alineadas con edades decrecientes hacia el Oeste. Para acomodar este modelo a las peculiaridades del archipiélago canario, surgieron en la década de los noventa, nuevas ideas que no eran sino modificaciones de la antigua teoría del punto caliente: 1) El modelo de pompas, de Hoernle y Schmincke (1993) y 2) la anomalía térmica laminar, de Hoernle y otros autores (1995).

No obstante, como resultado de la gran cantidad de problemas planteados por la teoría del punto caliente, surgen en la década de los setenta, dos hipótesis alternativas al punto caliente y sus posibles variantes: La de la fractura propagante por Anguita y Hernán (1973) y la hipótesis de los bloques levantados por Araña y otros autores (1976). La primera de ellas, establece que el archipiélago surgió sobre la prolongación de una gran fractura ENE-OSO procedente del Sur del Atlas y cuya actividad repetida y propagada de Este a Oeste, generó el magmatismo que daría lugar a las Islas Canarias. La segunda considera que las islas se elevaron a modo de bloques levantados a favor de grandes sistemas de fallas inversas.

En el año 2000 surge la hipótesis más reciente sobre el origen del archipiélago y constituye una propuesta de consenso basada en las anteriores ideas de los bloques levantados, la fractura propagante y la lámina térmica. Esta idea, desarrollada por Anguita y Hernán (2000), establece la existencia, bajo Canarias, de zonas calientes asociadas a un penacho térmico residual, activo desde los comienzos de la apertura del Atlántico, hace 200 Ma. Por las características de este último esquema, en donde se consideran los aspectos más favorables de cada una de las teorías anteriores, ha sido denominada hipótesis de síntesis o unificadora. Con todo ello, todavía existen cuestiones por resolver y es por ello, que a pesar de todas las ideas surgidas, el debate sobre el origen de las islas Canarias todavía sigue en pie.

La isla de Tenerife representa la parte emergida de un edificio volcánico cuya base se encuentra en la zona de contacto entre la Placa Atlántica y la Placa Africana. Las Islas Canarias alcanzan una extensión de unos 500 km en dirección este-oeste. La diferenciación insular es consecuencia de la instalación de distintos edificios volcánicos sobre una corteza de tipo oceánico, cuya fracturación a escala regional permitió el ascenso de material subcortical, originando de este modo los distintos edificios.

En el archipiélago se pueden diferenciar dos directrices estructurales principales que tienen su manifestación en la morfología de las islas: la alineación de centros eruptivos y la orientación de redes filonianas de los llamados Complejos Basales.

La primera de estas directrices presenta una alineación N66°E, se manifiesta en la parte occidental del archipiélago y está relacionada con los procesos tectónicos de la placa africana. Sobre ella se encuentran alineadas las islas de El Hierro (la más reciente), La Gomera y Tenerife. Análogamente existe una alineación en la parte oriental que ha propiciado la orientación de las islas de Fuerteventura y Lanzarote.

La segunda directriz estructural presenta una orientación N140°E y se corresponde con las fases de la apertura atlántica, a lo largo de ésta se disponen las islas de La Palma, Tenerife y Gran Canaria.

Todas las islas del archipiélago (Fig. 2-1), pasan, durante su formación, por unas etapas similares a lo largo de su historia y que se reflejan en una serie de grandes unidades volcanoestratigráficas, comunes en todas las islas; si bien, el desarrollo de cada una de ellas se produce en tiempos diferentes en las distintas islas y solo son observables en 3 o probablemente en 4 de las islas. Estas unidades son dos: 1) Complejo Basal y 2) Series volcánicas subaéreas. De ellas, los complejos basales solo son visibles en las islas de Fuerteventura (macizo de Betancuria), La Gomera (caldera de Vallehermoso) y La Palma (caldera de Taburiente). Así mismo, algunos autores han sugerido recientemente, la existencia de complejo basal visible en el Norte de la isla de Tenerife (Taganana), si bien, este último extremo todavía está pendiente de confirmación posterior.

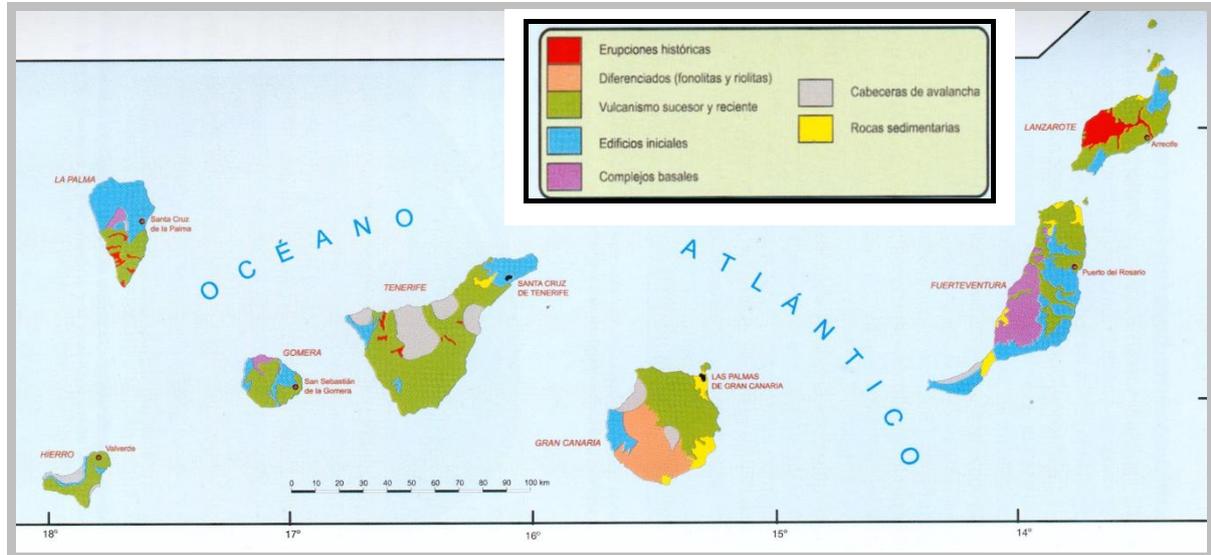


Figura 2-1. Mapa geológico simplificado de las Islas Canarias. Basado en el mapa geológico de España 1:1000000 (IGME, 1994). Tomado de Anguita et al. (2002).

Los complejos basales, unidad más antigua de las islas en las que es visible, comienzan a formarse hace 70 Ma en el fondo oceánico de la futura isla de Fuerteventura, proceso que se extenderá a lo largo de 45 Ma hasta sus últimas manifestaciones de hace 25 Ma. En La Gomera, la

misma unidad se desarrollará entre los 25 a 19 Ma y en La Palma, en torno a los 4 Ma. La característica común de los complejos basales es que están constituidos por rocas plutónicas, lavas submarinas, sedimentos y densos enjambres de diques. Las series volcánicas subaéreas se desarrollan posteriormente sobre los edificios volcánicos submarinos constituyendo desde sus inicios, las áreas emergidas de las islas. Esta segunda gran unidad volcanoesratigráfica se desarrolla en varias etapas, comenzando todas ellas por la construcción de volcanes en escudo hace entre 20 y 15 Ma en las islas orientales y 2 Ma en La Palma y El Hierro. Restos de estos volcanes en escudo son las denominadas series basálticas antiguas o basaltos tabulares de la Serie I. Posteriormente, se suceden dos ciclos volcánicos conocidos en la literatura como Serie Intermedia y Serie Reciente, esta última coronada por las erupciones históricas de los últimos 500 años.

En Tenerife, se distinguen cuatro grandes estructuras o unidades volcanoesratigráficas (Fig. 2-2):

1) Arco de Taganana, formado por materiales submarinos, rocas plutónicas félsicas, un complejo filoniano muy denso con diques básicos y félsicos y brechas tectónicas (anterior a 6 Ma).

2) Basaltos tabulares (entre 11 y 3.5 Ma), visibles en los macizos de Anaga, Teno y Roque del Conde. Este ciclo, dominado por basaltos, aparece coronado, hacia el final, por la emisión de rocas fonolíticas.

3) Edificio Cañadas, estratovolcán formado inicialmente por basaltos y traquibasaltos y coronado finalmente por potentes emisiones fonolíticas (entre 2.5 y 0.15 Ma).

4) Dorsal de La Esperanza, formada por estratovolcanes y conos de cinder alineados a lo largo de una dirección NE-SW (entre 1-0.7 Ma).

5) Conos de cinder y lavas recientes basálticas (desde los últimos 0.15 Ma hasta las erupciones históricas de los 500 años más recientes).

Entre las grandes estructuras volcánicas constructivas, destaca la del complejo estratovolcánico Teide-Pico Viejo con una cota de 3718 m. Este edificio formado desde hace 0.15 Ma, ha crecido en el interior de otra gran estructura de destrucción: la caldera de las Cañadas, de 16 km de diámetro excavada en el edificio Cañadas en varios episodios entre 0.7 y 0.15 Ma. Sobre su génesis todavía persiste el debate entre dos ideas fundamentales: Una es la que liga el origen de la caldera al colapso de la cúpula del edificio Cañadas tras el vaciado parcial de la cámara magmática y la otra es la que explica su origen como debido a grandes deslizamientos catastróficos o “land-slides” hacia el Norte, tras la desestabilización del estratovolcán Cañadas. Otras estructuras destacables son los valles de Güimar y la Orotava (posterior al anterior), grandes depresiones de deslizamiento gravitacional de 10 km de anchura, abiertas al Sur y al Norte respectivamente, excavados a ambos lados del edificio de la dorsal de la Esperanza hace entre 0.7 y 0.5 Ma aproximadamente.

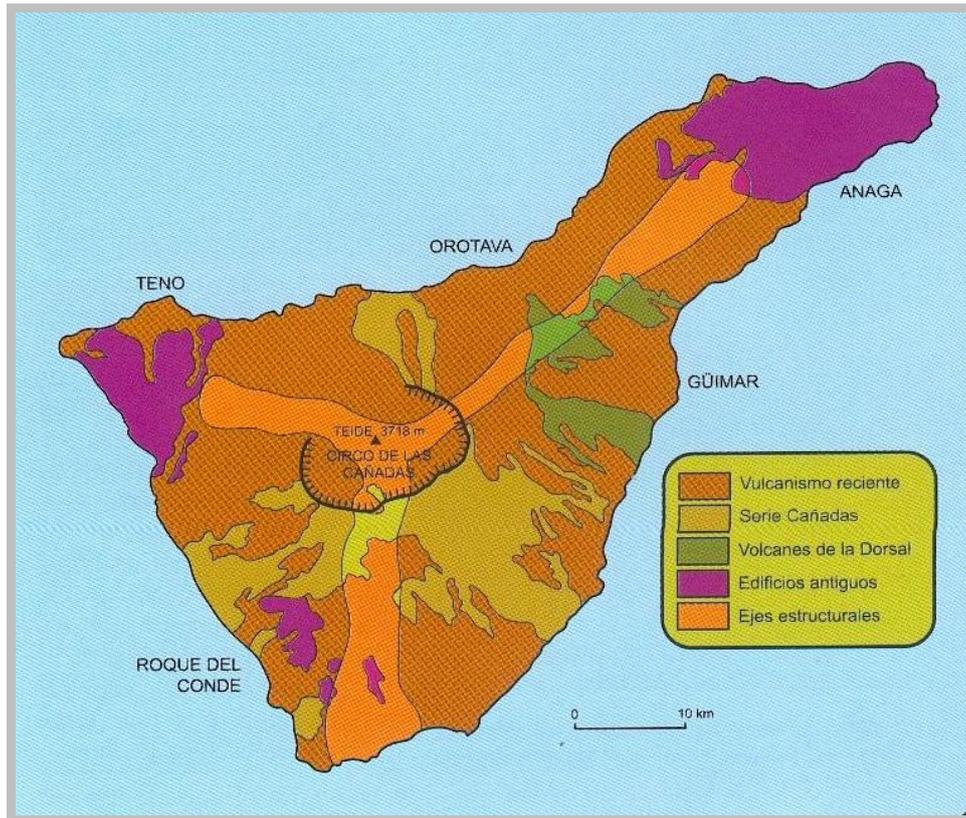


Figura 2-2. Mapa geológico simplificado de Tenerife. Tomado de Anguita et al. (2002).

La historia geológica de Tenerife, donde solamente afloran materiales volcánicos de la serie alcalina, comienza hace unos 35 Ma y su génesis debe asociarse a una fase de la orogenia Alpina que tuvo su época de máxima actividad en el Mioceno. En el área que hoy ocupa el archipiélago, se produjeron en esa época una serie de fracturas y desplazamientos verticales en la corteza que favorecieron la ascensión de magmas y su emisión según las directrices regionales definidas. Esta complejidad vulcanológica se manifiesta en dos grandes fases:

- La fase submarina; caracterizada por una presencia de materiales volcánicos submarinos, intrusiones plutónicas y una densa red de diques que confieren una gran complejidad a lo que se denomina Complejo Basal, que no aflora en Tenerife, pero sí en otras islas del archipiélago. A este conjunto se le asocian a su vez, depósitos marinos de edad Cretácico.
- La fase subaérea; en esta fase se producen episodios volcánicos subaéreos que dan lugar a un depósito de materiales discordantes sobre el Complejo Basal. Estos depósitos subaéreos son los que forman la isla propiamente dicha. Esta fase es además, la que contiene las series tradicionalmente se han distinguido en la isla.

La dificultad de localización (y en algunos casos existencia) de discontinuidades erosivas a nivel regional junto con la escasez de controles geocronológicos precisos,

contribuyen a la dificultad de establecer series volcánicas bien definidas por lo que los materiales que forman el sustrato volcánico sólo se pueden clasificar; bien en función de su litología o bien en función de su edad; así se forman varios conjuntos, representando cada uno de ellos un episodio de la actividad volcánica en la isla. Siguiendo estos criterios, se han reconocido cuatro episodios eruptivos o series en los que se repiten las litologías y que se diferencian entre ellos por sus edades relativas. Cada serie se corresponde con unidades volcanológicas que a falta de datos paleontológicos, se han establecido en base a criterios empíricos apoyados por técnicas paleomagnética y dataciones absolutas.

Las series establecidas en Tenerife por Carracedo et al. (1979) son muy desiguales en el tiempo que abarcan, y presentan imprecisiones y solapamientos en sus límites. Ordenadas por su antigüedad relativa son las siguientes:

- Serie I (o Antigua): caracterizada por la superposición de coladas basálticas con intercalaciones de mantos piroclásticos de tamaño y espesor variables y frecuentes zonas rubefactadas, denominadas “almagres”. Generalmente estos materiales aparecen muy alterados.

- Serie II: está constituida por un apilamiento de lavas y piroclastos basálticos de 600-800 m de potencia, que al contrario que la Serie anterior, conservan buena parte de la porosidad primaria. Destacan los basaltos tipo “pahoe-hoe”, si bien se presentan pumitas, traquibasaltos y fonolitas principalmente, asociándose términos ignimbríticos y piroclásticos. A esta serie se la ha denominado, en ocasiones, Serie Cañadas si está formada fundamentalmente por fonolitas, de espesores de hasta 1000 m de potencia, que aparecen en la parte central de la isla y donde es común la alteración hidrotermal tipo Azulejos.

- Serie III (o Reciente): en general, se presentan potentes coladas volcánicas basálticas a muro y traquibasaltos y fonolitas máficas a techo, sobre los que se apoyan, en ocasiones, materiales piroclásticos. Asociados a estos materiales aparecen tobas pumíticas de gran porosidad.

Esta serie está bien representada en toda la isla, y en particular en la ciudad, con basaltos y pumitas que afloran como manchas dispersas, semicubiertas por las coladas basálticas más recientes.

En Santa Cruz de Tenerife (Fig. 2-3), excepcionalmente, aparecen coladas muy potentes del tipo pahoe-hoe, con espesores que pueden superar los 10 m., éstas coladas, frecuentemente, dan basaltos masivos y vacuolares.

Las coladas pahoe-hoe pueden presentar numerosísimos tubos volcánicos de gran longitud y desarrollo, que pueden aparecer en coladas superficiales o muy profundas; éstos tubos volcánicos pueden superar los 3 m. de diámetro, lo que hace que este terreno se vuelva permeable. Las coladas se presentan con los techos escoriáceos aún sin meteorizar, o poco meteorizados, de modo que en un corte vertical se ve una auténtica alternancia de escorias y coladas compactas. Su disposición es horizontal o subhorizontal, con la pendiente hacia el E y

SE, es decir, hacia el mar. Las coladas presentan una amplia gama en cuanto a estructura y potencia, predominando las capas delgadas y escoriáceas tipo a-a, y a veces con carácter aglomerático.

- Serie IV (o Histórica): destacan las coladas basálticas donde se conservan los “malpaíses” con escasos procesos edafológicos y materiales piroclásticos pobremente cementados que dan lugar a los edificios volcánicos y conos de cinder recientes.

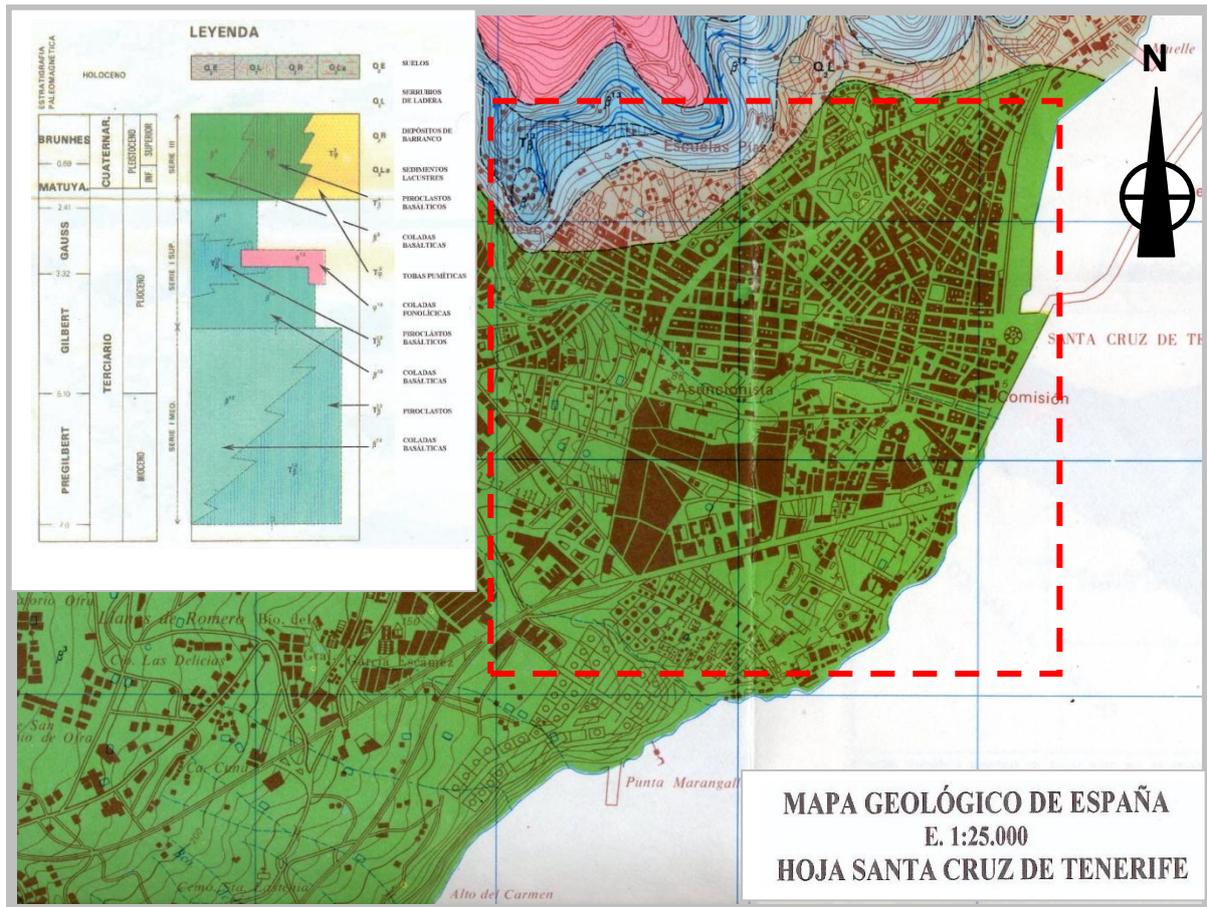


Figura 2-3. Mapa Geológico del centro de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife tomado de la hoja 1.104-1.105: Carracedo et al. (IGME, 1979). El recuadro representa la zona objeto de estudio.

En síntesis, las principales características geológicas de la isla de Tenerife, son las siguientes:

A) El sustrato principal de las islas se halla constituido por materiales de origen volcánico: coladas, piroclastos, ignimbritas, tobas, etc. Dichos materiales forman edificios volcánicos secundarios de diversa entidad o bien forman estructuras con forma de manto de gran extensión.

B) Las litologías predominantes son: las coladas basálticas, traquibasálticas y fonolíticas, las ignimbritas, los depósitos de piroclastos, los aglomerados volcánicos, las tobas

y los conos de piroclastos. Estos últimos forman edificios volcánicos secundarios de tamaño variable.

C) Independientemente de los procesos volcánicos, sobre el sustrato principal, se han desarrollado depósitos formados por agentes externos, procesos erosivos y gravitacionales, dando como resultado depósitos de relleno de fondo de valle y barranco, depósitos de ladera o suelos de alteración. En general, estos depósitos son de poca entidad en comparación con los formados por los procesos volcánicos.

Características hidrogeológicas de los litotipos de las Islas Canarias

En las Islas Canarias, la naturaleza y estructura de las rocas volcánicas configura un territorio en el que existe un apilamiento de materiales que van desde los muy compactos hasta los que presentan una porosidad que puede superar el 50%, desde los que tienen las cavidades totalmente conectadas hasta aquellos que, aún pudiendo ser muy porosos, tienen sus poros aislados unos de otros, desde los que no presentan grietas hasta aquellos que poseen un elevado índice de cavidades debidas a la fisuración. Así, los pozos en rocas volcánicas a veces pueden dar caudales muy importantes con pequeños descensos del nivel según Custodio (1978), pero en la misma formación y a escasa distancia pueden ser prácticamente estériles según Custodio y Llamas (1976).

Desde el punto de vista hidrogeológico tiene interés la estructura vertical de las coladas de lava, ya que influye notablemente en el flujo del agua a su través. De forma general, se puede distinguir una zona brechoide de base, formada por el frotamiento de la lava con el terreno. Es una zona grosera, heterométrica, escoriácea, con bloques y pedazos de lava sólida hundidos y fragmentos del terreno, bajo la cual pueden haberse producido efectos térmicos en los materiales preexistentes.

Esta zona brechoide va desapareciendo hacia la parte superior para dar lugar a un material compacto, cuya porosidad es reducida, dependiendo de la facilidad de escape del gas ocluido y disuelto, y que a veces puede llegar a ser cristalina en el centro de coladas muy espesas, debido a ese lento enfriamiento. Ya cerca de la superficie, y dependiendo del tipo de lava, puede formarse una zona muy escoriácea y vesicular debido al escape de los gases, con porosidades totales de hasta el 60% o más, aunque no siempre los poros están conectados.

En el proceso de enfriamiento, tanto más cuanto más lento sea y más alta la temperatura inicial, la lava se contrae, dando lugar a la aparición de grietas de retracción verticales (disyunción columnar), bien desarrolladas en la parte central de las coladas.

También pueden existir diaclasas horizontales, paralelas al flujo de la lava, principalmente a un tercio de la base en coladas potentes.

Como rasgos secundarios se puede citar la existencia de pequeños tubos en la base de las coladas, originados en las deformaciones transversales de la lava en su reptación, y a la existencia de pequeñas cavidades tubulares verticales originadas por el escape localizado de gases.

Si entre erupción y erupción ha transcurrido suficiente tiempo, se puede haber formado un suelo (incipiente o desarrollado), más o menos arcilloso, que es recocado al ser cubierto por la colada caliente, dando lugar a una capa rojiza (almagre), cuyo espesor y desarrollo es variable según la topografía y el clima, adquiriendo gran importancia sobre niveles de piroclastos finos. Sin embargo, no siempre estos almagres son paleosuelos recocidos, sino que son las capas superiores de niveles piroclásticos poco alterados que han estado sometidos primeramente al efecto de los gases húmedos y calientes que se desprendieron de ellos mismos durante su emplazamiento y al efecto térmico de la colada que los recubre.

Con el transcurso del tiempo, las cavidades de las coladas volcánicas tienden a cerrarse, las mayores por colapso y derrumbamiento y las menores por relleno químico a partir de fluidos circulantes, y las diaclasas tienden a colmatarse. Por ello, la edad de las formaciones tiene un efecto importante en su comportamiento hidrogeológico.

A pequeña escala, los materiales que conforman Tenerife (lavas, piroclastos, diques,...) son muy heterogéneos, tanto en composición como en geometría, además de su variabilidad temporal y grado de fracturación o meteorización que los afecta, por lo que se puede considerar que su comportamiento depende de:

- Las características de la roca, que ser muy heterogéneas.
- Los procesos secundarios que afectan a la roca (alteración, compactación, etc.)
- La presencia de fracturas secundarias, inducidas por fenómenos volcanotectónicos.

En general, puede considerarse que cuanto más moderno es un material volcánico, mayor es su permeabilidad, pues mantiene una elevada porosidad interconectada y permeabilidad (se exceptúan aquellas facies que por su composición y textura son de baja permeabilidad). Por otro lado, cuanto más antiguo es un material, la meteorización y consolidación por carga litostática hacen reducir el volumen de huecos y porosidad interconectada, lo que reduce drásticamente la permeabilidad. A su vez, cuanto mayor es el grado de fracturación de las litologías, mayor es la permeabilidad secundaria y capacidad de almacenamiento del macizo.

Si se exceptúan algunos acuíferos detríticos cuaternarios situados en los aluviales de los principales barrancos, que producen caudales importantes, el bloque insular presenta, con las debidas singularidades, un sistema multiacuífero complejo en los materiales de las Series II y III cuando están saturados (fundamentalmente lavas y piroclastos).

La Serie I se considera un medio de baja permeabilidad, aunque localmente puede suministrar ciertos caudales y la parte superior de la Serie III y la Serie IV no suelen estar saturadas, a pesar de tener una gran capacidad de infiltración, lo que favorece la recarga del acuífero insular ubicado en niveles más profundos.

En ocasiones, a partir de eventos tormentosos, se crean acuíferos locales de escasa entidad, la gran mayoría efímeros, a partir de niveles de base, como pueden ser los almagres. En otras condiciones, estos acuíferos, generalmente localizados a bastante altitud, conforman niveles cuasiperennes que alimentan un conjunto de manantiales o nacientes como se conocen localmente, de marcada estacionalidad en caudal, y que son captados para aprovechamiento hídrico.

Existe una gran variabilidad de los parámetros hidrogeológicos de las formaciones acuíferas. Así, la porosidad puede oscilar entre el 1-5% para la mayoría de lavas, mientras que en los piroclastos este valor puede oscilar entre el 15-30%.

La transmisividad también presenta una dispersión muy elevada con lo que se puede establecer un intervalo medio entre $50 < T < 1\ 500\ \text{m}^2/\text{día}$, localmente superiores según los condicionantes anteriormente expuestos.

En el caso de los aluviales, estos se consideran un medio poroso clásico y, dependiendo de la fracción granulométrica de finos presente, se puede obtener porosidades drenables entre un 10-20%, con trasmisividades medias entre $300\text{-}2.500\ \text{m}^2/\text{día}$, localmente superiores.

Contexto sismotectónico

Diversos documentos históricos ratifican la ocurrencia de terremotos en el archipiélago, quedando reflejados en los escritos de los habitantes de las islas y precedidos en la mayor parte de los casos de actividad volcánica de diferentes tipos y duración (desde días hasta meses).

Los datos instrumentales comienzan a ser adquiridos desde mediados de los años setenta con el despliegue de una red de detección sísmica que recoge los datos de terremotos de menor magnitud e intensidad que antiguamente no podían ser detectados. En el archipiélago, la mayor concentración de terremotos se localiza entre las islas de Tenerife y Gran Canaria (Fig. 2-4).

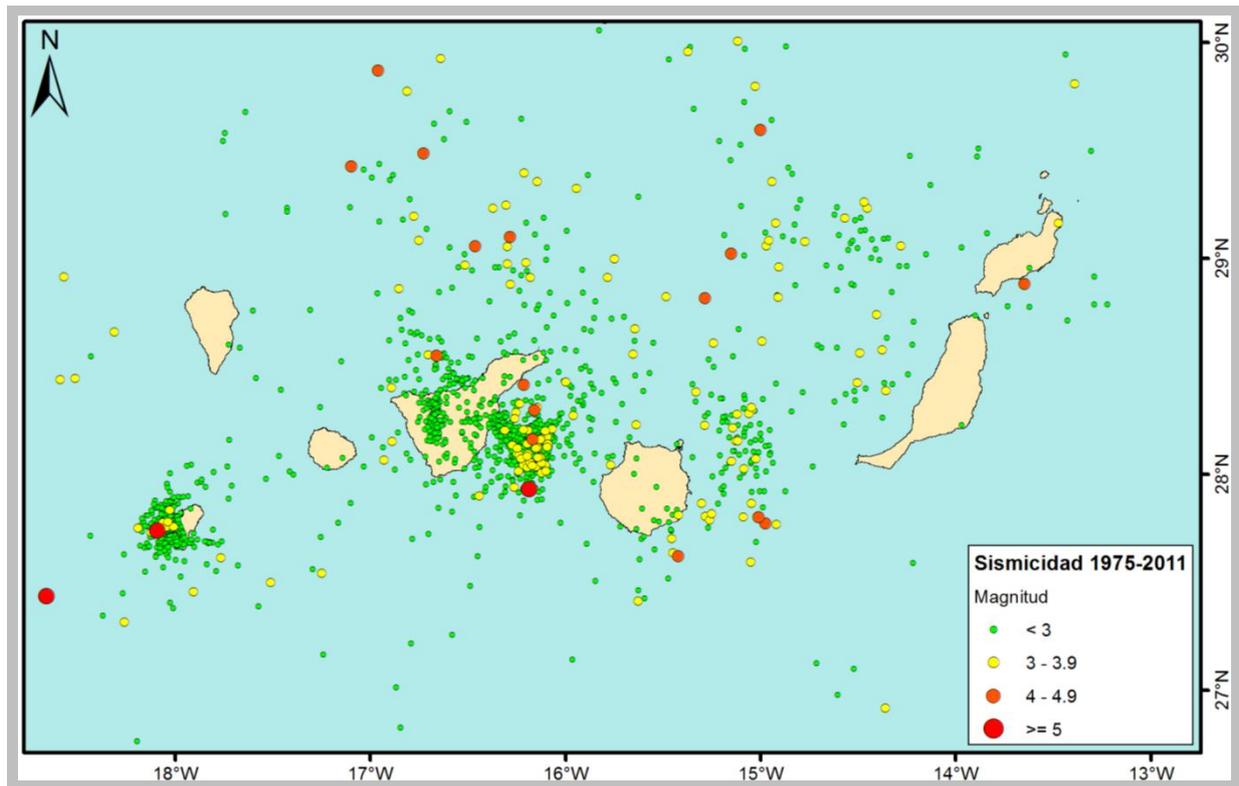


Figura 2-4. Mapa de sismicidad de Canarias 1975- 2011.

La sismicidad en la isla de Tenerife (al igual que en el resto de islas) está asociada principalmente a la actividad volcánica. Las zonas de mayor sismicidad y concentración de terremotos indican la existencia de fracturas aún activas que se prolongan en profundidad pero, también se reconocen zonas de falla de menor actividad (Fig. 2.5).

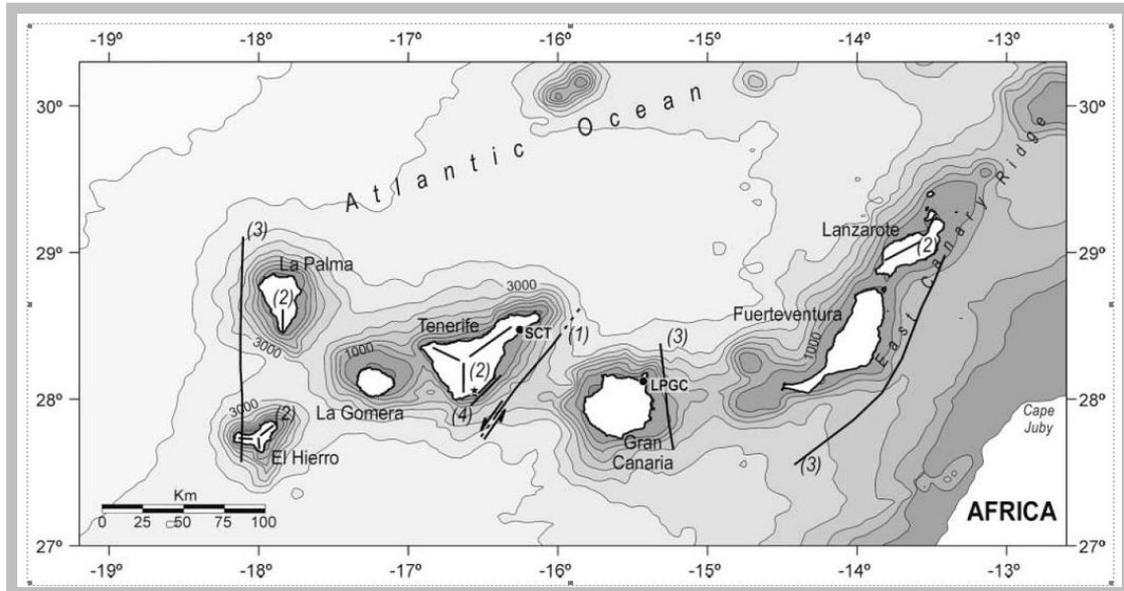


Figura 2.5. Principales lineaciones y características tectovolcánicas de las Islas Canarias. Los números hacen referencia a diferentes trabajos de autores sobre dichas estructuras. Toponimia: Santa Cruz de Tenerife (STC), Las Palmas de Gran Canaria (LPGC). Las estrellas marcan los indicios de paleolicuefacción descritos por González de Vallejo et al. (2003). Tomada de Gonzalez de Vallejo et al. (2006).

En el campo de la construcción, el Documento Básico SE-C establece en el apartado 3.3 sobre Contenido del estudio geotécnico, punto 4, la obligatoriedad de considerar la Norma Sismoresistente NCSR-02 para edificios a partir de aceleraciones básicas de cálculo de $0,08g$. El Anejo 1 de dicha norma establece para la provincia de Santa Cruz de Tenerife una aceleración de $0,04g$. En el apartado 1.2.3. se establece la No Obligatoriedad de su aplicación aún cuando la aceleración sea de $0,04g$, salvo que el terreno sea potencialmente inestable. En el presente caso, el terreno no entra en esta categoría, pues se trata de un macizo rocoso compacto que no puede dar lugar a fenómenos de inestabilidad, amplificación o licuefacción de suelos, por su inexistencia.

En la figura 2-6 se muestra la peligrosidad sísmica para periodos de retorno de 475 y 950 años.

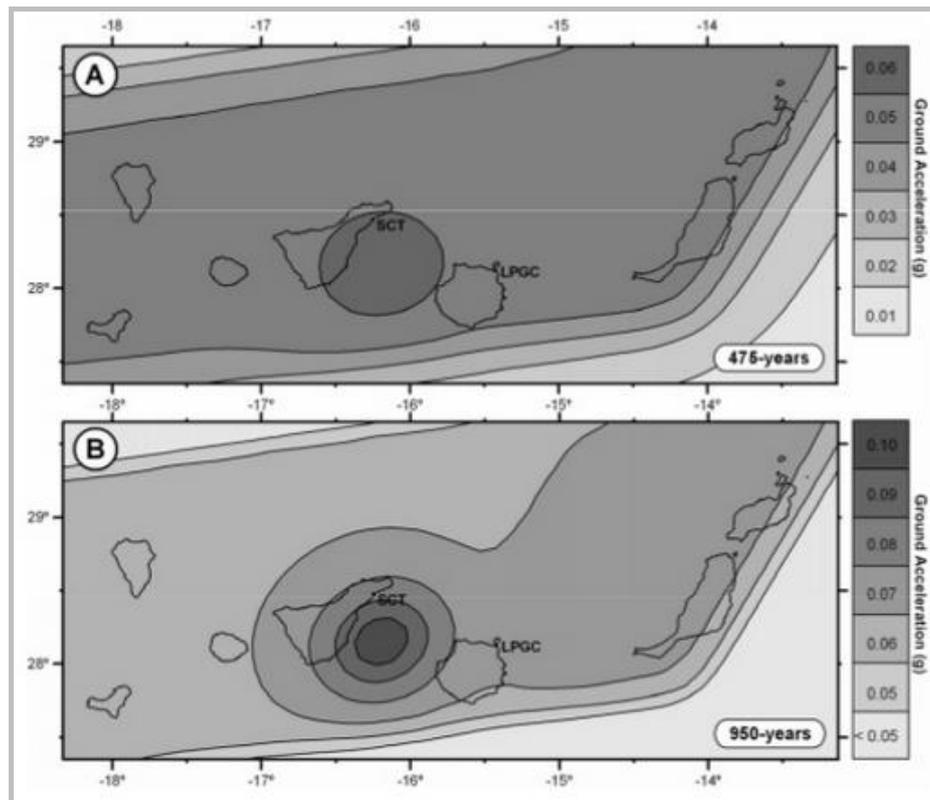


Figura 2-6. Mapas de peligrosidad sísmica de las Islas Canarias (A) a 475 años y (B) a 950 años. En los mismos se muestran los valores de aceleración del terreno en valores de gravedad. Tomado de González de Vallejo, et al. (2006).

3.- CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

En este apartado se pretenden sintetizar las principales características geotécnicas de los materiales del subsuelo de la ciudad. Se hará un repaso a la clasificación de los materiales volcánicos de Canarias, el mapa geotécnico de Santa Cruz de Tenerife, indicando los estudios de prospección del terreno realizados para llegar al reconocimiento unidades geotécnicas propias del centro de la ciudad.

Criterios de clasificación y litotipos de los materiales volcánicos de las Islas Canarias

Los materiales rocosos altamente cohesivos de las Islas Canarias se han clasificado en varios litotipos en función de los siguientes criterios según Rodríguez Losada et al. (2009):

- 1) Criterio litológico. Basado en la composición químico-mineralógica de las rocas. En el Archipiélago Canario la litología dominante es mayoritariamente basáltica en todas las islas. A esto hay que añadir la extraordinaria complejidad geológica de las islas centrales (Gran Canaria y Tenerife) donde además de los materiales mencionados, afloran en una proporción muy importante rocas de composición intermedia (traquibasaltos) y sálicas (traquitas y fonolitas). Así mismo, es también muy destacable en estas dos islas la existencia de ignimbritas de composición fonolítica y con texturas muy variadas.
- 2) Criterio textural. Basado en las características de los minerales que constituyen las rocas volcánicas, así como de sus tamaños. Los tipos de texturas presentes en los distintos tipos litológicos son los que se definen a continuación:
 - Afanítica: sin cristales visibles. Presente en materiales basálticos, traquibasálticos, traquíticos y fonolíticos.
 - Porfídica: con cristales visibles rodeados por una matriz micro o criptocristalina. Presente también en materiales basálticos y en los que los cristales visibles, pueden ser de augita y olivino (basaltos olivínico-piroxénicos) o de plagioclasa (basaltos plagioclásicos). También se puede encontrar olivino como mineral principal observable (picritas), si bien a efectos de definir litotipos, éstas pueden quedar integradas en el grupo de los olivínico-piroxénicos.
 - Traquítica: propia de los términos traquíticos y fonolíticos, así llamada porque es el tipo de textura dominante en la mayoría de rocas de composición traquítica. Se caracteriza por la presencia de cristales visibles, fundamentalmente de feldespato sódico-potásico, piroxeno o anfíboles, rodeados por una matriz de pequeños cristales orientados o dispuestos al azar (afieltrados), de similar naturaleza.

- 3) Vesicularidad. Basado en la presencia o ausencia de vacuolas en el material rocoso. Dichas vacuolas se corresponden con burbujas de gas contenidas en la lava y que durante su desarrollo y migración hacia la superficie de la colada, quedaron atrapadas tras completarse el proceso de solidificación.
- 4) Estado de cementación. Conduce a materiales piroclásticos con los fragmentos débilmente cohesionados o completamente sueltos.

Los materiales piroclásticos débilmente cementados, pueden aparecer completamente sueltos o bien con una cierta cohesión entre los fragmentos debido a procesos de soldadura débil. En este caso, los criterios utilizados para su división en litotipos son los siguientes:

- 1) Criterio litológico. Basado en la composición químico-mineralógica de los piroclastos. Se han diferenciado dos grandes grupos, los basálticos, de tonalidades oscuras o rojizas y los sálicos, de tonalidades más claras.
- 2) Tamaño de los piroclastos. De mayor a menor tamaño, los piroclastos se clasifican en escorias, lapilli o cenizas en el caso de los basálticos o en pómez o cenizas en el caso de los sálicos.

A partir de dichos criterios se establece la clasificación de litotipos (Tabla 3-1) reflejada a continuación:

Tabla 3-1. Principales litotipos de las Islas Canarias.

ROCAS	BASALTOS (B)	OLIVÍNICO-PL ROKÉNICOS (OP)	VACUOLARES (V)	B-OP-V
			MASIVOS (M)	B-OP-M
		PLAGIOCLÁSICOS (PL)	VACUOLARES (V)	B-PL-V
			MASIVOS (M)	B-PL-M
		AFANÍTICOS (AF)	VACUOLARES (V)	B-AF-V
	MASIVOS (M)		B-AF-M	
	ESCORIÁCEOS (ES)			B-ES
	TRAQUIBASALTOS (TRQB)			TRQB
	TRAQUITAS (TRQ)			TRQ
	FONOLITAS (FON)			FON
IGNIMBRITAS (IG)	SOLDADAS		IG-S	
	NO SOLDADAS		IG-NS	
PIROCLASTOS	PIROCLASTOS BASALTICOS	LAPILLI (LP)	SUELTO (S)	LPS
			CEMENTADO (T)	LPT
		ESCORIAS (ES)	SUELTO (S)	ESS
			CEMENTADO (T)	EST
	CENIZAS BASÁLTICAS (CB)	SUELTO (S)	CBS	
		CEMENTADO (T)	CBT	
	PIROCLASTOS SÁLICOS	PÓMEZ (PZ)	SUELTO (S)	PZS
			CEMENTADO (T)	PZT
		CENIZAS SÁLICAS (CS)	SUELTO (S)	CSS
			CEMENTADO (T)	CST

Características geotécnicas Santa Cruz de Tenerife

La comunidad Canaria cuenta con un Mapa Geotécnico elaborado por el IGME que establece una zonificación geotécnica de todo el territorio insular. Es necesario considerar las limitaciones que la escala y naturaleza de los materiales establecen, habiéndose definido áreas de comportamiento geotécnico homogéneo, que incluyen varias unidades geotécnicas. A efectos de planificación del reconocimiento geotécnico, se asume tendrán un tratamiento similar.

La hoja 91, sección 10/10-11 del citado Mapa Geotécnico correspondiente a Tenerife, situando a la capital en las áreas I₁ y II₃ (Fig. 3-1). El subsuelo urbano presenta las siguientes características generales en función del área a la que pertenezca.

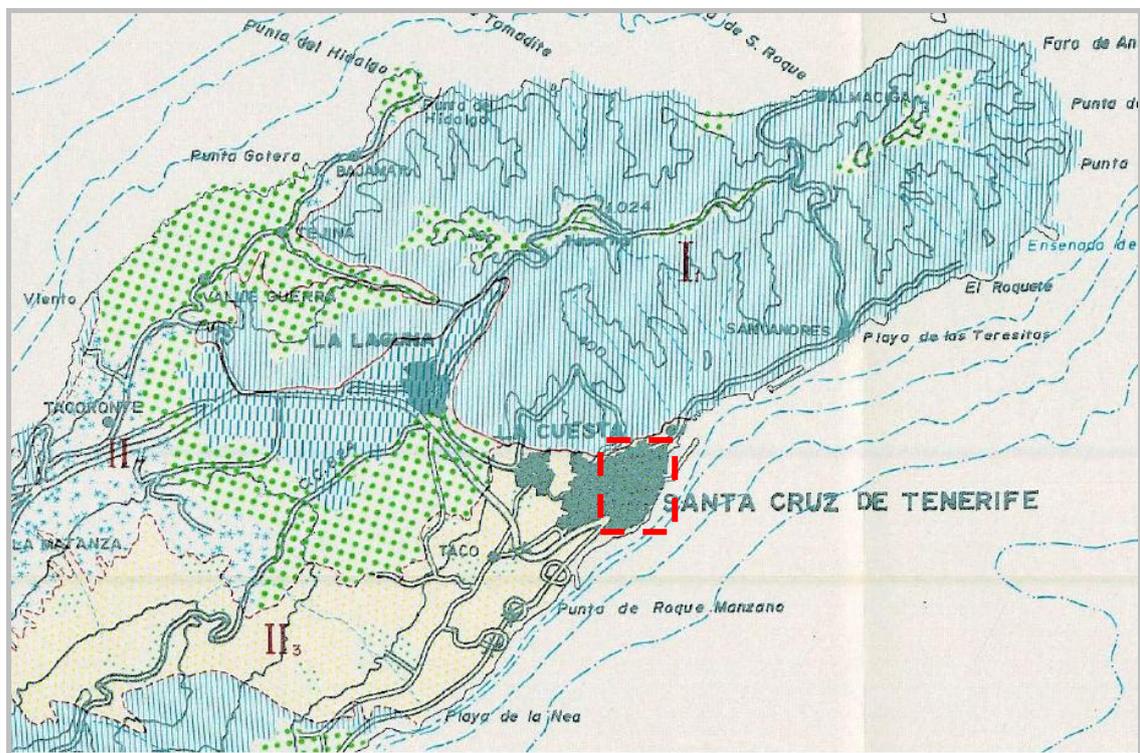


Figura 3-1. Mapa geotécnico que muestra la ubicación de la ciudad en la zona I₁ y II₃. Tomado del mapa geotécnico general 1:200000, Hoja 91, (IGME, 1974). Área del recuadro en rojo.

Para el área I₁:

- Comprende parte del macizo de Anaga, formado por materiales basálticos y piroclástos soldados (tobas) de las Series Antiguas (I y II). Su modelado es de gran irregularidad morfológica, ocasionando fuertes desniveles con pendientes mayores del 30%.
- La permeabilidad es notable, gracias a las juntas y diaclasas que afectan al macizo, si bien la porosidad eficaz textural de los materiales es media a baja (mayor en las tobas). El drenaje superficial y, el profundo se hallan bien desarrollados.

- Los suelos eluvio-coluvionales cubren pequeñas zonas y presentan capacidad de carga baja.

Para el área II₃:

- El sustrato está formado principalmente por materiales basálticos (coladas y piroclastos) de la denominada Serie III.
- Presenta una red de drenaje superficial bien desarrollada, con cauces subparalelos algo encajados. El drenaje profundo presenta enclaves con desagüe difícil o impedido. La permeabilidad del sustrato es alta, en general, a través de juntas de enfriamiento y otras fracturas.
- Tanto las capas escoriáceas como las masas piroclásticas presentan una capacidad de carga calificada cualitativamente como buena/alta. Las capas rocosas constituyen un excelente sustrato en cuanto a resistencia y dureza.

Una vez analizados los sondeos y los materiales extraídos del terreno, se propone una zonación geotécnica más elaborada para la zona investigada (Fig. 3-2), donde se muestran los puntos investigados y la división propuesta por el mapa geotécnico consultado.

- Zona I₁ del subsuelo correspondiente al Grupo del Terreno tipo T-3 (en azul), donde se reconocen las siguientes unidades geotécnicas:
 - Macizo basáltico alterado.
 - Depósitos aluviales y coluviales.
 - Rellenos antrópicos.

La zona I₁ presenta poca variabilidad, las zonas más altas corresponden al macizo basáltico alterado, al pie de este, se localizan depósitos aluviales y coluviales y rellenos antrópicos pertenecientes a antiguas labores de cultivo.

- Zona II₃ donde el subsuelo corresponde a los Grupos del Terreno T-1, T-2 y T-3 (en amarillo), donde se reconocen las siguientes unidades geotécnicas:
 - Coladas basálticas sanas (tipo “aa” y “pahoehoe”).
 - Materiales piroclásticos (tobas y depósitos sueltos o débilmente cementados)
 - Depósitos aluviales y coluviales.
 - Rellenos antrópicos.
 - Suelos arenosos.

La zona II₃ presenta mayor dispersión, tanto vertical como horizontal, de las unidades geotécnicas reconocidas. De manera general, se puede decir que bajo el subsuelo se reconocen coladas basálticas, con tobas volcánicas intercaladas que se apoyan sobre los depósitos aluviales y coluviales (reconocidos entre el Barranco de Los Santos y el Macizo de Anaga). Puntualmente, se reconocen suelos arenosos y depósitos piroclásticos basálticos.



Figura 3-2. Zonificación geotécnica propuesta.

Características geotécnicas del subsuelo de Santa Cruz de Tenerife

- Estudios de prospección del terreno

Para mejorar la caracterización geotécnica de los materiales que componen el subsuelo de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife se cuenta la información proporcionada por 93 sondeos distribuidos en 30 puntos de reconocimiento (Tabla 3-2).

El sistema de perforación empleado en todos los casos fue el de rotación con extracción continua de núcleos de perforación, lo que permite obtener muestras de roca para su ensayo en laboratorio, así como para determinar parámetros geomecánicos tales como: grado de meteorización, índice de fracturación y R.Q.D.

Las profundidades máximas alcanzadas fueron diferentes según la zona de la ciudad y de la utilidad de los sondeos realizados, siendo de unos 20 m.

Tabla 3-2. Distribución de los sondeos con las profundidades máximas alcanzadas.

Nº PUNTO DE RECONOCIMIENTO	NÚMERO SONDEOS	TOTAL METROS	PROFUNDIDAD MAX
1	2	16	8
2	2	12	6
3	2	14	7
4	2	8	4
5	2	10	5
6	2	14	7
7	2	34	17
8	8	67	9
9	2	12	6
10	3	21	7
11	2	12	6
12	2	12	6
13	2	12	6
14	2	13	9
15	2	20	10
16	2	28	14
17	2	14	7
18	4	32	12
19	6	45	9
20	2	18	9
21	2	10	5
22	2	10	5
23	7	57	9
24	5	30	6
25	3	30	10
26	2	24	12
27	7	35	5
28	3	25	9
29	8	160	20
30	1	12	12
Total =	93	807	

Unidades geotécnicas

En la comunidad de las Islas Canarias se ha publicado recientemente una Guía para la planificación y realización de estudios geotécnicos para la edificación la cual realiza una propuesta de diez unidades geotécnicas y su correspondencia con los grupos del terreno según el CTE (Tablas 3-3 y 3-4).

Tabla 3-3. Unidades Geotécnicas propuestas para Canarias. Extraído de la Guía para la planificación y realización de estudios geotécnicos para la edificación en la comunidad autónoma de Canarias (GETCAN-011).

Unidad	Subunidad	Terreno CTE
Unidad I: Complejos basales		T3
Unidad II: Coladas y macizos sálicos		T1
Unidad III: Macizos basálticos alterados		T3
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Coladas "aa" poco escoriáceas	T1
	IVb: Coladas "pahoe" y "aa" muy escoriáceas	T3
Unidad V: Materiales piroclásticos	Va: Ignimbritas y tobas	T2
	Vb: Depósitos piroclásticos sueltos o débilmente cementados	T3
Unidad VI: Materiales brechoides		T2
Unidad VII: Depósitos aluviales y coluviales		T3
Unidad VIII: Suelos arenosos		T3
Unidad IX: Suelos arcillosos y/o limosos		T3
Unidad X: Rellenos antrópicos		T3

Tabla 3-4. Grupos del terreno según el CTE. Extraído de la Guía para la planificación y realización de estudios geotécnicos para la edificación en la comunidad autónoma de Canarias (GETCAN-011).

Grupo	Descripción		
T-1	Terrenos favorables: Aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa mediante elementos aislados.		
T-2	Terrenos intermedios: Los que presentan variabilidad, o que en la zona no siempre se recurre a la misma solución de cimentación, o en los que se puede suponer que tienen rellenos antrópicos de cierta relevancia, aunque probablemente no superen los 3,0 m.		
T-3	<p>Terrenos desfavorables: Los que no pueden clasificarse en ninguno de los tipos anteriores. De forma especial se considerarán en este grupo los siguientes terrenos:</p> <table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> a) Suelos expansivos b) Suelos colapsables c) Suelos blandos o sueltos d) Terrenos kársticos en yesos o calizas e) Terrenos variables en cuanto a composición y estado f) Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m </td> <td style="vertical-align: top; padding-left: 20px;"> <ul style="list-style-type: none"> g) Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos h) Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades i) Terrenos con desnivel superior a 15° j) Suelos residuales k) Terrenos de marismas </td> </tr> </table>	<ul style="list-style-type: none"> a) Suelos expansivos b) Suelos colapsables c) Suelos blandos o sueltos d) Terrenos kársticos en yesos o calizas e) Terrenos variables en cuanto a composición y estado f) Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m 	<ul style="list-style-type: none"> g) Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos h) Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades i) Terrenos con desnivel superior a 15° j) Suelos residuales k) Terrenos de marismas
<ul style="list-style-type: none"> a) Suelos expansivos b) Suelos colapsables c) Suelos blandos o sueltos d) Terrenos kársticos en yesos o calizas e) Terrenos variables en cuanto a composición y estado f) Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m 	<ul style="list-style-type: none"> g) Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos h) Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades i) Terrenos con desnivel superior a 15° j) Suelos residuales k) Terrenos de marismas 		

En el subsuelo del centro de la ciudad se han reconocido las siguientes unidades:

- Coladas basálticas sanas.
- Macizos basálticos alterados.
- Materiales piroclásticos.
- Depósitos aluviales y coluviales.
- Suelos arenosos.
- Rellenos antrópicos.

Los rellenos antrópicos detectados (Fig. 3-3), generalmente, son de poca potencia y están asociados principalmente a antiguas labores agrícolas.

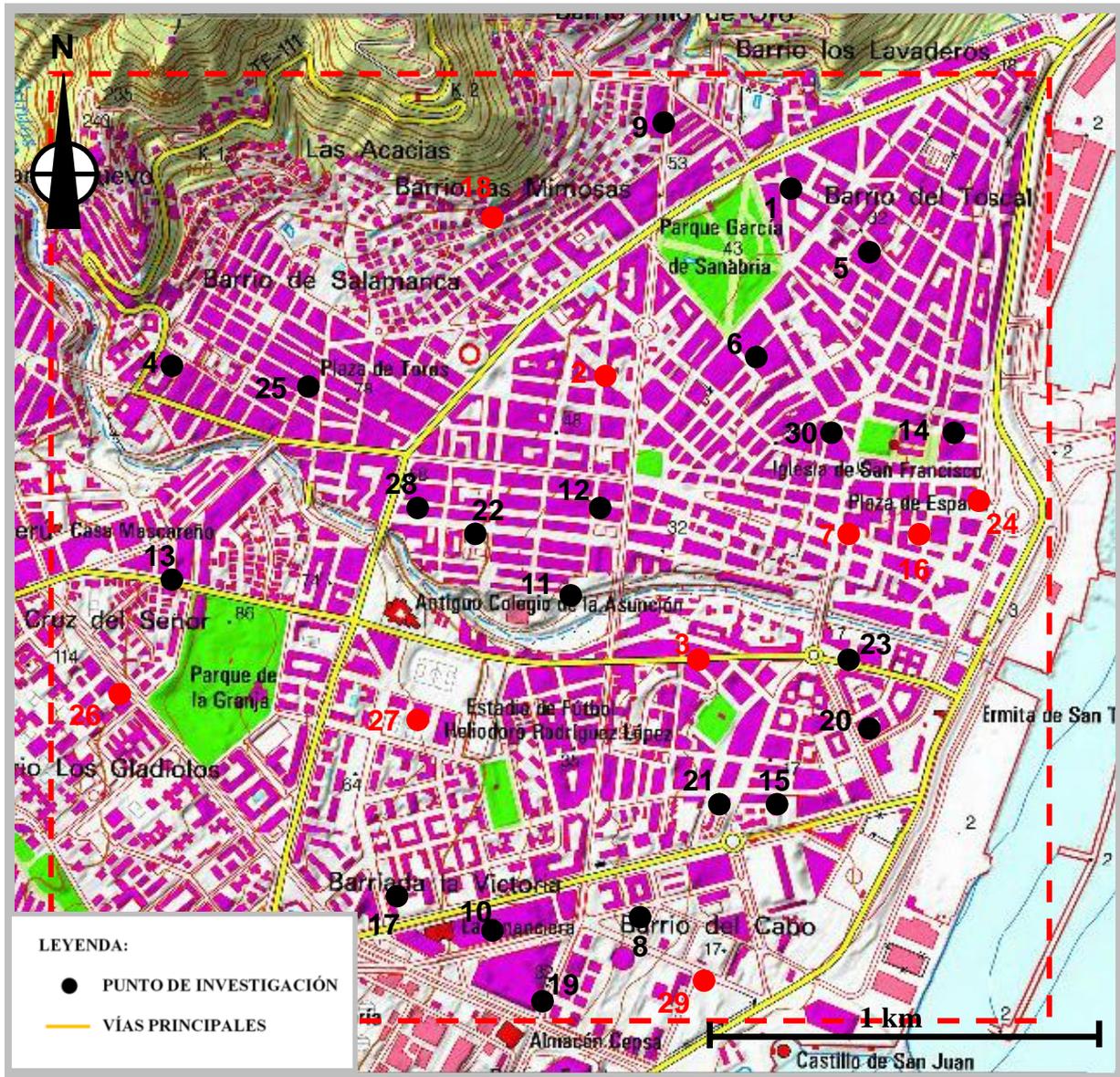


Figura 3-3. Localización de los puntos de reconocimiento donde se han detectado Rellenos antrópicos. (representados por puntos en tono rojo).

Los depósitos aluviales y coluviales (Fig. 3-4) se reconocen en zonas localizadas, todas ellas, zonas próximas a la línea de costa, aunque no se descarta la existencia de los mismos en otras zonas donde no se ha profundizado por debajo de las coladas basálticas.

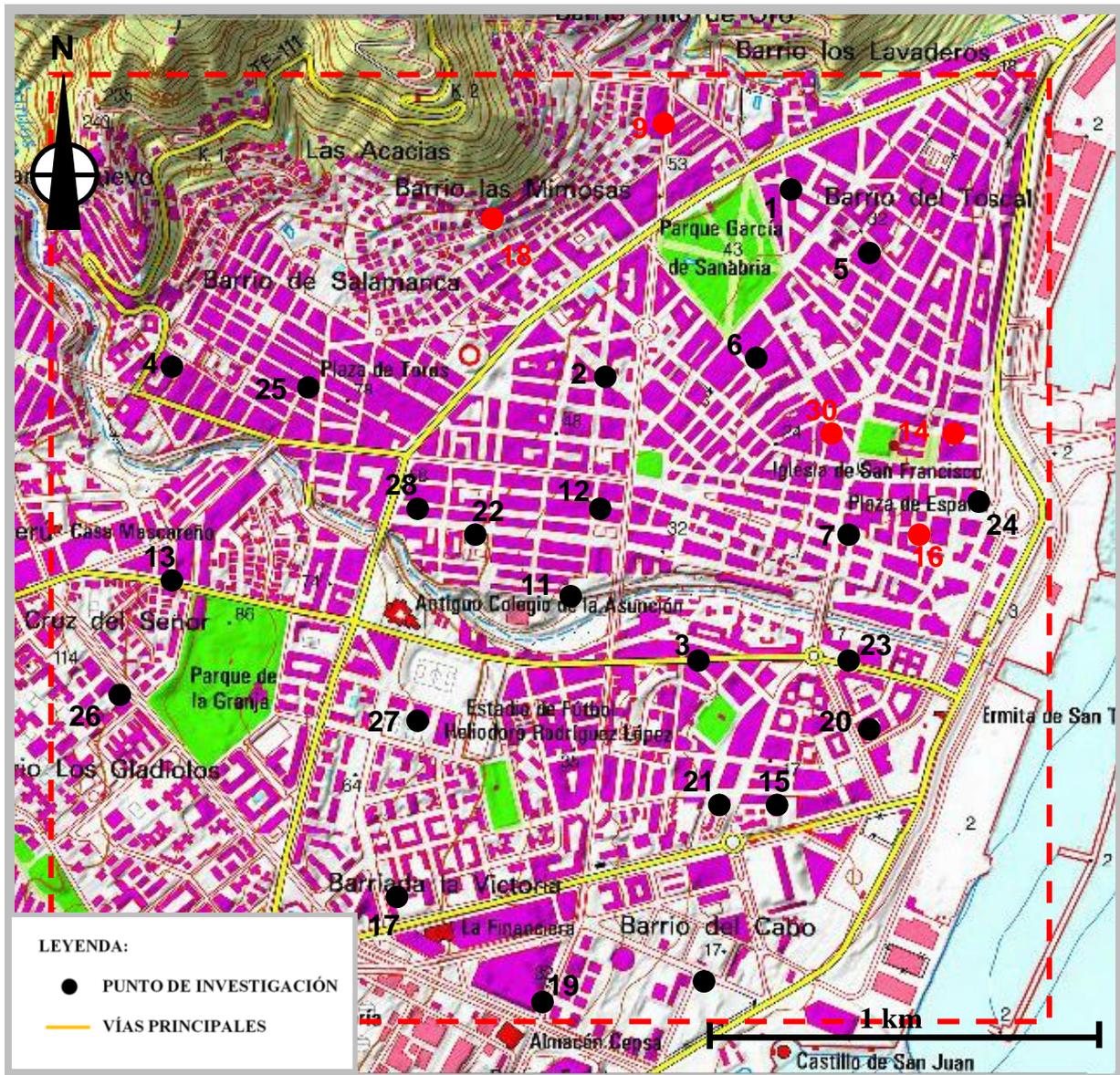


Figura 3-4. Localización de los puntos de reconocimiento donde se detectaron depósitos aluviales y coluviales (representados por puntos en tono rojo).

Tanto las coladas basálticas muestreadas como los materiales piroclásticos (tobas volcánicas), abarcan toda la superficie investigada ya que se reconocen en la mayoría de los puntos de investigación, sin embargo las escorias basálticas (Fig. 3-5) como los tubos volcánicos (Fig. 3-6) se reconocen sólo en algunos puntos por lo que sirven de referencia para identificar la colada.

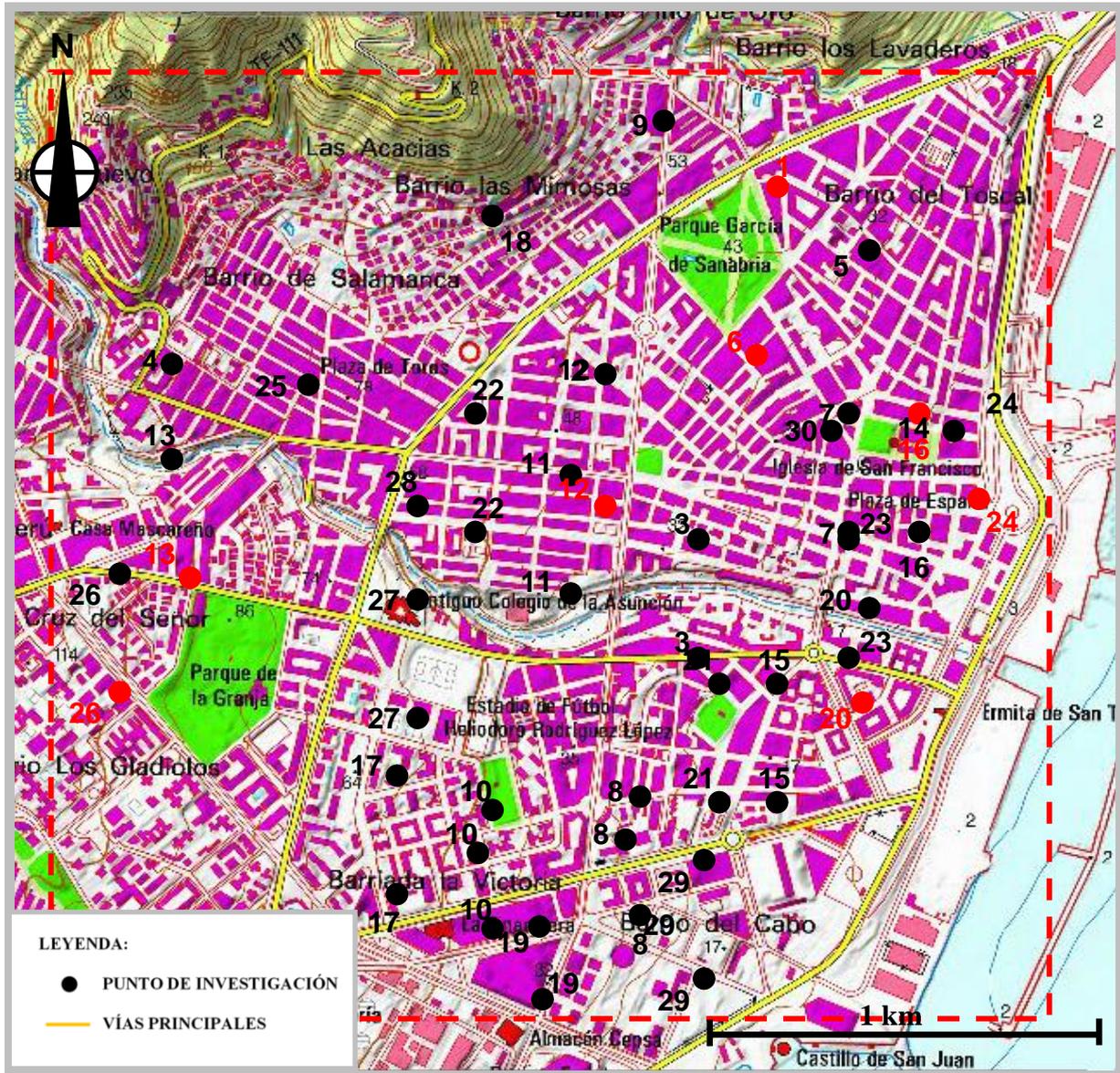


Figura 3-5. Localización de los puntos de reconocimiento donde se detectaron escorias basálticas (representados por puntos en tono rojo).

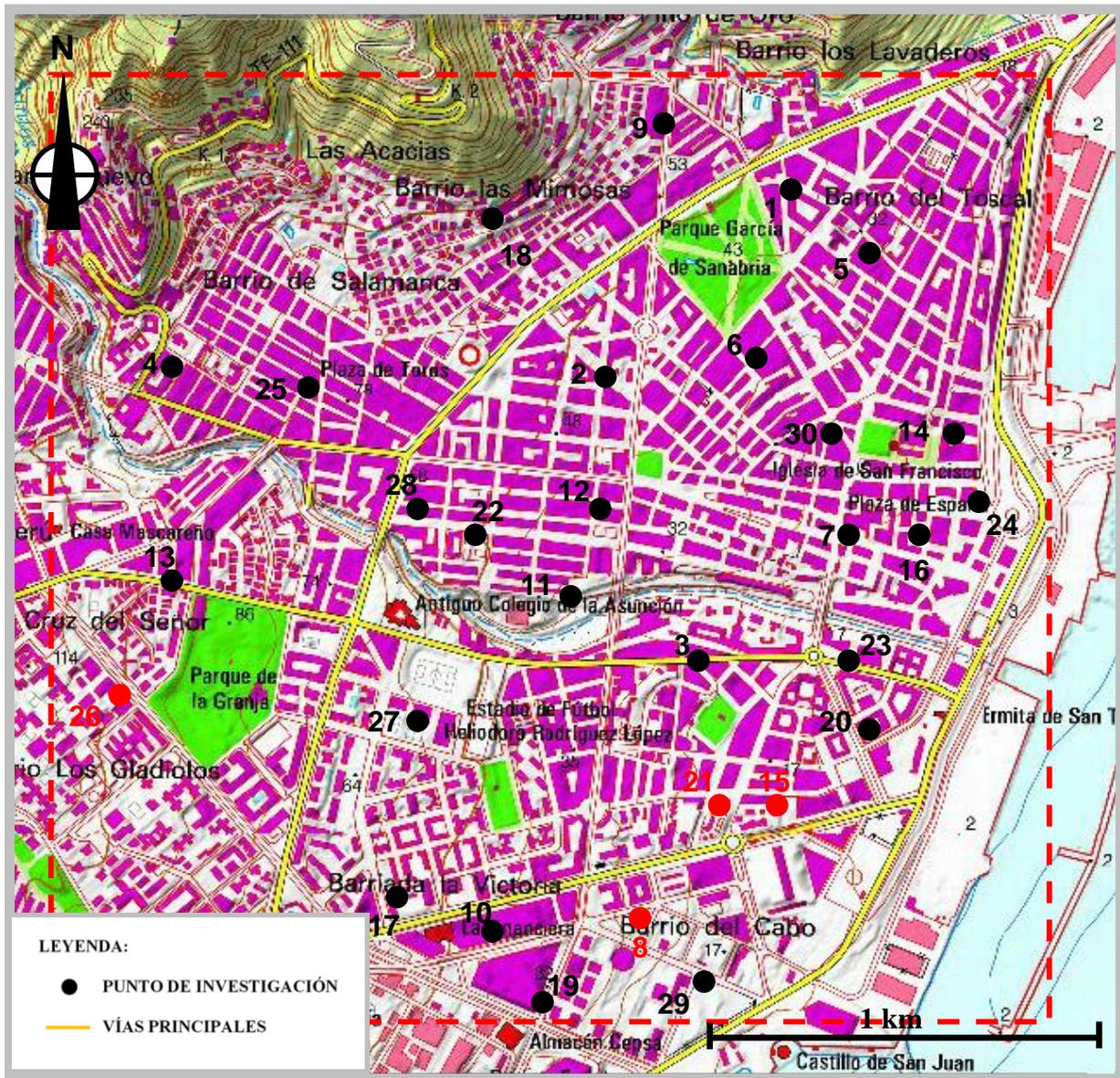


Figura 3-6. Localización de los puntos de reconocimiento donde se detectaron tubos o cuevas volcánicas (representados por puntos en tono rojo).

A continuación se describen las principales características de las unidades geotécnicas que se reconocen en el subsuelo de la ciudad:

- **Coladas basálticas sanas**

Las coladas basálticas están constituidas por:

Escorias basálticas

Las escorias de basalto reconocidas en las prospecciones están asociadas a las coladas basálticas tipo “aa” (Fig. 3-7) y en menor medida a las “pahoehoe”. El porcentaje de escorias dependerá del tipo de colada. Generalmente son gravas con arenas por lo que se consideran como materiales granulares.



Figura 3-7. Aspecto de las escorias basálticas.

Los cantos, de basalto suelen ser irregulares, heterométricos y subredondeados y su comportamiento geomecánico está marcado por su permeabilidad, ausencia de plasticidad y de cohesión entre sus partículas. Su estabilidad depende de la interacción mecánica por rozamiento interno entre las partículas que los constituyen, a lo que contribuye la textura rugosa y “espinosa” de las partículas. La mezcla de materiales de diferentes tamaños favorece el aumento de la compacidad del suelo.

Para su excavación únicamente se requieren medios mecánicos convencionales.

Basaltos

Los basaltos son rocas formadas cuando el magma se consolida en la superficie en una erupción volcánica. Los magmas basálticos hacen erupción a las altas temperaturas sobre los 1200° C, cuando solo han cristalizado unos pocos minerales (Fig. 3-8). Estos minerales en general se pueden identificar a simple vista o al microscopio (normalmente de olivino o

augita), englobados en una matriz de cristales de pequeño tamaño (microcristalinos o criptocristalinos) formados por el rápido enfriamiento del magma en superficie (Fig. 3-9).



Figura 3-8. Coladas basálticas tipo Pahoehoe, en la base se observan escorias y la toba rubefactada (localizadas en el Barranco de Los Santos).

En este caso se reconocen 6 subtipos diferentes de roca basáltica: basalto, basalto masivo, basalto vacuolar, basalto escoriáceo, basalto granular y basalto ankaramítico.

Para su excavación se requiere, generalmente, el uso de martillo neumático rompedor. En los basaltos escoriáceos o muy meteorizados se puede utilizar pala mecánica o retroexcavadora dependiendo de la zona.



Figura 3-9. Potentes coladas basálticas tipo pahoehoe (Barranco de los Santos).

- **Macizos basálticos alterados**

Se reconocen en la zona norte de la ciudad, son coladas basálticas de poco espesor con intercalaciones de materiales piroclásticos y suelos rubefactados o almagres de las series I y II. Estas coladas se encuentran muy alteradas y meteorizadas (Fig. 3-10) por lo que sus características geomecánicas se ven muy afectadas. Suelen presentar una fracturación muy alta por lo que son frecuentes los desprendimientos.



Figura 3-10. Coladas basálticas alteradas.

Para su excavación se requiere, generalmente, el uso de martillo neumático rompedor. En los basaltos escoriáceos o muy meteorizados se puede utilizar pala mecánica o retroexcavadora dependiendo de la zona.

- **Materiales piroclásticos**

En el subsuelo de la ciudad se reconocen:

Lapilli

Se trata de un piroclasto de caída, de naturaleza basáltica, con un tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, generado en erupciones explosivas a partir de la fragmentación de la lava que recubre las burbujas de gas que ascienden hacia la superficie y explotan por la diferencia de su presión interna con la del entorno. Los lapilli vinculados a erupciones estrombolianas son de color negro, pasando a tonalidades rojizas por oxidación, presenta diferente grado de vesiculación y se dispone en capas con poca dispersión lateral. Los lapilli asociados a magmas diferenciados (pómez) presentan color claro y muy baja densidad, siendo su dispersión lateral muy notable. Los lapilli pueden presentarse con una textura suelta o preferentemente soldada.

Los cantos y arenas de basalto son irregulares, heterométricos y subredondeados, también son considerados materiales granulares y su comportamiento geomecánico está marcado por su permeabilidad, ausencia de plasticidad y de cohesión entre sus partículas, cuya estabilidad depende de la interacción mecánica entre sus partículas por rozamiento interno.

Para su excavación será necesario el empleo de pala mecánica o retroexcavadora o martillo rompedor dependiendo de la zona.

Toba volcánica

Las tobas forman, en general, capas de unos pocos metros de espesor, de color blanco amarillento, constituidas por la aglomeración de materiales piroclásticos sálicos tipo pómez, cuyos fragmentos no suelen sobrepasar unos pocos centímetros de diámetro (Fig. 3-11). Estos materiales son el resultado de grandes erupciones explosivas de los centros de emisión sálica.



Figura 3-11. Toba volcánica pumítica (Barranco de los Santos).

La toba en este caso está formada por clastos englobados en una matriz limoarcillosa de naturaleza pumítica y aspecto marronáceo (Fig. 3-12). Este tipo de material se comporta a efectos como una roca por la cohesión que presenta.



Figura 3-12. Toba volcánica pumítica (Barranco de los Santos).

Para su excavación será necesario el empleo de pala mecánica o retroexcavadora o martillo rompedor dependiendo de la zona.

- **Suelos arenosos**

Arenas de playa con cantos

En la zona sur del área estudiada se detecta una playa “fósil” formada por arenas de naturaleza basáltica junto con cantos bien redondeados que van de centimétricos a decimétricos que, generalmente, también son de naturaleza basáltica.

Para su excavación será necesario el empleo de pala mecánica o retroexcavadora

- **Depósitos aluviales y coluviales**

Depósitos aluviales de fondo de barranco

La zona de emplazamiento de estos materiales en la ciudad es, principalmente, al pie de la ladera del Macizo de Anaga. En muchas ocasiones estas áreas, están cubiertas por conos de deyección y taludes de derrubios que en algunos casos alcanzan grandes potencias y dimensiones. Estos conos y taludes están formados por derrubios con cantos de angulosidad variable, cuya composición es la de los basaltos de la Serie I empastados en una matriz terrosa-arcillosa, sobre la que se desarrolla algo de vegetación.

Estos depósitos aluviales están íntimamente ligados a los taludes de derrubios y conos de deyección (Fig. 3-13), formados igualmente por sedimentos groseros y poco evolucionados que empezaron a formarse a partir del periodo erosivo anterior a la Serie II. A diferencia de las laderas, en los fondos de los valles los derrubios están un poco más elaborados, con cantos más redondeados y una matriz limoarcillosa.



Figura 3-13. Aspecto de los depósitos aluvio-coluviales.

Para su excavación será necesario el empleo de pala mecánica o retroexcavadora.

- **Rellenos antrópicos**

Bajo esta denominación se incluyen los depósitos colocados por la acción del hombre (Fig. 3-14), en general sin control alguno, de origen muy variado, debidos a movimientos de tierras asociados a la construcción de vías de comunicación, de edificaciones, de canteras tanto activas como abandonadas, explanadas para infraestructuras, etc. La naturaleza de estos

depósitos es muy diversa y en ocasiones depende de la finalidad para la que fueron destinados. En términos generales se pueden asimilar a sedimentos heterométricos, con bolos y bloques angulosos a subangulosos y abundantes finos en la matriz (arenas y limos). En determinadas circunstancias pueden contener materiales de reciclaje y residuos de la actividad humana.

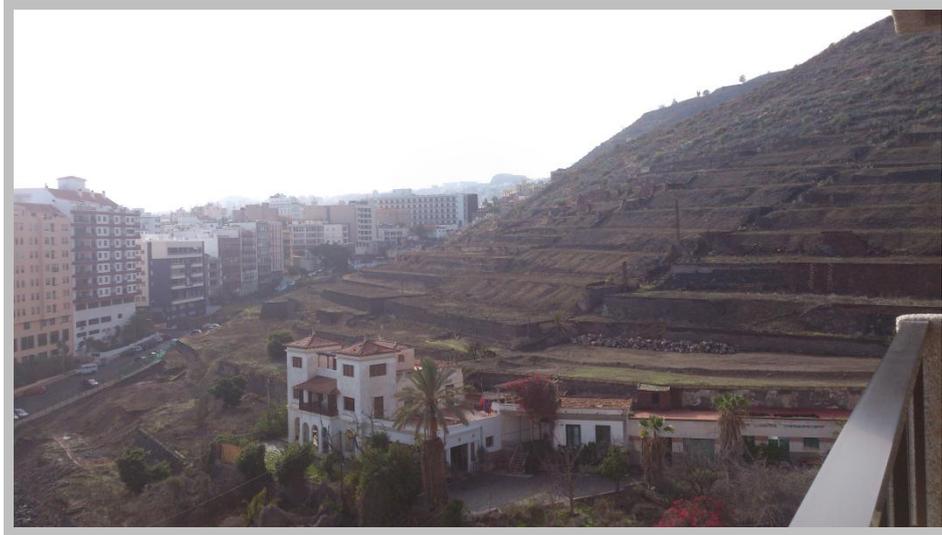


Figura 3-14. Rellenos antrópicos en la ladera del Macizo de Anaga.

Nivel freático

Durante la realización de los sondeos se detecta el nivel freático en 3 de los 30 puntos de investigación, a diferentes profundidades respecto a la superficie del terreno:

- PTO 14 a 1,65 m, en el aluvión de escorrentías (tobas, arenas, gravas y bolos).
- PTO 16 a 5,60 m, en el basalto diaclasado, que se apoya en el aluvión cementado.
- PTO 30 a 3,00 m, en el aluvión de escorrentías (limos, gravas y bolos).

Ensayos *in situ*

El ensayo *in situ* más ampliamente utilizado en este entorno ha sido la penetración estándar o S.P.T., según las especificaciones americanas *Standard Penetration Test*.

Este ensayo constituye el penetrómetro dinámico abierto de uso más extendido. Se asemeja a un tomamuestras de tubo bipartido, pero de diámetro inferior, de aproximadamente 665 mm. de longitud, diámetro exterior de 51 mm. y diámetro interior 35 mm, con una zapata de penetración en un extremo y en el otro una cabeza de acoplamiento al varillaje. (Norma UNE 103-800-92).

El ensayo consiste en la hincada del tomamuestras dejando caer una maza de 63,5 kg desde una altura de 76 cm.

El ensayo se inicia golpeando el tomamuestras hasta que se hincan en el terreno 15 cm (penetración de asiento). A continuación, se seguirá hincando el tomamuestras hasta que penetre 30 cm. más, anotando las tandas de golpes requeridos en cada intervalo de 15 cm. de penetración.

El N o valor del ensayo SPT es la suma de los golpes que han sido necesarios para la hincada de los 30 cm centrales. Se considera rechazo (R) cuando el golpeo necesario para hincar uno de los tramos es superior a 50.

Durante la ejecución de varios de los sondeos se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT). La localización, resultado de los golpes y la profundidad a la que se realizaron los ensayos SPT se incluyen a continuación (Tabla 3-5; Tabla 3-6; Tabla 3-7):

Tabla 3-5. Ensayos de penetración realizados en el punto de investigación 14.

Reconocimiento	Ensayos	Cota	Nº de golpes	N	Litología
PTO 14	6	0	4/7/15	22	Aluvión de escorrentías (tobas, arenas, gravas, bolos)
		0	3/8/12	20	Aluvión de escorrentías (tobas, arenas, gravas, bolos)
		0	5/12/15	32	Aluvión de escorrentías (tobas, arenas, gravas, bolos)
		1	3/6/10	19	Aluvión de escorrentías (tobas, arenas, gravas, bolos)
		1,5	4/8/12	24	Aluvión de escorrentías (tobas, arenas, gravas, bolos)
		2	8/26/R	R	Aluvión de escorrentías (tobas, arenas, gravas, bolos)
		0,75		23	Aluvión de escorrentías (tobas, arenas, gravas, bolos)

Tabla 3-6. Ensayos de penetración realizados en el punto de investigación 16.

Reconocimiento	Ensayos	Cota	Nº de golpes	N	Litología
PTO 16	4	8,2	5/7/8	15	Arenas, gravas y bolos (aluvión)
		10	5/9/12	21	Arenas, gravas y bolos (aluvión)
		8,5	4/8/10	18	Arenas, gravas y bolos (aluvión)
		10,3	5/10/R	R	Arenas, gravas y bolos (aluvión)
		9,3		18	Arenas, gravas y bolos (aluvión)

Tabla 3-7. Ensayos de penetración realizados en el punto de investigación 29.

Reconocimiento	Ensayos	Cota	Nº de golpes	N	Litología
PTO 29	4	14	10/15/18	33	Toba volcánica pumítica compacta
		1,9	6/10/12	22	Toba volcánica pumítica compacta con gravas y bolos
		12	8/12/13	25	Toba volcánica pumítica compacta
		13	9/12/16	28	Toba volcánica pumítica compacta
		10,2		27	Toba volcánica pumítica compacta

Los ensayos de penetración se realizaron en los siguientes puntos de investigación (Fig. 3-15):

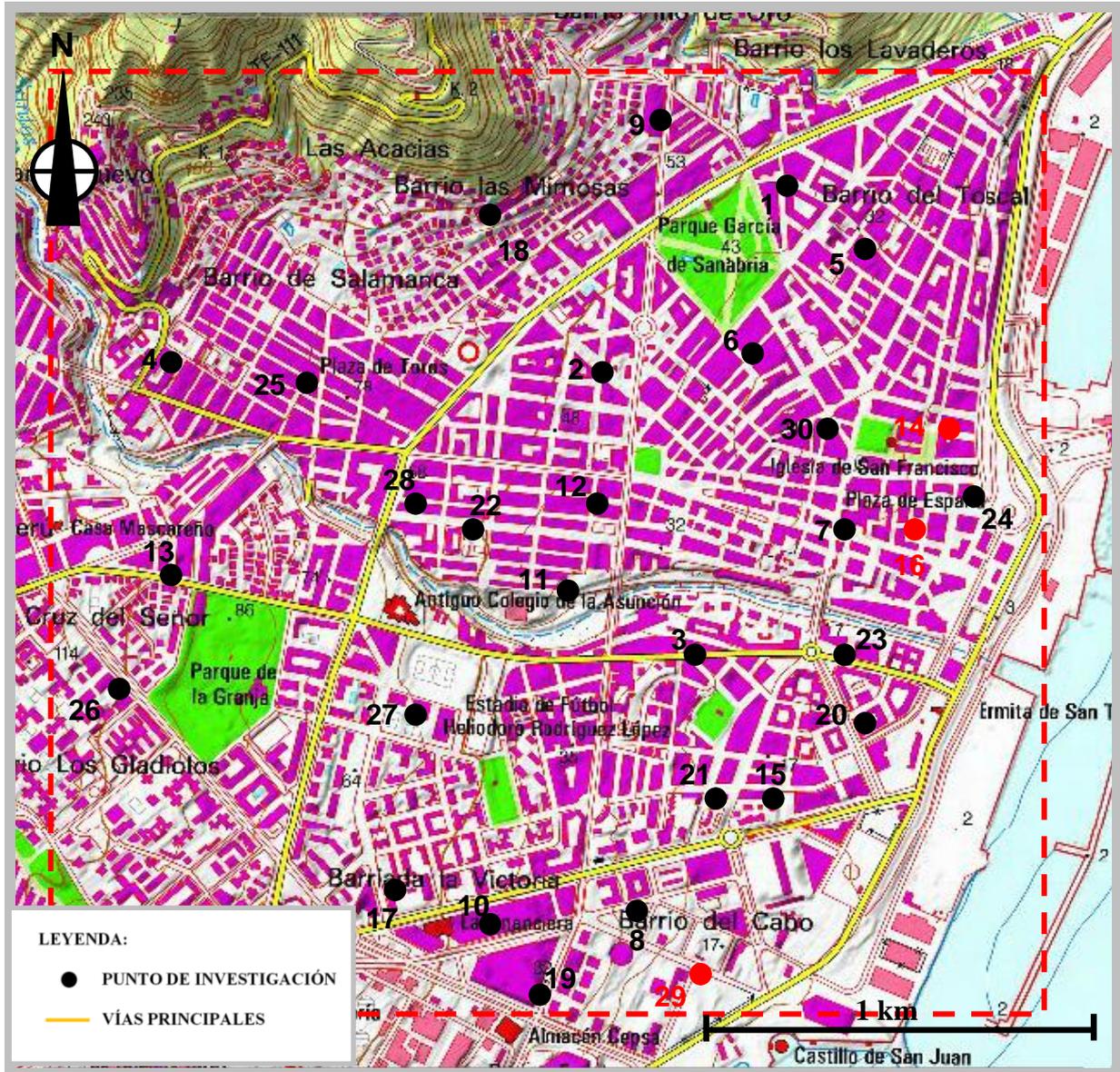


Figura 3-15. Puntos de reconocimiento donde se realizan ensayos de penetración (representados en rojo).

Ensayos de laboratorio

- Roturas a compresión uniaxial UNE 22950

Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a compresión simple de probetas de roca mediante las normativas UNE 22-950-1-90 y NTL-250/91. Los ensayos tienen por objeto medir la resistencia a la compresión uniaxial producida por la aplicación de una tensión normal a una sola dirección en una probeta de roca inalterada de forma cilíndrica regular, sin confinamiento. Las probetas en cada ensayo corresponden a muestras de diferentes rocas basálticas y tobas volcánicas.

La resistencia a la compresión uniaxial de la probeta se calculará dividiendo la carga máxima soportada por la muestra durante el ensayo, por el área de la sección transversal inicial.

Se aplica la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \frac{P}{\pi \cdot D^2 / 4}$$

Símbolos y abreviaturas:

σ_c : resistencia a la compresión uniaxial (MPa)

P: carga de rotura (N)

D: diámetro de la probeta (mm)

De los testigos extraídos durante la perforación se seleccionaron un total de 227 muestras; 205 muestras de diferentes tipos de rocas basálticas, 20 muestras de toba volcánica y 2 de lapilli soldado (Tabla 3-8), a las que se efectuaron ensayos de resistencia a la compresión uniaxial en el laboratorio de acuerdo con el procedimiento descrito en la Norma UNE-22950.

Como se puede observar, la mayor parte de los ensayos se corresponden con rocas basálticas, que son las más abundantes en el subsuelo de la ciudad.

A continuación se muestra el número de roturas, profundidad y rotura media de cada tipo de roca basáltica (Tabla 3-9).

A continuación, se muestran las tablas mencionadas:

Tabla 3-8. Distribución de las roturas a compresión simple junto con las rocas ensayadas.

Nº PUNTO DE RECONICIMIENTO	ROTURAS COMPRESION	BASALTO	TOBA	LAPILLI
1	5	4	1	
2	1	1		
3	6	6		
4	5	5		
5	3	3		
6	5	5		
7	6	1	4	1
8	30	30		
9	0			
10	4	4		
11	1	1		
12	4	4		
13	5	4	1	
14	0			
15	6	6		
16	2	2		
17	4	4		
18	4	4		
19	14	12	2	
20	5	5		
21	4	4		
22	5	3	2	
23	16	16		
24	14	14		
25	8	8		
26	6	6		
27	14	14		
28	5	4		1
29	42	32	10	
30	3	3		
TOTAL	227	205	20	2

Tabla 3-9. Distribución de las roturas en rocas basálticas.

Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ROTURA MEDIA (kg/cm²)	TIPO DE ROCA
20	6,6	1.304	Basalto masivo
99	4,9	554	Basalto vacuolar
15	4,2	306	Basalto escoriáceo
22	4,3	632	Basalto granular
7	8,9	516	Basalto ankaramítico
42	4,3	734	Basalto
205	5,5	674	Promedio Basaltos

Como se puede observar en la Tabla 3-9, los basaltos que presentan mayor resistencia media a compresión simple son los de tipo masivo, destacando por encima del resto de rocas basálticas, mientras que los basáltos escoriáceos son los que presentan los valores más bajos. El resto de basaltos presentan resistencias a compresión simple intermedias y con valores similares.

La media de los resultados de los ensayos de compresión simple para cada tipo de roca basáltica se recoge en diferentes las tablas (Tabla 3-10; Tabla 3-11; Tabla 3-12; Tabla 3-13; Tabla 3-14; Tabla 3-15) que se exponen a continuación:

Tabla 3-10. Distribución, número, profundidad y valores de rotura de los basaltos masivos.

Nº PUNTO DE RECONICIMIENTO	Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD (m)	ROTURA (kg/cm²)	DESCRIPCIÓN
23	9	4,6	1583	Basalto masivo
24	8	4,2	1720	Basalto masivo
29	3	10,9	610	Basalto masivo
	20	6,6	1304	Promedio Basalto masivo

Los resultados intermedios obtenidos en los ensayos a rocas de basalto masivo varían entre 610 y 1720 kg/cm², con una resistencia media de 1304 kg/cm².

Tabla 3-11. Distribución, número, profundidad y valores de rotura de los basaltos escoriáceos.

Nº PUNTO DE RECONICIMIENTO	Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD (m)	ROTURA (kg/cm²)	DESCRIPCIÓN
1	2	3,5	273	Basalto escoriáceo
5	3	4,1	191	Basalto escoriáceo
8	1	8,4	305	Basalto escoriáceo
22	3	2,3	514	Basalto escoriáceo
24	6	2,8	247	Basalto escoriáceo
	15	4,2	306	Promedio Basalto escoriáceo

Los resultados intermedios obtenidos en los ensayos a rocas de basalto escoriáceo varían entre 191 y 514 kg/cm², con una resistencia media de 306 kg/cm².

Tabla 3-12. Distribución, número, profundidad y valores de rotura de los basaltos granulares.

Nº PUNTO DE RECONICIMIENTO	Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD (m)	ROTURA (kg/cm²)	DESCRIPCIÓN
12	2	2,1	385	Basalto granular
23	5	5	857	Basalto granular
27	14	3,1	496	Basalto granular
28	1	7,1	788	Basalto granular
	22	4,3	632	Promedio Basalto granular

Los resultados obtenidos en los ensayos a rocas de basalto granular varían entre 385 y 858 kg/cm², con una resistencia media de 632 kg/cm².

Tabla 3-13. Distribución, número, profundidad y valores de rotura de los basaltos ankaramíticos.

Nº PUNTO DE RECONICIMIENTO	Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD (m)	ROTURA (kg/cm ²)	DESCRIPCIÓN
1	2	6,8	724	Basalto ankaramítico
10	2	1,8	493	Basalto ankaramítico
29	3	18	332	Basalto ankaramítico
	7	8,9	516	PromedioBasalto ankaramítico

Los resultados obtenidos en los ensayos a rocas de basalto ankaramítico varían entre 332 y 724 kg/cm², con una resistencia media de 516 kg/cm².

Tabla 3-14. Distribución, número, profundidad y valores de rotura de los basaltos.

Nº PUNTO DE RECONICIMIENTO	Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD (m)	ROTURA (Kg/cm ²)	DESCRIPCIÓN
2	1	4,9	890	Basalto
3	3	1,8	425	Basalto
6	5	2,8	1508	Basalto
8	1	5,8	1263	Basalto
10	2	2,8	783	Basalto
11	1	1,4	1086	Basalto
12	2	2,1	308	Basalto
15	2	6,2	547	Basalto
16	1	3,2	623	Basalto
18	2	11,1	195	Basalto
20	5	3,5	258	Basalto
21	1	1,3	332	Basalto
23	2	4,4	1293	Basalto
25	8	6,1	625	Basalto
28	3	4,7	590	Basalto
30	3	6,4	1010	Basalto
	42	4	734	Basalto

Los resultados obtenidos en los ensayos a rocas de basalto varían entre 195 y 1508 kg/cm², con una resistencia media de 734 kg/cm².

Tabla 3-15. Distribución, número, profundidad y valores de rotura de los basaltos vacuolares.

PUNTO DE RECONICIMIENTO	Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD (m)	ROTURA (Kg/cm²)	DESCRIPCIÓN
3	3	2,2	914	Basalto vacuolar
4	5	2,5	1410	Basalto vacuolar
7	1	12	510	Basalto vacuolar
8	28	4	353	Basalto vacuolar
13	4	4	423	Basalto vacuolar
15	4	4,5	447	Basalto vacuolar
16	1	3,2	204	Basalto vacuolar
17	4	4,2	466	Basalto vacuolar
18	2	6,8	333	Basalto vacuolar
19	12	3	475	Basalto vacuolar
21	3	3,3	528	Basalto vacuolar
26	6	5,4	528	Basalto vacuolar
29	26	8,5	609	Basalto vacuolar
	99	4,9	554	Basalto vacuolar

Los resultados obtenidos en los ensayos a rocas de basalto vacuolar varían entre 204 y 1410 kg/cm², con una resistencia media de 554 kg/cm².

De los sondeos realizados, se tomaron 20 muestras de Toba volcánica pumítica para la realización de los ensayos de compresión simple en el laboratorio.

La localización, número de roturas, profundidad y valor de rotura de cada muestra se recoge en la Tabla 3-16. Las tobas presentan diferente granulometría y compactación, siendo extraídas, en la mayor parte, a profundidades mayores de 8 metros respecto a la superficie del terreno.

Tabla 3-16. Distribución de roturas de Toba volcánica pumítica.

Nº PUNTO DE RECONICIMIENTO	Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD (m)	ROTURA (kg/cm²)	DESCRIPCIÓN
1	1	1,2	25	Toba volcánica pumítica compacta
7	4	10	51	Toba volcánica pumítica compacta
13	1	1,4	37	Toba volcánica pumítica compacta
19	2	8,5	20	Toba volcánica pumítica compacta
22	2	1,1	14	Toba volcánica pumítica compacta
29	10	14,6	27	Toba volcánica pumítica compacta
	20	6	29	Toba volcánica pumítica compacta

Los resultados obtenidos en los ensayos a la Toba volcánica varían entre 14 y 51 kg/cm², con una resistencia media de 29 kg/cm².

Por último también se ensayaron 2 muestras de Lapilli basáltico soldado (Tabla 3-17) para ensayar a compresión simple, los resultados obtenidos se recogen a continuación:

Tabla 3-17. Distribución de roturas de Lapilli.

Nº PUNTO DE RECONICIMIENTO	Nº ROTURAS	PROFUNDIDAD (m)	ROTURA (kg/cm ²)	DESCRIPCIÓN
PTO 7	1	13	27	Lapilli basáltico soldado
PTO 28	1	1,2	25	Lapilli soldado
	2	7,1	26	Lapilli basáltico soldado

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados al Lapilli volcánico soldado varían entre 25 y 27 kg/cm², con una resistencia media de 26 kg/cm².

En la Tabla 3-18 se muestra un resumen de las roturas a compresión simple de todos los materiales rocosos mostrando los valores máximos, mínimos y medios.

Tabla 3-18. Resumen de los ensayos a compresión con los máximos, mínimos y medias de cada unidad geotécnica.

Tipo de roca	Resistencia a Compresión uniaxial	kg/cm ²	MPa
Basalto masivo	Máxima	1720	168,674
	Mínima	610	59,821
	Media	1304	127,879
Basalto vacuolar	Máxima	1410	138,274
	Mínima	204	20,006
	Media	554	54,329
Basalto escoriáceo con infiltraciones de toba	Máxima	514	50,406
	Mínima	191	18,731
	Media	306	30,008
Basalto granular	Máxima	858	84,141
	Mínima	385	37,756
	Media	632	61,978
Basalto ankaramítico	Máxima	724	71,000
	Mínima	332	32,558
	Media	516	50,602
Basalto	Máxima	1508	147,884
	Mínima	195	19,123
	Media	734	71,981
Toba volcánica pumítica compacta	Máxima	51	5,001
	Mínima	14	1,373
	Media	29	2,844
Lapilli	Máxima	27	2,648
	Mínima	25	2,452
	Media	26	2,550

- Agresividad química

Para comprobar la posible degradación del hormigón y la corrosión de las armaduras, en la parte de estructura enterrada y en contacto con el suelo, se determina la agresividad por sulfatos y cloruros. Los ensayos realizados en los suelos encontrados en diferentes puntos nos dan resultados por debajo de los límites establecidos. Aunque debido a la proximidad de la ciudad al mar habrá que tomar medidas especiales contra la afección causada por los cloruros.

Ión sulfato SO_4^{2-} de 0 a 20 p.p.m.

Ión cloruro Cl^- de 0 a 250 p.p.m.

Acidez Baumman-Gully 0 ml/kg.

4.- VALORACION DE LOS MATERIALES COMO NIVEL DE CIMENTACIÓN

En este apartado se presenta una valoración de las diferentes unidades geotécnicas como nivel de cimentación. La misma ha sido realizada a partir de los datos de ensayos de laboratorio y de campo. En cada caso han sido realizados los cálculos de la carga admisible de cada unidad geotécnica, diferenciando rocas y suelos. Para materiales rocosos se ha utilizado el método de Serrano y Olalla (1994-1996), mientras que para los granulares se ha recurrido al método de determinación de la carga admisible a partir de Meyerhof (1956).

Cargas admisibles

1) Carga admisible de los materiales granulares

a. Materiales aluviales

De entre las distintas correlaciones existentes entre el índice N del ensayo estándar de penetración SPT y la presión vertical de cimentación se describe, a continuación, la propuesta por Meyerhof (1956). Dicho valor variará en función de la profundidad del plano de cimentación y se deberán utilizar factores de corrección por el efecto de la carga del terreno.

Considerando el valor medio más desfavorable de $N=18$ y suponiendo una zapata tipo cuadrada 1 metro y unos asientos admitidos de 25 mm, se tiene una carga de:

Según Meyerhof (1956):

$$Q = 12000 * N * K_d$$

siendo:

Q = capacidad de carga (en Pa)

N = nº de golpes necesarios para hincar 30 cm del tomamuestras SPT

K_d = factor de corrección por profundidad de la zapata en el terreno, en este caso 1,3.

Por tanto: $Q = 12000 * 18 * 1,3$ $Q = 0,281$ MPa

Considerando un $F_s = 3$, se tiene: $Q = 0,094$ MPa

b. Tobas pumíticas

Considerando el valor medio de $N=27$, una zapata tipo cuadrada de 1m y unos asientos admitidos de 25 mm se tiene una carga según Meyerhof de:

$$Q = 12000 * N * K_d$$

Por tanto: $Q = 12000 * 27 * 1,3$ $Q = 0,421$ MPa

Considerando un $F_s = 3$, se tiene: $Q = 0,140$ MPa

2) Carga admisible de las unidades rocosas

En este caso se ha considerado el método de Serrano y Olalla (1994-1996) y los valores representativos de los parámetros de cálculo de cada unidad (Tabla 4-1), sintetizados a continuación:

Tabla 4-1. Parámetros de cálculo de cada tipo rocoso.

Roca	σ_c (MPa)	RMR	m_o	i_1 (°)	γ	H (m)	σ_1 (MPa)
Basalto masivo	127,9	73	17	0	25,3	5,58	0,13256
Basalto vacuolar	54,3	60	17	0	22,5	5,35	0,12012
Basalto	72,0	67	17	0	23,5	4,75	0,11148
Basalto ankaramítico	50,6	62	17	0	24	10,35	0,24792
Basalto granular	62,0	50	17	0	23,7	3,75	0,08897
Basalto escoriáceo	30,0	43	17	0	21,2	3,55	0,07518
Toba volcánica	2,8	54	15	0	15,1	10,55	0,15965
Lapilli	2,6	65	15	0	18,3	7,25	0,13256

$$\sigma_1 = H * \gamma$$

siendo:

σ_c = Resistencia a la compresión simple de la roca.

RMR = Clasificación geomecánica de la roca según Bieniawski.

m_o = Coeficiente de Hoek y Brown, su valor depende del tipo de roca.

i_1 = Inclinación de la carga sobre la cimentación.

σ_1 = Peso del terreno exterior a la cimentación si está enterrada.

γ = Peso específico del basalto.

H = Altura de tierras por encima de la superficie de cimentación.

Los parámetros m y s, han sido calculados, considerando a = 14.45 y b = 6.45 (valores dados por el método de Serrano y Olalla para rocas perturbadas).

$$m = m_o \exp \frac{RMR - 100}{a} ; \quad s = \exp \frac{RMR - 100}{b}$$

Posteriormente se calculan los parámetros β y ξ .

$$\beta = \frac{m * \sigma_c}{8} ; \quad \xi = \frac{8 * s}{m^2}$$

Los resultados se expresan en la siguiente tabla (Tabla 4-2):

Tabla 4-2. Parámetros calculados de cada tipo rocoso.

Roca	m	s	β (MPa)	ξ (MPa)
Basalto masivo	2,62	0,015206	41,93878	0,017667
Basalto vacuolar	1,07	0,002026	7,24452	0,014232
Basalto	1,73	0,005598	15,58568	0,015990
Basalto ankaramítico	1,23	0,002762	7,74550	0,014714
Basalto granular	0,53	0,000429	4,13701	0,012052
Basalto escoriáceo	0,33	0,000145	1,23549	0,010727
Toba volcánica	0,62	0,000799	0,21838	0,016545
Lapilli	1,33	0,004399	0,42841	0,019866

Se calcula la carga exterior adimensional normalizada:

$$\sigma_{01}^{\#} = \frac{\sigma_1}{\beta} + \xi ;$$

Con este valor, se obtiene gráficamente N_{β}

Ahora se calcula la carga de hundimiento (Tabla 4-3) por la ecuación:

$$\sigma_h = \beta \cdot (N_{\beta} - \xi)$$

Tabla 4-3. Cargas de hundimiento de cada unidad geotécnica.

Roca	σ_{01} (MPa)	N_{β}	σ_h (MPa)
Basalto masivo	0,02103	5,5	229,9223
Basalto vacuolar	0,03081	5,9	42,63956
Basalto	0,02314	5,5	85,47204
Basalto ankaramítico	0,04672	6,4	49,45725
Basalto granular	0,03355	5,9	24,35849
Basalto escoriáceo	0,07158	7,1	8,75875
Toba volcánica	0,74759	8,2	1,78715
Lapilli	0,32928	7,6	3,24747

El Coeficiente de seguridad (Tabla 4-4) según Serrano y Olalla (1996) es:

$$F = F_p \cdot F_m, \text{ donde:}$$

F_p = Coeficiente de seguridad de los parámetros (se obtiene gráficamente)

F_m = Coeficiente de seguridad del modelo (valor tabulado)

Tabla 4-4. Coeficientes de seguridad de cada unidad geotécnica.

Roca	F_p	F_m	F
Basalto masivo	80	8	640
Basalto vacuolar	50	3	150
Basalto	45	6	270
Basalto ankaramítico	40	4	160
Basalto granular	30	3	90
Basalto escoriáceo	20	2	40
Toba volcánica	15	1	15
Lapilli	30	1	30

Finalmente, la carga admisible por hundimiento (Tabla 4-5) es: $\sigma_{adh} = \frac{\sigma_h}{F}$

Tabla 4-5. Coeficientes de seguridad de cada unidad geotécnica.

Tipo roca	σ_{adh} (MPa)	σ_{adh} (kp/cm²)
Basalto masivo	0,351	3,59
Basalto vacuolar	0,278	2,84
Basalto	0,309	3,16
Basalto ankaramítico	0,302	3,09
Basalto granular	0,264	2,70
Basalto escoriáceo	0,213	2,18
Toba volcánica	0,116	1,19
Lapilli	0,105	1,08

Parámetros geotécnicos

En este apartado se sintetizan las propiedades geomecánicas de las rocas obtenidas a partir de los ensayos de campo y laboratorio.

Para determinar los parámetros geotécnicos, se han seguido las recomendaciones de la Norma ENV-1997-1 del Eurocódigo 7 para Proyectos Geotécnicos, según la clasificación Categoría Geotécnica 2.

- **Densidad media de los materiales rocosos;** para las rocas basálticas encontradas varía entre 2,16 y 2,59 g/cm³, para la toba volcánica 1,54 g/cm³ y para el lapilli soldado 1,87 g/cm³.
- **Discontinuidades;** corresponden a diaclasas y juntas de contracción por enfriamiento de las lavas basálticas; el espaciado de las diaclasas oscila, generalmente, de 20 a 60 mm, clasificándose como “muy juntas” pero será mayor ó menor en función del tipo de colada.

Las discontinuidades pueden presentar o no rellenos, que serán de materiales limosos y costras cálcicas. Pueden presentar alteración por óxidos de hierro y diferentes condiciones de humedad.

La superficie de discontinuidad de la diaclasa o rugosidad de los dos planos está relacionada con la resistencia al corte de la misma.

La rugosidad hace referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidad como a las irregularidades o pequeñas rugosidades existentes entre los dos planos.

Los testigos de roca extraídos mantienen sus diaclasas con superficies planas rugosas.

La abertura de las diaclasas está comprendida entre 0,5 y 2,5 mm, clasificadas como abiertas.

- **RQD,** la calidad de la roca está ligada al número de las fracturas y al espaciado de las mismas. El índice, medido en porcentaje (Tabla 4-6), que define el grado de fracturación de un macizo rocoso es el RQD medido en los testigos de los sondeos.

Tabla 4-6. Calidad de la roca en función del RQD.

RQD (%)	Calidad de roca
< 25	muy mala
25 - 50	mala
50 - 75	regular
75 - 90	buena
90 - 100	excelente

De manera general las lavas tipo “pahoehoe” y la parte central de las coladas “aa” presentan calidad de roca buena a excelente, con valores comprendidos entre 75-100

%. Los macizos alterados presentan, de manera general, calidad de mala a regular comprendida entre el 25-75 %.

Las tobas volcánicas y el lapilli soldado presentan calidades buenas, entre el 75-90%.

- **Meteorización**, se determina el grado de meteorización que presenta el macizo rocoso en su conjunto, además de la propia matriz rocosa, por observación directa de la misma. Los testigos de roca extraídos en los sondeos presenta un grado de meteorización según la ISRM entre I y IV, clasificado con el término: roca sana y ligeramente meteorizada, presentando ligera decoloración de la superficie de discontinuidad.

La meteorización de las rocas es el proceso de modificación de su composición o estructura al estar en contacto con la atmósfera o en sus proximidades, teniendo efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas del material rocoso.

Se han establecido cinco grados de meteorización (ISRM, 1981), con los siguientes criterios:

- Grado I (Sana): roca no meteorizada, conserva el color lustroso en toda la masa.
- Grado II (Sana con juntas teñidas de óxido): las caras de las juntas están manchadas de óxidos, pero el bloque unitario entre juntas mantiene el color lustroso de la roca.
- Grado III (Moderadamente meteorizada): claramente meteorizada a través de la petrofábrica, reconociéndose el cambio de color respecto de la roca sana. El cambio de color de toda la masa, generalmente a colores típicos de óxidos de hierro. La resistencia de la roca puede variar desde muy análoga a la roca de Grado II, a bastante más baja, pero tal que trozos de 25 cm² de sección no pueden romperse a mano.
- Grado IV (Muy meteorizada): roca intensamente meteorizada que puede desmenuzarse a mano.
- Grado V (Completamente meteorizada): material con aspecto de suelo completamente descompuesto por meteorización “in situ”, pero en el cual se puede reconocer la estructura de la roca original.

Los basaltos extraídos en los sondeos presentan meteorización variable, normalmente entre I-III, dependerá del tipo de colada y antigüedad de la misma.

- **Índice de fracturación**, existen varios métodos para determinar el estado de diaclasado de un macizo rocoso analizando los núcleos de perforación de un sondeo. El sistema utilizado en este caso consistió en medir el número de fracturas (diaclasas) naturales que hay en una longitud de 30 centímetros de testigo. El valor obtenido se

expresa dentro de los intervalos de 1-4, 4-16, 16-64 y ≥ 64 diaclasas por 30 centímetros de longitud de testigo.

Los basaltos masivos y vacuolares presentan índices de fracturación bajos, los granulares y escoriáceos son los que presentan mayor fracturación, dependerá del tipo y grado de alteración de cada colada.

- **Índice RMR**, la incidencia de los parámetros geomecánicos en el comportamiento de la excavación se expresa por medio de un índice de calidad denominado Rock Mass Rating, RMR, que varía desde 0 a 100 (Tabla 4-7).

El índice variará para cada tipo de macizo basáltico, por lo general los macizos basálticos alterados presentan RMR entre 40-60, las coladas basálticas sanas entre 60-85 y los materiales piroclásticos soldados entre 60-75. Para su cálculo se utilizarán los parámetros RMR (Tabla 4-8) para cada tipo rocoso.

Tabla 4-7. Clasificación RMR para macizos rocosos.

Clase	Calidad de roca	RMR
I	muy buena	81 – 100
II	buena	61 – 80
III	regular	41 – 60
IV	mala	21 – 40
V	muy mala	0 - 20

Tabla 4-8. Parámetros del Rock Mass Rating (Bieniawski, 1979).

Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	valor		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	valor		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
	valor		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta				
valor			6	5	3	1	0		
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	valor				15	10	7	4	0

- **Cohesión;** la cohesión del terreno es la cualidad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con sus vecinas. En consecuencia, la cohesión es mayor cuanto más finas son las partículas del terreno.

Las rocas basálticas y los materiales piroclásticos soldados presentan alta cohesión mientras que las escorias basálticas y los suelos arenosos no presentan cohesión. Cuando la proporción de finos es alta nos podemos encontrar con cohesiones de 5 t/m².

- **Ángulo de rozamiento interno;** es una propiedad de los materiales granulares. El ángulo de rozamiento tiene una interpretación física sencilla, al estar relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un montoncito de dicho material granular.

Para las rocas basálticas tenemos valores de 47° (a favor de las juntas), para los depósitos piroclásticos soldados valores que oscilan entre 29-43° y para las escorias basálticas entre 29-40°, según la compacidad del terreno.

5.- PROBLEMÁTICA GEOTÉCNICA

Cada unidad identificada en el subsuelo de la ciudad presenta una problemática geotécnica característica que se sintetiza a continuación:

Macizos basálticos alterados

Formada por coladas basálticas de pequeño espesor (en torno a 1 m o inferior) y alteración de moderada a alta. La peculiaridad destacable de las coladas basálticas es que se manifiestan como una alternancia vertical de niveles de compacto basáltico (roca basáltica) y niveles de escorias (material granular) que aparecen generalmente en forma de autobrecha debido al grado de alteración.

Además, en estos macizos alterados aparecen también intercalados mantos piroclásticos y frecuentes zonas rubefactadas, denominadas “almagres”, que en ocasiones corresponden a niveles de paleosuelos que han sido calcinados por el calor de la colada suprayacente. Generalmente presentan buzamientos suaves que pueden variar entre 10° a 30°. Suelen presentar en superficie valores de RMR comprendidos entre 40 a 60.

La problemática geotécnica, con carácter general, en esta unidad es la siguiente:

- Reducida resistencia y elevada deformabilidad en situaciones de elevada alteración local.
- Inestabilidades puntuales en zonas próximas o adyacentes a relieves montañosos de pendiente moderada a alta. En general da lugar a fuertes abarrancamientos.
- La presencia de niveles escoriáceos intercalados produce una gran heterogeneidad.
- Asientos diferenciales por afloramiento de diferentes unidades.
- Presencia de cavernas debido a la circulación de agua y la ya mencionada baja compactación.
- En términos generales, los niveles escoriáceos con avanzados estados de alteración, provocan impermeabilización y formación de materiales arcillosos que implicarían problemas adicionales entre los que cabe mencionar expansividad, elevada deformabilidad e inestabilidades de ladera.

Coladas basálticas sanas

En esta unidad se recogen las coladas basálticas que conservan su estructura original debido a su escaso estado de alteración, por lo que se pueden distinguir los tipos “pahoehoe” y “aa”.

Las lavas “pahoehoe” se caracterizan por tener una superficie lisa y ondulada, aunque en detalle aparecen con formas similares a vísceras o cuerdas entrelazadas y corrugadas (lavas cordadas). Internamente es de destacar la presencia de gran número de vacuolas o pequeños huecos más o menos esféricos que les otorgan gran porosidad. Debido a este hecho, han sido

usadas tradicionalmente en las Islas Canarias para fabricar molinos de cereal y son conocidas vulgarmente como “risco molinero”. Sin embargo, el detalle interno más destacable es la presencia de túneles, galerías o tubos volcánicos que pueden alcanzar kilómetros de longitud y diámetros de varios metros, así como moldes de árboles que fueron arrollados por la colada.

En las prospecciones que se realizan sobre estos materiales suele ocurrir que no sean detectados estos tubos volcánicos, lo que no significa que no estén presentes en el entorno y pueda afectar a las cimentaciones.

Las lavas “aa” o lavas escoriáceas se forman con magmas algo más viscosos que las lavas “pahoehoe”, fluyen más lentamente y adquieren un aspecto totalmente distinto. La superficie es extremadamente rugosa o incluso espinosa, por lo que localmente se conocen como “malpaís”. El avance de la lava se realiza como el de las cadenas de una oruga, de forma que la superficie escoriácea ya enfriada se desploma delante del frente de la colada en movimiento y es recubierta por el interior todavía fundido que avanza. Por ello, la sección vertical de una lava “aa” consiste en una banda central de roca densa surcada por una red de diaclasas o fisuras formadas por retracción al enfriarse y solidificar el fundido, limitada abajo y arriba por dos franjas escoriáceas irregulares. Cuando hay un apilamiento de varias lavas “aa”, las escorias de techo se unen con las de la base de la colada situada inmediatamente encima, resultando una alternancia de bandas densas (basalto) y bandas escoriáceas (autobrecha).

El efecto visual puede resultar engañoso y llevar a pensar que sólo son lavas las bandas densas y que los niveles escoriáceos tienen otro origen.

Entre estos dos tipos extremos de lavas (“pahoehoe” y “aa”) existen un importante grupo de términos intermedios que se denominan lavas de transición.

Al igual que en el caso de la unidad *Macizos basálticos alterados*, la presencia de niveles escoriáceos intercalados produce una gran heterogeneidad ya que provocan alternancias tanto vertical como horizontalmente. Estos niveles escoriáceos, que en esta unidad aparecen poco alterados, se comportan como suelos granulares poco compactos, aspecto que, junto con la existencia de cavernas, reduce considerablemente la calidad de los macizos rocosos.

Los niveles masivos de roca basáltica, en general presentan capacidad portante alta con valores de RMR comprendidos entre 60 y 85. Sin embargo, los niveles escoriáceos pueden presentar baja capacidad portante y gran deformabilidad, si las escorias están sueltas y sin matriz y capacidad portante moderada y poca deformabilidad si se encuentran soldadas o con matriz con cierto grado de cementación.

Por tanto, atendiendo a la tasa efusiva, viscosidad del magma, contenido en gases, pendiente del terreno, etc., estas coladas basálticas pueden dar como producto final materiales que presentan gran variabilidad en cuanto a composición y estado, por lo que es necesario el

estudio de cada emplazamiento en particular. Así, a efectos de planificación del reconocimiento geotécnico en esta unidad se pueden reconocer dos subunidades:

- **Coladas “aa” poco escoriáceas.** En esta subunidad quedan incluidas las coladas basálticas de tipo “aa”, que presentan espesores de compacto basáltico sano iguales o superiores a 2 m, conservando su continuidad lateral en toda la parcela, con niveles escoriáceos inferiores a 0,5 m, ausencia de cavidades y una pendiente del terreno inferior a 15°.
- **Coladas “pahoehoe” y “aa” muy escoriáceas.** En esta subunidad se incluyen las coladas basálticas “pahoehoe” y coladas “aa” con espesores de compacto basáltico sano.

Los problemas geotécnicos asociados a esta unidad son, entre otros, los siguientes:

- Asientos diferenciales debidos a la presencia de materiales rocosos duros próximos a materiales granulares de alta deformabilidad (coladas “aa”).
- Posible presencia de oquedades debido a la existencia de tubos volcánicos y dificultad para su detección, que pueden producir hundimientos y colapsos (coladas “pahoehoe”).
- Existencia de niveles escoriáceos con parámetros geotécnicos muy desfavorables intercalados entre los materiales masivos más resistentes.
- Los niveles escoriáceos presentan gran complejidad y dificultad para su caracterización geotécnica.
- Inestabilidades de laderas naturales o de taludes excavados, como consecuencia de la presencia de niveles escoriáceos sueltos, que pueden producir desplomes de los niveles masivos por erosión diferencial.
- Caída de bloques separados por disyunción columnar.

Materiales piroclásticos

Se forman cuando los fragmentos de magma caen y se depositan en las inmediaciones del foco de emisión. Las potencias y buzamientos tienen relación con la disposición de la topografía sobre la que se han depositado en el momento de la erupción. La erosión determina también variaciones en los espesores originales.

Se clasifican según el tamaño y la composición. Los basálticos de pequeño tamaño se denominan *cenizas* (menores de 2 mm), los intermedios *lapillis* (entre 2 y 64 mm) y los de mayor tamaño reciben el nombre genérico de *escorias*, que en algunos casos adquieren formas redondeadas al girar en el aire (bombas). Los traquíticos y/o fonolíticos, más ligeros, claros y porosos, constituyen los depósitos de pómez.

Los denominados conos de cinder están formados por depósitos mixtos, desde el punto de vista granulométrico, predominantemente escoriáceos. Se acumulan alrededor de la

chimenea eruptiva construyendo los conos volcánicos, también conocidos como conos de *tefra*. Localmente estos materiales pueden estar cementados y entonces reciben en nombre genérico de *tobas*.

Por tanto, esta unidad puede subdividirse a su vez en dos:

- **Ignimbritas soldadas y tobas.** Se trata de rocas duras o semiduras. Se corresponden con depósitos piroclásticos pumíticos o cineríticos muy compactos, tales como ignimbritas con o sin textura eutaxítica o cineritas compactas. Esta variedad de materiales se origina cuando una masa de productos piroclásticos es transportada en forma de dispersión de gas y de alta o moderada densidad de partículas; el resultado es un material con características de roca más o menos dura, con un grado de compacidad y/o cementación variable. Durante su formación han cubierto las depresiones topográficas existentes en el momento de la erupción. Es el caso de las ignimbritas soldadas, que se asemejan más a un flujo lávico que a un depósito piroclástico. A las ignimbritas no soldadas, de tonalidades blancoamarillentas y con contenidos apreciables de pómez, se les conoce localmente en Canarias con el nombre de “toba” o “tosca”, al igual que los piroclastos de proyección aérea cementados. Presentan en superficie valores de RMR comprendidos entre 60 a 75.
- **Materiales piroclásticos sueltos o débilmente cementados.** Suelen ser poco compactos y fácilmente colapsables. Se forman cuando los fragmentos de magma caen y se depositan en las inmediaciones del centro eruptivo. Los de mayor tamaño reciben el nombre genérico de escorias, que en algunos casos adquieren formas redondeadas al girar en el aire (bombas); los traquíticos y/o fonolíticos, más ligeros, claros y porosos, constituyen los depósitos de pómez, también conocidos como depósitos plinianos o de lluvia piroclástica. Por tanto se trata de depósitos piroclásticos de baja densidad, con pesos específicos aparentes secos medios habituales entre 7 y 13 kN/m³. Presentan valores de RMR comprendidos entre 0 a 25.

Los problemas geotécnicos más habituales de estos materiales son los siguientes:

- Resistencia variable, desde media a alta resistencia y baja deformabilidad (ignimbritas), a baja resistencia y elevada deformabilidad (piroclastos sueltos).
- Colapsabilidad mecánica (piroclastos sueltos).
- Asientos diferenciales (piroclastos sueltos).
- Presencia de niveles orgánicos que pueden incrementar la cuantía y duración de los asentamientos.
- Moderada expansividad. Este es un factor a considerar con mayor detenimiento en los niveles piroclásticos sueltos, especialmente si los procesos de alteración producen localmente niveles arcillosos.

Depósitos aluviales y coluviales

Los depósitos aluviales son sedimentos fluviales poco o nada consolidados. Están constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas. Estos depósitos tienden a extenderse a lo largo del curso bajo de los ríos, formando llanuras aluviales y deltas, en terrenos con muy bajas pendientes.

Los depósitos coluviales son formaciones sedimentarias con un grado de consolidación muy variable, situadas a base de laderas montañosas, en las que las partículas son transportadas por gravedad bien como material suelto o por sedimentación a partir de aguas no canalizadas. Se caracterizan por presentar escasa o nula granoselección, con clastos angulares y matriz arcillosa. Son materiales porosos y compresibles.

Habitualmente presentan movimiento muy lento con signos notables de inestabilidad debido a que en ocasiones la pendiente supera la de equilibrio.

Tanto en el caso de los depósitos aluviales como coluviales, la matriz de naturaleza detrítica (limosa o arcillosa) puede ser abundante o estar ausente.

Los problemas geotécnicos que pueden afectar a las condiciones de cimentación en esta unidad son, entre otros, los siguientes:

- Moderada y baja resistencia, asociada a deformabilidad moderada a alta.
- Inestabilidades puntuales en zonas próximas a relieves montañosos de pendiente moderada a alta. Ligeros abarrancamientos.
- Asientos diferenciales.
- Asientos por consolidación en términos arcillosos. Asientos de colapso.
- Moderada expansividad de los niveles arcillosos.

Rellenos antrópicos

Se refiere a los depósitos colocados por la acción del hombre, en general sin control alguno, de origen muy variado. La naturaleza de estos depósitos es muy diversa, en términos generales se pueden asimilar a sedimentos heterométricos, con bolos y bloques angulosos a subangulosos y abundantes finos en la matriz (arenas y limos). En determinadas circunstancias pueden contener materiales de reciclaje y residuos de la actividad humana. Constituyen una de las amenazas más importantes para el buen comportamiento de las cimentaciones.

Se definen como terrenos no aptos para cimentar edificios salvo que se realice las mejoras o refuerzos que incrementen sus propiedades, tal y como se establece en el Art. 8 del DB SE-C.

Los problemas geotécnicos más habituales de estas unidades son los siguientes:

- Baja resistencia y elevada y muy elevada deformabilidad a corto y largo plazo.

- Debido a la elevada heterogeneidad que presentan, plantean un problema añadido a la hora de definir sus características geotécnicas. Su comportamiento es muy diferenciado y da lugar a asentamientos a largo plazo.
- Grados de compactación muy bajos o inexistentes.
- Riesgos de colapsos, combustión espontánea, emanación de gases, agresividad química, etc.

Todo Estudio Geotécnico deberá contar con una manifestación particular y explícita de la existencia o no de rellenos antrópicos en la superficie de la parcela estudiada y en las testificaciones de los sondeos, para así definir su tratamiento o bien recomendar su eliminación en el caso de existir bajo el plano de cimentación previsto.

6.- RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

En este apartado se aportarán diferentes recomendaciones constructivas a la hora de cimentar sobre los terrenos volcánicos. Por un lado, se hará referencia al tipo de cimentación más utilizado para el apoyo de las estructuras sobre el subsuelo de la ciudad y, por otro, al tratamiento y preparación de la cimentación.

Características generales de las cimentaciones

Como se ha descrito, la mayor parte de los materiales reconocidos en los sondeos son de naturaleza basáltica por lo que las cimentaciones de los edificios y obras lineales que conforman la ciudad están cimentadas apoyadas principalmente sobre este tipo de coladas.

Las coladas basálticas suelen presentar una capacidad portante aceptable pero, debido a las características especiales que presentan, se deben tomar una serie de precauciones tanto en las coladas de tipo “aa” como en las coladas de tipo “pahoehoe”.

Así, se recomienda, de manera complementaria, la realización de barrenas para delimitar el espesor y continuidad de la roca basáltica, así como, detectar posibles embolsamientos de escorias o cuevas.

La mayor parte de las cimentaciones de las edificaciones de la ciudad están realizadas mediante zapatas aisladas (con diferentes dimensiones en función de la carga) unidas mediante vigas riostras en todas direcciones. En casos puntuales se utilizan zapatas corridas.

Debido a la naturaleza de las coladas es probable que, a cota de cimentación, aparezcan embolsamientos de escorias que presentan unas características geotécnicas muy diferentes a las de la roca basáltica.

Tratamiento, preparación de la cimentación y drenaje

En el caso de que la cimentación se sitúe sobre la roca, una vez nivelado y saneado el terreno, se podrá cimentar mediante zapatas aisladas. Las dimensiones de las mismas dependerán del tipo de obra proyectada.

En aquellos lugares donde la roca tiene poco espesor y bajo ésta se encuentran las escorias, o en el caso que aparezcan directamente las escorias disgregadas, requieren que se hagan unos trabajos previos para consolidar el terreno. Los trabajos de consolidación consistirán en extraer las escorias volcánicas de cada uno de los pozos de zapatas y rellenarlos con hormigón ciclópeo. Para mejorar el pozo de zapata abierto, y al que se ha retirado las escorias, es conveniente que se abra manteniendo las paredes en talud, para así aumentar el rozamiento del hormigón con las paredes del pozo, de esa forma se consigue que dicho hormigón trabaje como una cuña.

En el resultado de los ensayos químicos de agresividad por sales de sulfatos, cloruros y acidez Baumann-Gully, los valores resultantes están por debajo de los máximos establecidos por la EHE .

La ciudad está dentro de la franja de los 5 km, medidos desde la línea de costa, por ello, se deben tomar soluciones de protección del hormigón, por el ataque de cloruros ambientales. Los hormigones de la estructura quedarían expuestos al tipo de ambiente designado como IIIa, debido al proceso de corrosión por cloruros. Para este tipo de ambiente se requiere un hormigón dosificado con un mínimo de 300 kg de cemento, la relación agua-cemento es de 0,50 y la resistencia mínima del hormigón armado debe ser de 30 N/mm².

No obstante, en elementos exteriores de hormigón, se pueden disponer revestimientos o protecciones superficiales, definitivas y permanentes, en cuyo caso el proyectista deberá garantizar documentalmente la efectividad del sistema empleado para proteger el hormigón. En tal caso, se podrá considerar, a todos los efectos relativos a la durabilidad (recubrimientos mínimos, etc), que el hormigón está sometido a la exposición IIa (comentarios a las clases de exposición ambiental en relación con la corrosión de armaduras en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE).

Se debe emplear una capa de hormigón de limpieza de unos 10-15 cm., bajo cada zapata, para así facilitar la nivelación del terreno, a la vez que sirve de protección al hormigón armado frente a las aguas de escorrentía.

Estabilidad de taludes

Además de los sondeos realizados a lo largo de la campaña de campo, se ha elaborado un inventario donde se han recogido 42 taludes (Fig. 6-1) con sus principales características en cuanto a pendiente, estabilidad, etc.

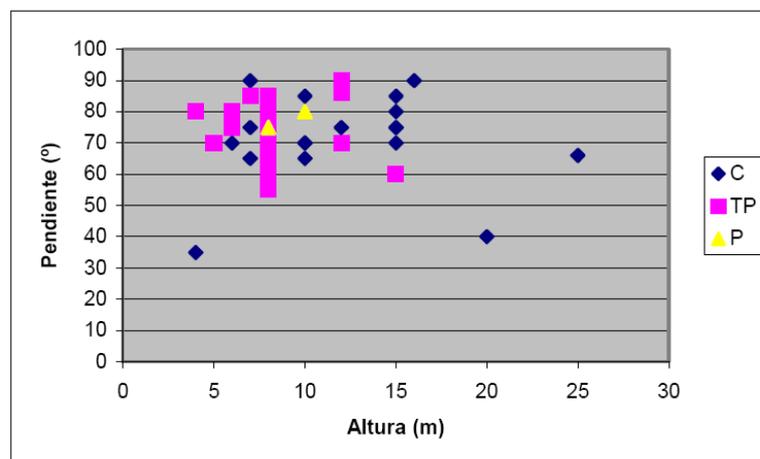


Figura 6-1. Distribución de la pendiente y altura de los taludes analizados. (C) Coladas basálticas, (TP) Tobas pumíticas y (P) Piroclastos.

Tanto de la gráfica anterior como de los datos recogidos en las fichas del inventario de taludes se deducen las siguientes conclusiones:

- Los taludes existentes en coladas volcánicas presentan pendientes muy elevadas, en el intervalo 70 - 90° con alturas máximas de 25 m, los únicos signos de inestabilidad

vienen dados por pequeños derrubios procedentes de intercalaciones de escorias. De acuerdo a lo anterior, se recomiendan taludes de excavación de pendiente 1(H):3(V).

- Las tobas pumíticas también presentan una estabilidad alta hasta alturas de 15 m de acuerdo con los taludes inventariados. Los únicos signos de inestabilidad detectados vienen dados por caídas de gravedad de pequeños cantos. El inventario recoge taludes verticales con alturas de 12 m; el único talud investigado de 15 m de altura presenta una inclinación de 70°. Dada la naturaleza de esta unidad geotécnica se recomiendan taludes de excavación con pendientes máximas de 1(H):2(V).
- Sólo se han inventariado 2 taludes excavados en piroclastos, de 8 y 10 m de altura respectivamente, a pesar de que presentan pendientes elevadas, 75 – 80°, los signos de inestabilidad son numerosos, deslizamientos circulares, caídas por gravedad, etc. Se recomiendan taludes de excavación de inclinación 1(H):1(V).
- No se han descrito taludes excavados en suelos cuaternarios ni en rellenos antrópicos ya que su extensión es muy reducida en todas las alternativas estudiadas y en general constituyen pequeñas coberteras en los desmontes previstos, aunque dada la naturaleza de estos depósitos se recomiendan los siguientes taludes de excavación:

Suelos Cuaternarios 1(H):1(V)

Rellenos antrópicos 2(H):1(V)

Los taludes durante la excavación pueden ser prácticamente subverticales. Sí se observa material disgregado se deberán tomar medidas correctoras como pueden ser la colocación de redes de protección, proyección de lechadas ó reducir la geometría del talud.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un estudio geológico-geotécnico del centro de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife realizado, mediante sondeos y ensayos (in situ y de laboratorio), en treinta puntos de investigación. Después del análisis de los datos recopilados se extraen las siguientes conclusiones:

En el subsuelo urbano del centro de la ciudad se identifican seis unidades geotécnicas: Coladas basálticas sanas, Macizos basálticos alterados, Materiales piroclásticos, Depósitos aluviales y coluviales, Suelos arenosos y, finalmente, Rellenos antrópicos.

Las Coladas basálticas sanas reconocidas en la ciudad son coladas “aa” y “pahoehoe”.

Las coladas “a-a” se caracterizan por la presencia de un compacto de roca, interrumpida en su base por un embolsamiento de escorias volcánicas, la alternancia de roca y escorias se repite en muchos metros de profundidad, pero lateralmente, la colada también se puede interrumpir con un embolsamiento de escorias. Las escorias son gravas (generalmente mal graduadas) cuyo origen es volcánico, de granulometría muy variada y sin ningún tipo de cohesión. El espesor de este tipo de coladas es relativamente alto en determinadas zonas pero en otras puede ser muy reducido debido a la poca continuidad lateral que presentan. Debido a este problema, no se consideran aptas como nivel de cimentación sin tomar las medidas oportunas. Clasificadas en los grupos del terreno T-1 y T-3.

Las coladas “pahoehoe”, generalmente, presentan espesores mayores que las coladas de tipo “aa”, con menor proporción de escorias (localizadas en la base de la colada) presentando basaltos vacuolares y masivos. La principal problemática que presentan son los tubos volcánicos. Clasificadas en el grupo del terreno T-3.

El Macizo basáltico alterado está formando por alternancia de coladas basálticas delgadas con intercalaciones de piroclastos de la Serie I y II, los litotipos están altamente meteorizados, presentando peores características geotécnicas respecto a las coladas basálticas sanas. Se clasifica en el grupo del terreno T-1.

Las rocas basálticas ensayadas a compresión (seis tipos rocosos) presentan densidad media variable de 2,16-2,59 gr/cm³, con ángulo de rozamiento interno de 47° (a favor de las diaclasas), RMR entre 43-73 y tensiones medias admisibles de 0,213 a 0,351 Mpa. Estas unidades basálticas necesitarán de martillo neumático rompedor para su excavación.

Los Materiales piroclásticos extraídos en los sondeos son tobas volcánicas pumíticas y lapilli soldado. Se clasifican como materiales del grupo del terreno T-2 y T-3, dependiendo de su compacidad.

Las tobas volcánicas pumíticas se reconocen intercaladas con coladas basálticas o adoptando una disposición dispersa. En la mayor parte de los sondeos realizados se extraen a gran profundidad, abarcando la mayor parte de la superficie estudiada. Aunque en muchas zonas presentan consistencia de roca, en otras, se recupera disgregada.

El lapilli basáltico soldado se reconoce de manera localizada y en puntos distanciados entre sí, no descartando su existencia en otras zonas de la ciudad.

La compacidad y cohesión de los materiales piroclásticos es muy variada y dependerá de las características propias de cada depósito, en este caso en particular presentan densidad media entre 1,54 y 1,87 gr/cm³, con ángulos de rozamiento interno entre 29°-43° (materiales sin cohesión), RMR entre 54-65 y tensiones medias admisibles entre 0,105 y 0,140 Mpa. Aunque esta unidad es ripable, puede necesitarse martillo neumático rompedor en los litotipos más soldados. Esta unidad se ha sometido ensayos de compresión y ensayos de penetración.

Los Depósitos aluviales y coluviales reconocidos en el suelo de la ciudad presentan granulometría y composición variable. Son materiales provenientes de la erosión del Macizo de Anaga, con ausencia o poca presencia de finos y cantos basálticos centimétricos generalmente redondeados o subredondeados. Se detectan en la base de las Coladas basálticas sanas. Se clasifican dentro del grupo del terreno T-3.

La cohesión y ángulo de rozamiento interno de esta unidad depende de la proporción de finos y el grado de cementación, generalmente, no presenta cohesión aunque localmente puede encontrarse cementada. Los ensayos de penetración realizados presentan una tensión media admisible de 0,094 Mpa.

Los Suelos arenosos se detectan localmente y cerca de la línea costa, se trata de arenas de naturaleza basáltica con cantos redondeados. De la misma manera que los Depósitos aluviales y coluviales, se encuentran cubiertos por coladas basálticas. Se clasifican dentro del grupo del terreno T-3.

Los Rellenos antrópicos se reconocen superficialmente en varios puntos de la ciudad. En la mayor parte de los casos son depósitos de poca potencia y se deben retirar antes de cimentar. Los de mayor importancia (antiguas labores agrícolas) se localizan en la ladera del Macizo de Anaga. Se clasifican dentro del grupo del terreno T-3.

La mayor parte del subsuelo investigado presenta coladas basálticas y tobas volcánicas cubriendo los depósitos de tipo aluvio-coluvial y arenosos. Las coladas basálticas alteradas al igual que los rellenos antrópicos de mayor entidad se localizan en la base del Macizo de Anaga.

El tipo de cimentación más utilizado es mediante zapatas aisladas unidas mediante vigas riostras.

En todo el entorno no se observan materiales agresivos en los suelos, salvo la derivada de la proximidad al mar, por cloruros.

La ciudad se encuentra en una zona con drenaje aceptable (principalmente superficial, pero con eventuales acuíferos someros). Aunque el núcleo urbano se encuentra atravesado por el Barranco de los Santos (que llevan las aguas procedentes de escorrentía superficial), es

frecuente que en episodios tormentosos o de tipo torrencial se inunde la parte baja de la ciudad.

De manera general, los materiales volcánicos reconocidos en el subsuelo de la ciudad presentan condiciones constructivas favorables aunque presentan gran variabilidad tanto vertical como horizontal, siendo apto para cimentar tomando las precauciones oportunas.

8. REFERENCIAS

- ANGUITA, F., HERNAN, F. (1975). A propagating fracture model versus a hot spot origin for the Canary islands. *Earth and Planetary Science Letters*. 27 (1): 11-19.
- ANGUITA, F., HERNAN, F. (2000). The Canary Islands origin: a unifying model. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 103 (1): 1-26.
- ANGUITA, F., MÁRQUEZ, A., CASTIÑEIRAS, P. Y HERNÁN, F. (2002). *Los volcanes de Canarias (Guía Geológica e Itinerarios)*. Editorial Rueda, s. l., Madrid, 222 pp.
- ARAÑA, V., HERNAN, F., ORTIZ, R. (1975). Deep structure of Timanfaya Volcano and its implications on the Canarian Archipelago origin. *IUG Meeting*. Grenoble.
- CARRACEDO, J.C., CARABALLO, J.M., FUSTER CASAS, J.M. Y GARCÍA CAMACHO, L. (1979). Mapa Geológico de España. E: 1/25.000. Hoja 1114-1105/I-IV: Santa Cruz de Tenerife. Memoria y mapa. Segunda Serie. Primera Edición. Ministerio de Industria. Madrid.
- MINISTERIO DE VIVIENDA (2006). *Código Técnico de la Edificación (C.T.E.). Seguridad Estructural: Cimientos*. Boletín Oficial del Estado, Ministerio de la Vivienda, 160 pp.
- CUSTODIO, E. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Instituto de Hidrología. Centro de Estudios Hidrográficos, publicación 128, Madrid, 303 pp.
- CUSTODIO, E. Y LLAMAS, M.R. (1976). *Hidrología subterránea*. 2 Vols. Ed. Omega, Barcelona, 2359 pp.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L.I., GARCÍA MAYORDOMO, J., INSUA, J.M. (2006). Seismotectonics and Seismic Hazard of the Canary Islands. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 96: 2040-2049.
- HERNANDEZ, L. E., RODRÍGUEZ LOSADA, J.A., OLALLA, C. (2011). *Guía para la realización y la planificación de estudios geotécnicos para edificación en las Islas Canarias*. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Gobierno de Canarias.
- HOERNLE, K.A.J., SCHMINCKE, H.U. (1993). The Role of Partial Melting in the 15-Ma Geochemical Evolution of Gran Canaria: A Blob Model for the Canary Hotspot. *Journal of Petrology*. 34 (3): 599-626.
- MEYERHOF, G.G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *J. Soil Mech. A.S.C.E.*, 82: 1: 1.
- MORGAN, W. J. (1971). Convection Plumes in the Lower Mantle. *Nature*. 230: 42-43.
- RODRÍGUEZ LOSADA, J.A., HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ L.E., OLALLA, C., PERUCHO, A., SERRANO, A., EFF-DARWICH, A., (2009). Geomechanical parameters of intact rocks and rock masses from the Canary Islands: Implications on their flank stability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 182: 67-75.

SERRANO, A., OLALLA, C. (2001). Carga de hundimiento en macizos rocosos según el criterio de Hoek-Brown modificado. *Ingeniería Civil*. 121: 89-93.

WILSON, J.T. (1973). Mantle plumes and plate motions. *Tectonophysics*. 19 (2): 149-164