PROPUESTA DE DIVISIÓN GEOLÓGICA DE LA LOCALIDAD DE ADRA (PROVINCIA DE ALMERÍA). APLICACIÓN A LA ZONACIÓN SÍSMICA

F. J. Alcalá-García[1,2], J. Espinosa[3], M. Navarro[4] y F. J. Sánchez[4]

[1] *Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.*
[2] *Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica, Universidad Politécnica de Cataluña, 08034 Barcelona (francisco.alcala@upc.es).*
[3] *Protección Civil de Adra. Cno. del Ingenio 1, 04770 Adra (Almería).*
[4] *Departamento de Física Aplicada, Universidad de Almería, La Cañada, 04120 Almería.*

Resumen: Se propone una división de los materiales geológicos superficiales de la localidad de Adra (Almería) en seis clases según la capacidad de amplificación sísmica que presentan a partir de sus periodos dominantes. Esta división atiende a la naturaleza geológica de los sedimentos, su grado de saturación en agua, la capacidad de licuefacción y otras propiedades dinámicas. Se ha definido el rango de velocidad de ondas S, valor-N de ensayos (SPT) y densidad real del sedimento, obteniendo el periodo dominante máximo y medio de cada material en función al espesor medio y máximo estimado para cada formación geológica. Se ha estimado la capacidad de licuefacción de estos sedimentos en función al valor-N, la densidad real y velocidad de ondas S (Vs) obtenidos. Cuatro de estos materiales presentan periodos dominantes altos, susceptibles de amplificación sísmica. El aluvial detrítico holoceno del río Adra, los rellenos antrópicos, las terrazas marinas actuales y los glacis continentales con potencias superiores a 50 metros presentan las condiciones de suelo más desfavorables de respuesta sísmica.

Palabras clave: Geología superficial, clasificación del suelo, periodos dominantes, valor-N (SPT), licuefacción, amplificación sísmica.

Abstract: A classification of geologic subsurface materials from Adra town (Almería) has been made. The superficial rocks have been ordered in six classes according to the capacity of seismic amplification whit respect to its predominant periods. This division is based on the geologic nature of the sediments, the saturation degree in water, the liquefaction susceptibility and other dynamic properties. It has been defined the S-wave velocity ranges, N-value of (SPT) test and real density, obtaining the maximum and half predominant period of each material in function to the maximum and half thickness considered for each geologic formation. The capacity of liquefaction of these sediments have been aimed in function to the N-value, the density and S-waves velocities (Vs) obtained. It has been observed four materials that present high predominant periods, susceptible of seismic amplification. The holocene detritical alluvial of Adra river, the anthropics fillings, the present marine terraces and the continental glacis, with thickness upper to 50 meters, present the more unfavourable soil conditions of sismical answer regarding earthquakes.

Key words: Surface geology, landform classification, predominant periods, (SPT) N-value, liquefaction, seismic amplification.

Alcalá-García, F.J., Espinosa, J., Navarro, M. y Sánchez, F.J. (2002): Propuesta de división geológica de la localidad de Adra (provincia de Almería). Aplicación a la zonación sísmica. *Rev. Soc. Geol. España.* Vol 15 (1-2): 55-66

Son muchos los ejemplos de terremotos donde la Geología superficial de un área urbana ha influido de manera notable en el nivel de la sacudida sísmica, amplificando ciertos rangos de frecuencias (Seed *et al.*, 1985; Towhaka y Roteix, 1988). La distribución de los daños ocasionados está fuertemente influenciada por las características dinámicas del suelo, y por el hecho, de que la Geología superficial amplifica el movimiento de un rango de periodos de los materiales que coincide con el periodo de vibración de las estructuras dañadas (Seo, 1994). Esto ha puesto de manifiesto, de forma dramática, la relación existente entre la amplificación sísmica debida a la Geología superficial y el grado de destrozos, observándose como los materiales no consolidados suelen ser los responsables de importantes modificaciones en la amplitud y contenido espectral de la sacudida sísmica producida por dichos terremotos (Youd y Perkins, 1978).

El 23 de diciembre de 1993 y el 4 de enero de 1994 se produjeron dos terremotos de magnitud Mb 5,0 y 4,9 próximos a la localidad de Adra (provincia de Almería, Fig. 1a) con una génesis compuesta (Martínez-Díaz, 2000). Afortunadamente no se produjeron pérdidas humanas, aunque los daños materiales afectaron por desigual a zonas urbanas muy próximas, lo que evidenció el posible

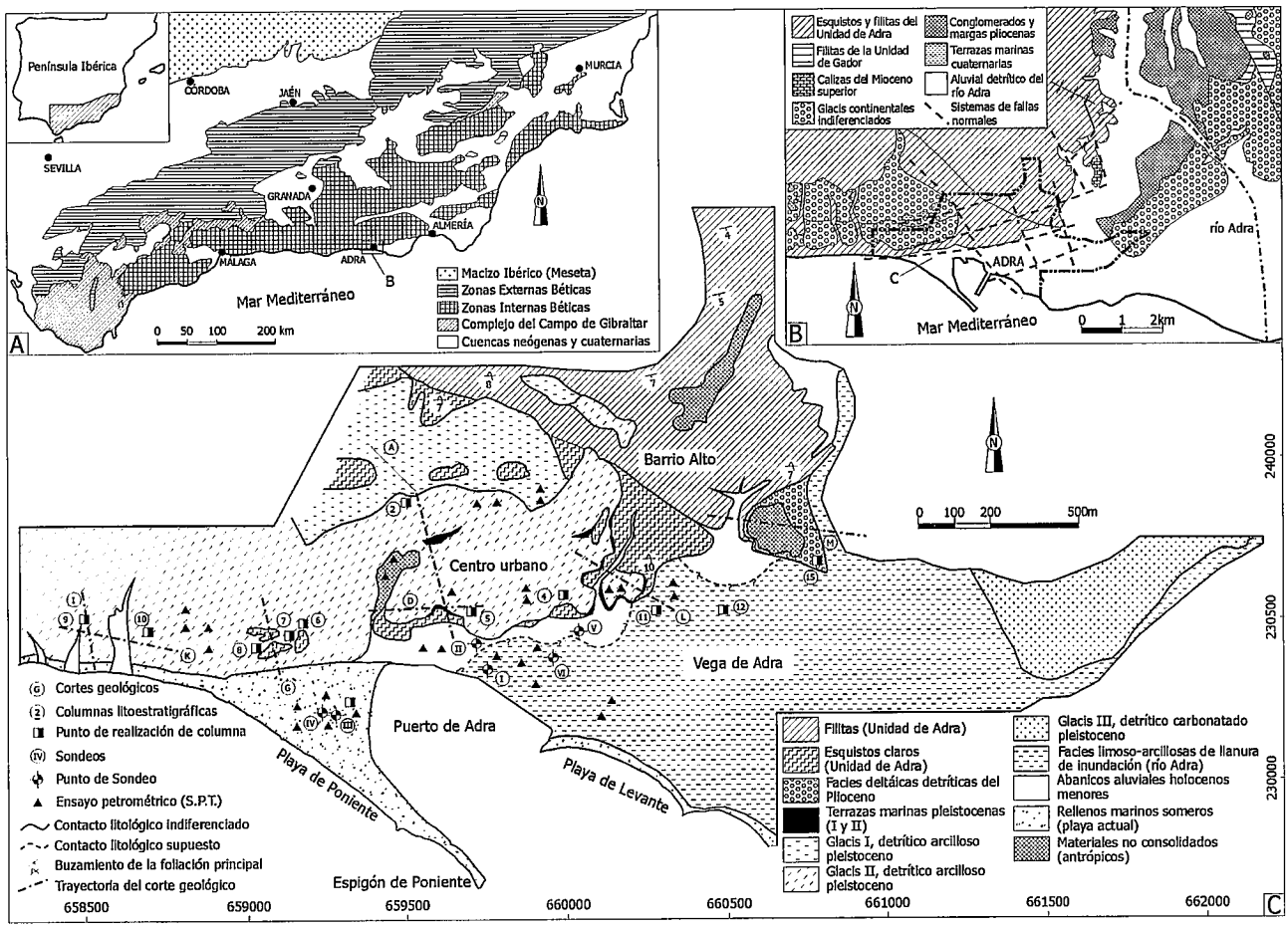

Figura 1.- A: Localización geográfica y geológica de la localidad de Adra, esquema geológico modificado de Fallot (1948). B: Esquema geológico comarcal modificado de Aldaya *et al.* (1983). C: Cartografía geológica de la localidad de Adra (escala original 1:5.000).

control que la Geología superficial ejercía sobre la desigual respuesta de los materiales ante los eventos sísmicos.

Los estudios de zonación geológica para prevención de fenómenos sísmicos requieren el estudio del efecto de sitio. Aunque el efecto de sitio es diferente en cada punto y nuestra capacidad de medir y estimar el efecto de sitio es limitada, podemos dividir el área de investigación en diversas zonas, que tienen condiciones del suelo casi homogéneas pudiendo estimar su respuesta ante un terremoto. La división regional del área de investigación a partir de las condiciones de los materiales es un método muy útil para reducir el número de sitios cuyo efecto tiene que estimarse. Un primer paso deberá ser la correcta identificación geológica y geotécnica de los materiales para posteriormente poder extrapolar espacialmente las condiciones de suelo obtenidas.

En este estudio, se analizan las condiciones de los materiales geológicos superficiales de la localidad de Adra (Almería), diferenciándolos en varias clases según su capacidad de amplificación sísmica. Para ello se han determinado sus características geotécnicas básicas (valor-N de ensayos SPT y densidad real). A partir de estos datos, que identifican la naturaleza del material, se pueden obtener los valores empíricos de la velocidad de ondas S (Vs). Estos valores obtenidos empíricamente y los establecidos según los tipos de litología observada permiten obtener los periodos dominantes de oscilación y su susceptibilidad aproximada a la licuefacción.

Marco geológico

La localidad de Adra se localiza al SO de la provincia de Almería, SE de España (Fig. 1). Desde el punto de vista geológico está encuadrada dentro de las Zonas Internas de la Cordillera Bética, y más concretamente dentro del Complejo Alpujárride (Fallot, 1948; Sanz de Galdeano, 1997). En el área de estudio afloran materiales de distinta naturaleza con edades que van desde el Paleozoico hasta el Holoceno (Aldaya *et al.*, 1983).

Los materiales mas antiguos pertenecen al Complejo Alpujárride (Fig. 1), un conjunto de mantos con distinto grado de metamorfismo constituidos por esquistos, micaesquistos, filitas y esquistos grafitosos de edad Paleozoico-Permotriásica denominados Unidad de Adra (e.g. Aldaya y García Dueñas, 1976; Aldaya *et al.*, 1983; Sanz de Galdeano, 1997). Este conjunto de materiales constituye un zócalo rocoso pre-orogénico sobre el que se asientan, siempre de forma discordante, las rocas sedimentarias marinas y continentales post-orogénicas del Mioceno superior al Cuaternario.

El reconocimiento de estos materiales ha permitido realizar un estudio de correlación estratigráfica y una

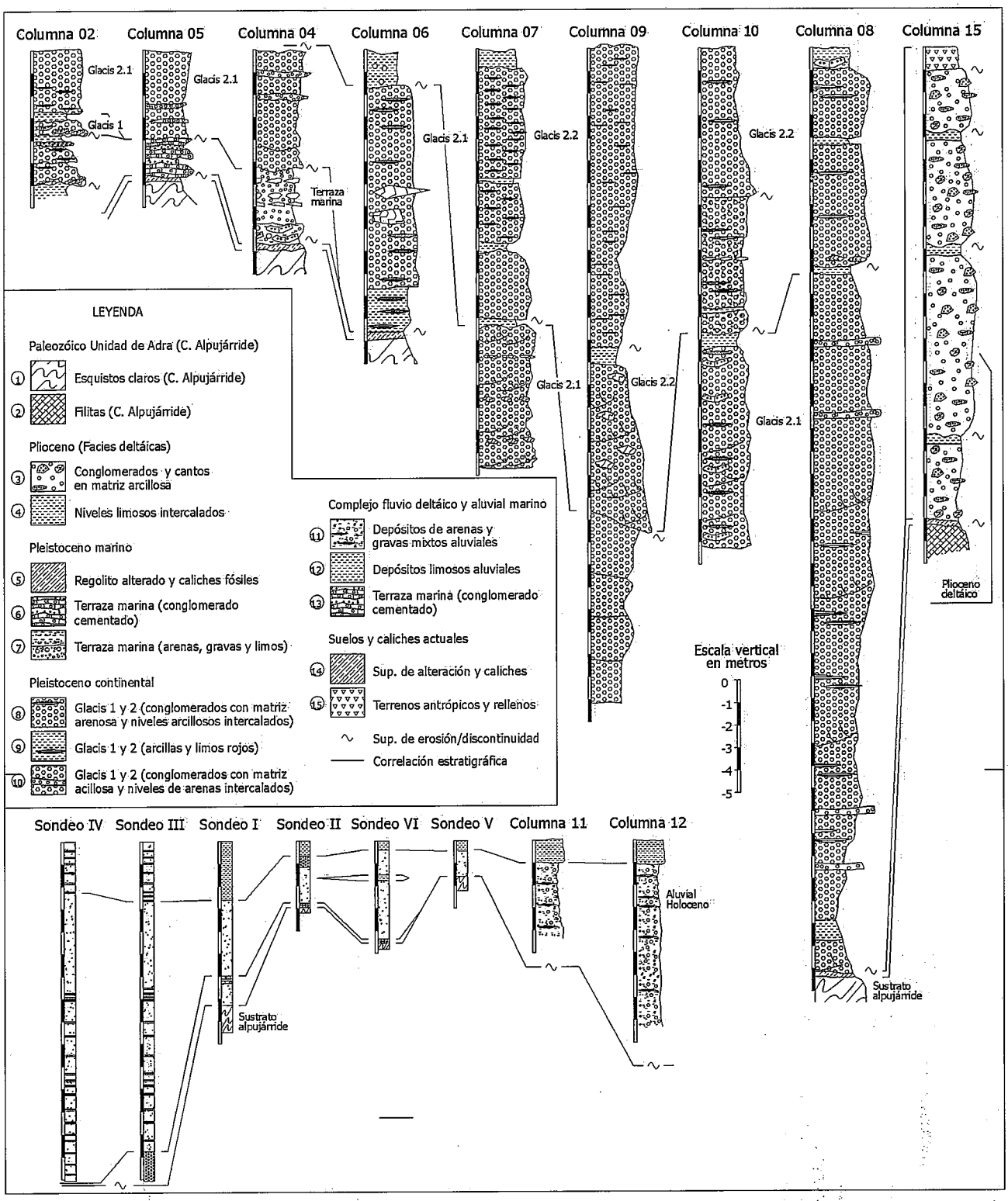

Figura 2.- Ensayo de correlación estratigráfica a partir de algunas columnas estratigráficas y columnas de sondeos. Su localización aparece en la Figura 1c.

cartografía geológica (1:5.000) de la localidad de Adra (Fig. 1c).

Los materiales postorogénicos se encuentran al este y oeste de Adra, el borde sur del sustrato alpujárride (Figs. 1c, 2 y 3). Sus edades están comprendidas entre el Tortoniense superior y el Holoceno, presentando geometrías y distribuciones espaciales complejas en detalle (e.g. Fourniguet, 1975; Goy y Zazo, 1986; Aguirre, 1998), que hacen que no aparezca un registro sedimentario completo. Se han reconocido los siguientes materiales, distribuidos por edades:

Plioceno medio

Se compone de cuatro tipos de facies: deltáicas, litorales, infralitorales y distales (Fourniguet, 1975; Aguirre,

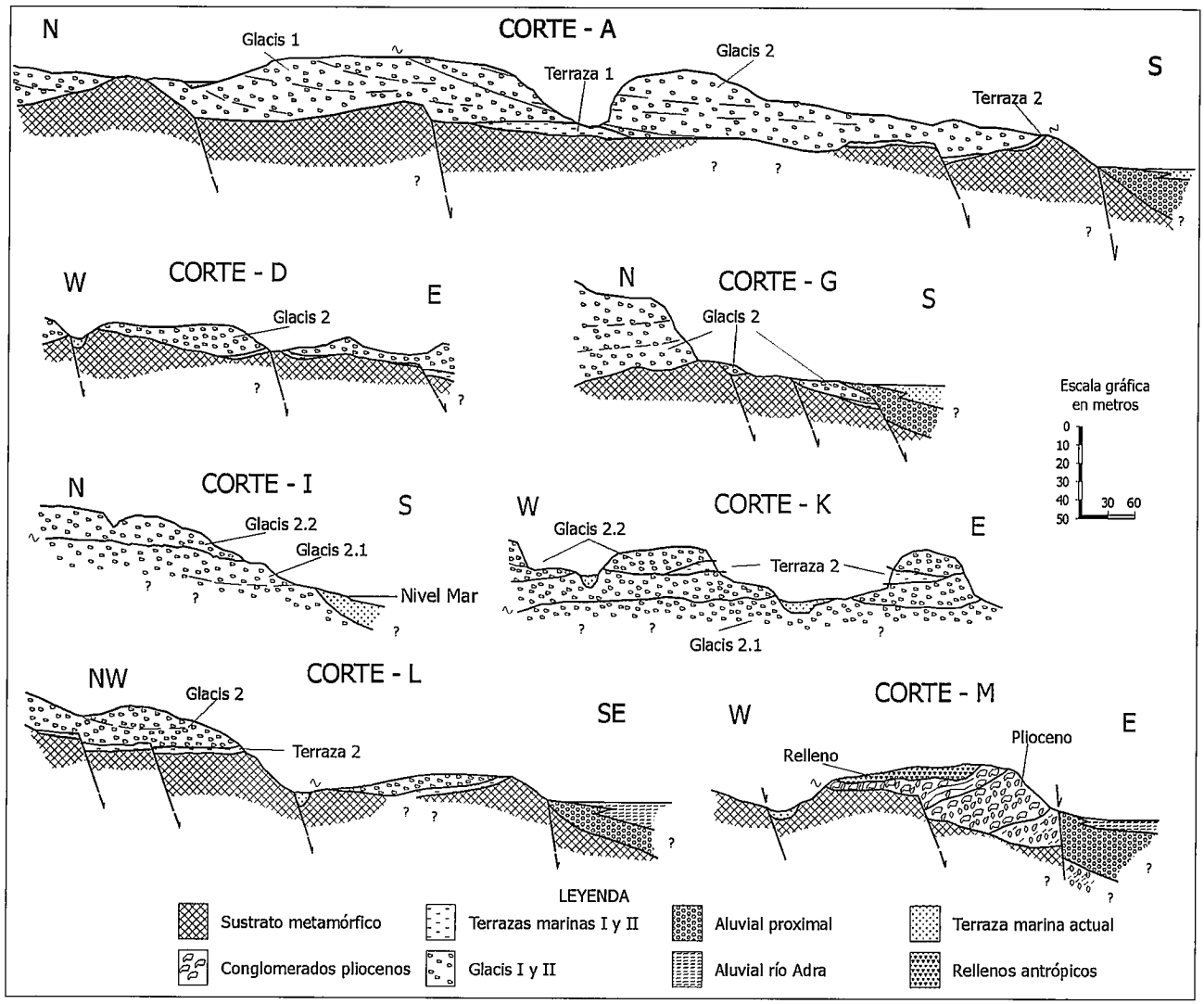

Figura 3.- Cortes geológicos realizados a partir de la cartografía geológica a escala 1:5.000. Su localización aparece en la Figura 1c.

1998), que transicionan lateralmente. De ellas, sólo las deltáicas se encuentran discordantes sobre el sustrato alpujárride al este de Adra (Figs. 1 y 2). Están constituidas por una serie detrítica que buza 10-15° al NO, de 20 metros de potencia, con cantos poco redondeados en una matriz arenoso-arcillosa. El resto de facies no afloran en superficie, aunque según datos de sondeos, transicionan lateralmente hasta las facies distales (ITGE, 1999).

Pleistoceno

Se han diferenciado dos tipos de sedimentos (marinos y continentales). Los marinos se corresponden con dos episodios de terrazas marinas (Figs. 2 y 3). Están compuestos por gravas y bloques redondeados mas o menos cementados y una matriz arenosa, y episodios de arenas y gravas poco consistentes de 1 a 5 metros de espesor. Los continentales constituyen tres generaciones de *glacis* (en sentido geomorfológico) muy detríticos y más o menos cementados, junto con niveles de limos rojos finos pulverulentos (Fourniguet, 1975; Goy y Zazo, 1986). Están compuestos por gravas, arenas gruesas y finas en una matriz limoso-arcillosa roja, con escaso ordenamiento interno y granoclasificación negativa. El sistema sedimentario incluye dos ciclos transgresivos (terrazas marinas) a distinta cota y dos ciclos de regresión marina (glacis continentales). En la Fig. 1 puede observarse como el límite entre el glacis 1 y 2 dibuja una línea casi paralela al sustrato rocoso alpujárride (línea de costa durante el Pleistoceno).

Holoceno

Está representado por dos tipos de facies. Un depósito mixto aluvial-marino de carácter transgresivo de arenas finas y medias, y gravas redondeadas y planas, con potencias que van desde 2 a más de 50 metros. Sobre éste y cubriendo casi toda la superficie deltaica aparecen unas facies limoso-arcillosas regresivas asociadas a la formación de lagunas de inundación en un ambiente de barras litorales "*lagoon*". Presenta espesores entre 1 y 5 metros (Fourniguet, 1975). Otros depósitos son los aluviales proximales poco diferenciados de las ram-

Formación	Características de los materiales											Observaciones
	Litología	*medidas del valor-N (SPT)*	*valor-N (SPT) (promedio)[1]*	*media/ mediana valor-N*	*espesor (metros) (promedio)[2]*	*medidas de D. real (Dr)*	*D. real (Dr) (gr/cm³) (promedio)[1]*	*media/ mediana D. Real (Dr)*	*Vs según Imai (1981)*	*Vs según Kokusho (1987)*	*Materiales subyacentes*	
Sustrato	Esquistos	9	>50 (>50)*	0,91	---	---	---	---	---	---	---	Zonas más fracturadas y/o meteorizadas son vulnerables a los desprendimientos
Sustrato	Filitas	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Vulnerable a deslizamientos
Conglomerado Plioceno	Gravas con matriz arcillosa	2	>50 (>50)	1,00	>20 (5)	2	~ 1,90**	1,00	389	402	Roca consistente	Vulnerable a deslizamientos Material acuitardo (no saturado)
Terraza marina 1 Terraza marina 2	Arenas medias y gruesas	4	30-35 (32)	1,00	1-5 (2)	4	1,75-1,80 (1,78)	1,00	297	317	Roca consistente	Vulnerable a licuefacción Acuífero semiconfinado muy permeable
Glacis 1 Glacis 2	Gravas y arenas arcillosas	15	35-50 (41)	1,04	1-50 (12)	14	1,80-1,90 (1,86)	0,99	340	344	Terrrazas marinas y roca consistente	Susceptible de deslizamientos Material acuitardo (no saturado)
Aluvial proximal	Gravas y arenas medias	2	25-30 (27)	1,00	1-5 (2,5)	2	1,80-1,85 (1,82)	1,00	240	240	Roca consistente	Vulnerable a licuefacción Acuífero libre muy permeable
Aluvial río Adra	Limos y arenas finas	8	15-20 (18)	1,01	1-5 (3,5)	8	1,85-1,90 (1,88)	1,00	266	262	Arenas gruesas a finas	Suele estar cubierto por rellenos Vulnerable a licuefacción
	Gravas y arenas medias	8	30-40 (34)	1,00	1->50 (22)	8	1,80-1,85 (1,83)	1,00	259	259	Plioceno y roca consistente	Muy vulnerable a la licuefacción Acuífero libre muy permeable
Terraza marina actual	Arenas gruesas a finas	5	15-20 (17)	0,97	>15 (7)	5	1,75-1,85 (1,81)	0,99	205	205	Roca consistente, Glacis 2, Terraza 2 y Aluvial río Adra	Vulnerable a licuefacción Acuífero libre muy permeable
Rellenos	Bloques y gravas	2	<10 (8)	1,00	Varios (4)	2	<1,70 (1,65)	1,00	160	160	Varios	Muy vulnerable a la licuefacción Materiales muy poco consistentes

[1] El cálculo del promedio de los valores se ha realizado ponderando las 30 mediciones existentes
[2] El cálculo del promedio de los espesores de cada capa se ha realizado ponderando la potencia de las columnas estratigráficas y sondeos realizados
* En algunas zonas de fractura los valores de N han sido inferiores a 50
** Valor estimado según el presentado por estos materiales en localidades cercanas

Tabla I.- Descripción geológica, litológica y geotécnica (valor-N, densidad real (Dr) y estimación empírica de Vs) de las unidades litológicas descritas en Adra.

blas que jalonan, de norte a sur, la localidad y las playas actuales (terraza marina actual).

Método

El estudio geológico comenzó con una descripción de facies, una cartografía geológica a escala 1:5.000 (Fig. 1c), correlación estratigráfica (Fig. 2) y la realización de cortes geológicos (Fig. 3). Para ello fue necesario el uso de fotos aéreas, observaciones de campo, interpretación de testigos de sondeos y ripios de SPT, así como documentación histórica sobre la geografía de asentamientos históricos en la localidad de Adra. También se han incluido algunas descripciones cualitativas sobre la hidrogeología de algunos materiales geológicos que constituyen acuíferos de diversa naturaleza, como el aluvial del río Adra. Estas observaciones se han realizado durante este estudio o se han tomado de otros trabajos (ver Pulido-Bosch *et al.*, 1988; ITGE, 1999).

Se ha realizado una recopilación de datos de sondeos de diferentes empresas de geotecnia. En ellos se incluyen columnas litológicas, 55 valores de N (donde N corresponde al número de golpes necesarios para hincar una puntaza cónica de 30 cm aplicándole un peso de golpeo de 63,5 kg desde una altura de 76 cm) a partir de 30 ensayos de penetración dinámica estándar (SPT) y 49 estimaciones de densidades reales en los sedimentos (Fig. 1c). El cálculo de la densidad real (Dr) o seca se ha realizado en muestras de testigos de sondeos alterados e inalterados y en otras recogidas manualmente, ya

Orden	*Formación*	*Tipo de terreno NCSE-94 (1994)*	*Tipo de terreno Tiedemann (1992)*	*Amplificación según Tiedemann (1992)*	*Veloc. de ondas S (Vs) en m/s Tiedemann (1992)*	*Veloc. de ondas S (Vs) en m/s NCSE-94 (1994)*	*Litología*	*Espesor en (m) máximo[1] medio[2]*	*Periodo dom. (T=4H/Vs) en s máximo[1] medio[2]*
1	Materiales metamorfícos no fracturados	Tipo I	Tipo I	0	~ 1000	> 750	Rocas metamorficas	----	----
2	Materiales metamorfícos fracturados			0				----	----
3	Conglomerados cementados pliocenos	Tipo II	Tipo II	1	500 - 1000	400 - 750	Gravas con matriz arcillosa	~ 20 5	~ 0,16 - 0,08 0,04 - 0,02
4	Galcis poco potente no saturado	Tipo II	Tipo IV	2	~ 500	400 - 750	Gravas y arenas medias	50	~ 0,4
5	Glacis potente no saturado			2				12	~ 0,01
6	Terrazas marinas no saturadas	Tipo III	Tipo V	2	250 - 500	< 400	Arenas medias y gruesas	5	0,08 - 0,04
7	Terrazas marinas saturadas			3				2	0,032 - 0,016
8	Aluvial grosero proximal no saturado	Tipo III	Tipo V	2	250 - 500	< 400	Gravas y arenas medias	5	0,08 - 0,04
9	Aluvial grosero proximal saturado			3				2,5	0,04 - 0,02
10	Aluvial río Adra no saturado poco potente	Tipo III	Tipo V	2	250 - 500	< 400	Limos y arenas finas	5 3,5	0,08 - 0,04 0,056 - 0,028
11	Aluvial río Adra saturado poco potente			3			Gravas y arenas medias	~ 50	0,8 - 0,4
12	Aluvial río Adra saturado potente			4				22	0,352 - 0,176
13	Terraza marina actual no saturada	Tipo III	Tipo V	3	250 - 500	< 400	Arenas medias y gruesas	~ 15	0,24 - 0,12
14	Terraza marina actual saturada			4				7	0,112 - 0,056
15	Rellenos saturados	Tipo III	Tipo VII	5	100 - 250	< 400	Bloques y gravas	10	0,4 - 0,16
16	Rellenos no saturados			5				4	0,16 - 0,064

[1], [2] Rango de periodos dominantes máximos y medios para los espesores máximo y medio de cada material

Tabla II.- Clasificación sísmica de los terrenos. Norma Sismorresistente NCSE-94 (1994) y EDS (Escenarios de Daños Sísmicos) de Tiedemann (1992). Rango de velocidades de ondas S (Vs) y estimación de la amplificación sísmica de los materiales de Adra, en función a las características geológicas y geotécnicas descritas en la Tabla I.

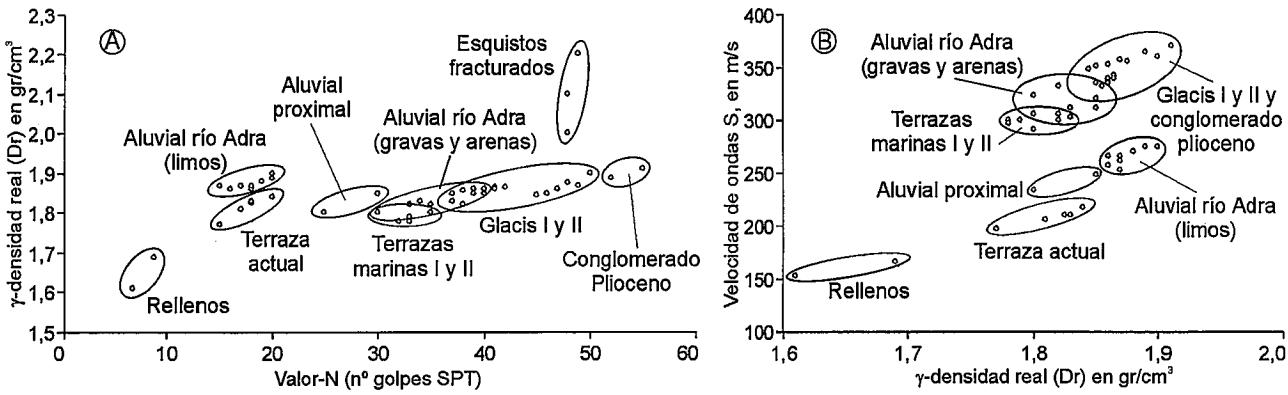

Figura 4.- A: Relación de la densidad real (Dr) y el valor-N de los materiales estudiados, indicativa del grado de compacidad. B: Relación entre la Velocidad de ondas S (Vs) y la densidad real (Dr) de los materiales, indicativa de la capacidad de licuefacción del sedimento.

que no es necesario que las muestras conserven su estructura original. Su determinación se ha realizado separando una fracción representativa de ~ 150 gr de muestra que posteriormente se ha calentado a una temperatura de entre 105 y 110 °C hasta perder toda su humedad. Su estimación se realiza pesando posteriormente la muestra seca y este resultado se relaciona con el volumen de alcohol que desaloja en una probeta calibrada. El error de la balanza está estimado en 0,01 gr y el de la probeta en 0,1 mm. Estos datos han permitido la caracterización geotécnica de los materiales geológicos que se presenta en este trabajo (Tabla I), utilizadas en interpretaciones sismológicas (Towhaka y Roteix, 1988).

Parámetros estudiados

El periodo dominante característico de un material no consolidado está correlacionado con su grado de oscilación durante un episodio sísmico. Se desprende que a mayores valores de periodos dominantes de un material, mayor será la amplificación provocada por las ondas S. La alta heterogeneidad de los materiales no consolidados conlleva la disminución de velocidad de las ondas S al atravesarlos. Si además existe un alto grado de saturación en agua, la oscilación sísmica puede provocar la aparición de fenómenos de licuefacción por agitación de partículas (Obermeier, 1996). En este sentido la inexistencia de estudios granulométricos para todos los materiales reconocidos ha impedido una correcta caracterización de la licuefacción en detalle.

Obtención de la velocidad de ondas S (Vs)

Se ha estimado el valor de la resistencia a la penetración, mediante ensayos SPT y la densidad real (Dr) de los materiales (Tabla I). Los datos obtenidos han permitiendo su clasificación en función al grado de susceptibilidad sísmica que presentan (Fig. 4a). De manera inicial se ha obtenido una primera aproximación de la Vs característica de los materiales a partir del cálculo empírico que se obtiene del valor-N (Tabla I y Fig. 4b), según las siguientes aproximaciones. La primera es la de Imai (1981) que relaciona el valor de Vs con el valor-N a partir del tipo de formación sedimentaria. Vs suele ser igual a $102N^{0,292}$ en aluviales predominantemente arcillosos, igual a $80,6N^{0,331}$ en aluviales arenosos, igual a $114N^{0,294}$ en coluviales arcillosos e igual a $97,2N^{0,323}$ en coluviales arenosos. Kokusho (1987) propone otras relaciones mas simplificadas, donde Vs será igual a $80N^{1/3}$ para materiales arenosos y de $100N^{1/3}$ para materiales principalmente arcillosos. Los valores calculados permiten obtener una primera impresión a cerca del rango de valores de Vs que presenta un sedimento (Tabla I). Pero para una correcta identificación litológica del material es necesario su observación directa en campo, lo que permitirá contrastar los datos obtenidos con las clasificaciones ya establecidas. Por ello y de forma complementaria a los resultados obtenidos se han aplicado dos metodologías encaminadas a la clasificación de valores de velocidad de ondas S (Vs) en función del material geológico encontrado. La primera es la clasificación que propone la Norma Sismoresistente (NCSE-94, 1994),

Rango de periodos dominantes obtenidos, en s	*Formación litológica implicada*
> 0,5	Aluvial del río Adra con potencia superior a 30 metros Rellenos antrópicos saturados superior a 10 metros Glacis continental con potencia superior a 50 metros Terraza marina actual con potencia superior a 10 metros
0,4 - 0,5	Aluvial del río Adra con potencia entre 20 y 30 metros Rellenos antrópicos saturados de ~ 10 metros Glacis continental con potencia entre 30 y 50 metros
0,3 - 0,4	Aluviales del río Adra con potencia inferior a 20 metros Todos los rellenos antrópicos saturados o no Glacis continental con potencia inferior a 30 metros
0,2 - 0,3	Los anteriores y Terraza marina actual con potencia inferior a 10 metros
0,1 - 0,2	Los anteriores y Terraza marina actual con potencia inferior a 5 metros Conglomerados pliocenos con potencia superior a 20 metros
< 0,1	Los anteriores y Conglomerados pliocenos con potencia inferior a 20 metros Terrazas marinas cuaternarias Aluviales proximales groseros Sustrato metamórfico fracturado o alterado

Tabla III.- Clasificación de los materiales geológicos superficiales de la localidad de Adra en función al rango de periodos dominantes obtenidos mediante la relación T=4H/Vs.

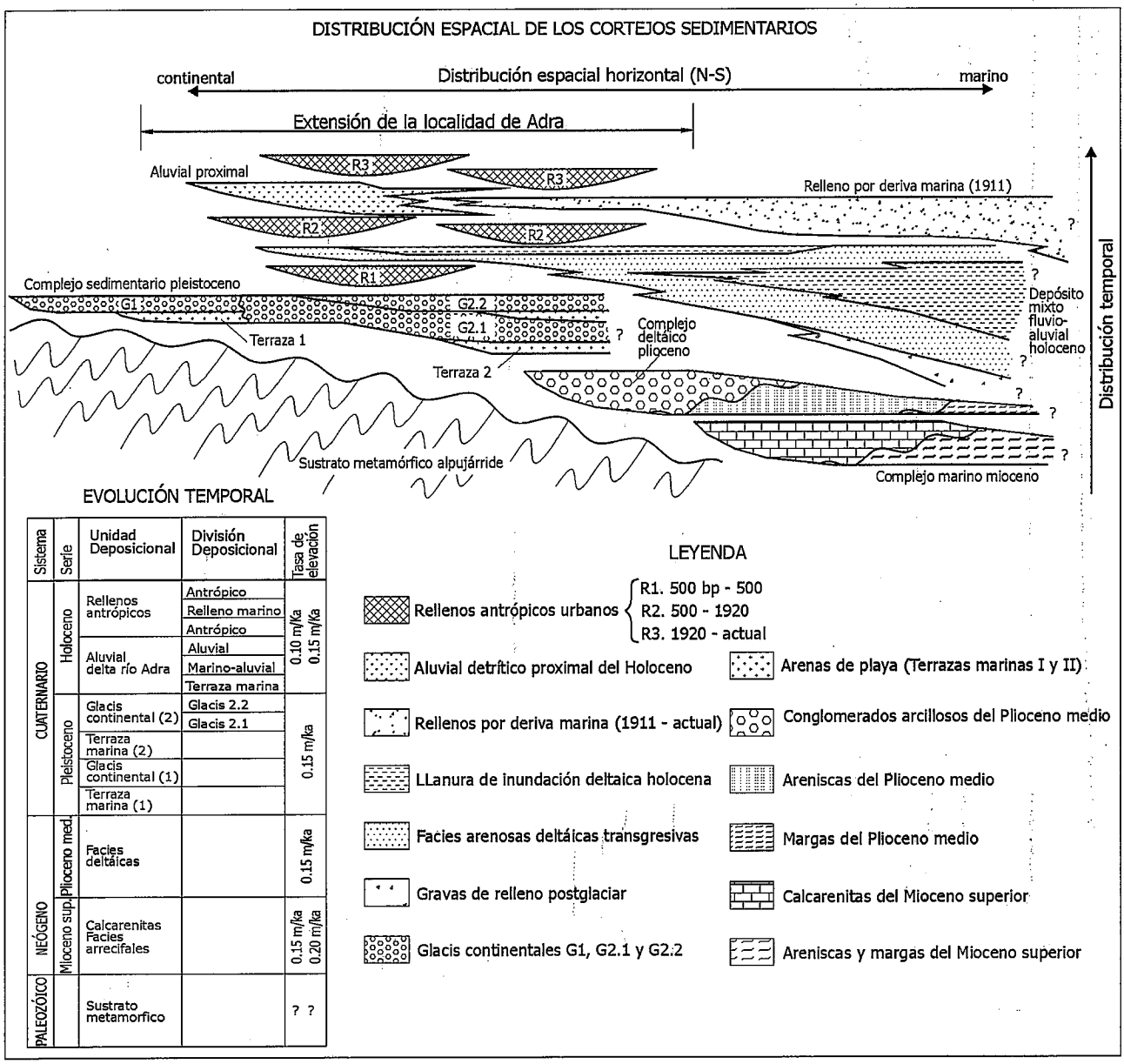

Figura 5.- Cuadro resumen de evolución temporal, espacial y la tasa de elevación según Goy *et al.* (1991). Se indica la ubicación de la localidad de Adra.

que clasifica los terrenos en tres categorías, en función a la velocidad de propagación de las ondas S (Tabla II). La segunda, más rápida y aproximada para observar el efecto amplificador de los terrenos sueltos (Tabla II), es considerar estudios EDS (Escenarios de Daños Sísmicos) que permite clasificar los terrenos en familias de propiedades similares ante la excitación dinámica (Tiedemann, 1992), según la experiencia aportada por numerosos terremotos pasados y la descripción geotécnica realizada (Tabla I). Esta metodología permite relacionar la intensidad sísmica con la resistencia de los terrenos, caracterizada por la velocidad de ondas S, lo que permite establecer un número mayor de tipos de respuesta sísmica de los materiales ante su capacidad de amplificación sísmica (Tabla II).

Con el valor-N obtenido de los 30 ensayos SPT, para los distintos materiales, y las estimaciones de Dr de los sedimentos (en gr/cm^3), se puede caracterizar empíricamente la capacidad de licuefacción de los materiales (Tokimatsu y Yoshimi, 1983), principalmente en aquellos que han presentado bajos valores de Dr (Fig. 4). En esta figura se observa como los rellenos, aluviales y la terraza marina actual presentan los valores más bajos de Vs. Los datos geotécnicos obtenidos han permitido la caracterización de los sedimentos (Tabla I) y la correlación espacial de estas propiedades, pudiendo agruparlos en familias que presentan similar comportamiento de amplificación sísmica y velocidad de propagación de las ondas S (Tabla II).

A modo de ejemplo se citan de forma breve algunas relaciones de uso común en Geotecnia que permiten obtener parámetros muy útiles en estudios sismológicos, sirviendo, en ocasiones, de herramienta complementaria. Schmertmann (1975) relacionó el valor-N con la resistencia al corte y al drenaje de varios tipos de litologías. D'Appolonia *et al.* (1972) establecieron una relación empírica entre el valor-N y el módulo de elasticidad de las arenas. La relación entre el ángulo de fric-

ción de algunos tipos de arenas y el valor-N de penetración fue definida por Mitchell y Kati (1981).

Obtención de los valores empíricos de periodos dominantes

Como ya se ha comentado, el grado de amplificación sísmica está relacionado con el periodo de vibración de un sedimento. La mayoría de estudios de zonación sísmica admiten que el periodo dominante de un terreno se correlaciona con su espesor mediante la expresión T=(4H/Vs), donde H es el espesor del material y Vs la velocidad de ondas S. Esta relación puede, a veces, tender a error si no se consideran factores naturales asociados como el grado de saturación en agua del medio, pero en general suele dar buenos resultados (Towhaka y Roteix, 1988). En la Tabla II se observa el rango de valores máximos y medios de periodos dominantes de los diferentes materiales de la localidad de Adra, obtenidos a partir de los rangos de valores de velocidad de las ondas S propuestos por Tiedemann (1992) y los obtenidos empíricamente a partir de las relaciones de Imai (1981) y Kukusho (1987), estos últimos en función al valor-N obtenido de los ensayos SPT. En la tabla I se enumeran los materiales que aparecen subyacentes al descrito, ya que su comportamiento condiciona la respuesta de los materiales inmediatamente superiores a él (Seed *et al.*, 1985). En la tabla I se incluye además una descripción somera de las principales características hidrogeológicas de cada material, al igual que una interpretación cualitativa de sus permeabilidades tomadas de Pulido-Bosch *et al.* (1988); ITGE (1999) y Alcalá-García *et al.* (2001).

Principales rasgos de la tectónica reciente

En la actualidad existe una convergencia de las placas Africana y Euroasiática (Argus *et al*, 1989) que comenzó en el Tortoniense superior (Comas *et al.*, 1999). Esta convergencia es responsable de un campo de esfuerzos regional compresivo que afecta a la zona de estudio (Herraiz *et al*, 2000) y que condiciona la tectónica reciente. La generación de la última serie sísmica de Adra es un ejemplo de esta actividad tectónica (Martínez-Díaz, 2000). Las fallas mas activas de la zona de estudio corresponden a la Zona de Cizalla del Corredor de la Alpujarra (Sanz de Galdeano *et al.*, 1995), falla de Carboneras (Bousquet y Montenat, 1974) como segmento de la zona de cizalla de Transalborán (De Larouziere *et al.*, 1988) y a las fallas normales de dirección NO-SE (Martínez-Díaz, 2000). Estos sistemas de fallas se ponen de manifiesto por la generación de cuencas y depresiones Plio-cuaternarias sobre el basamento alpujárride.

Esta actividad tectónica reciente afecta a los depósitos Plio-cuaternarios de la zona (Goy y Zazo, 1986). Se ha descrito una tasa de elevación media de los sedimentos de 0.15 m/ka, de forma bastante constante desde el Mioceno hasta la actualidad (Goy *et* al., 1991), lo que provoca el encajamiento de valles fluviales y la generación de terrazas marinas a diferente altura.

Resultados

Aunque no ha sido objeto de este trabajo analizar el condicionante topográfico, se debe mencionar que en la práctica, puede propiciar que ciertos materiales se vean afectados por movimientos de laderas (deslizamientos y desprendimientos, principalmente) durante un evento sísmico (Youd y Perkins, 1978). A pesar de ello, la localidad de Adra puede ser dividida, desde el punto de vista geomorfológico, en tres grandes grupos: colinas (zona alta de la localidad), valles (dirección norte-sur) y Vega de Adra (llanura deltáica del río Adra) según Alcalá-García *et al.* (2001). Cada una de ellas presenta un grado de exposición diferente al riesgo sísmico.

Los resultados obtenidos (Fig. 4), muestran un grado de incertidumbre bajo, como indica el bajo valor de la relación media/mediana del valor-N y densidad real de cada tipo de material. Los materiales deltáicos aluviales saturados en agua y de gran espesor presentan un valor-N de 15 a 20 y una Dr media de 1,78 gr/cm^3 (Tabla I), que le confieren una alta susceptibilidad de amplificación de ondas S (Seed *et al.*, 1985) y de licuefacción durante un terremoto (Tokimatsu y Yoshimi, 1983). El valor medio empírico de Vs obtenido (Tabla I) es algo superior a 250 m/s, lo que correspondería a un material de tipo V en la clasificación de Tiedemann (1992). Las terrazas marinas pleistocenas presentan igual susceptibilidad, aunque su capacidad de amplificar las ondas S es menor (valor-N entre 30 y 35 y Dr media de 1,78 gr/cm^3). El valor medio obtenido de Vs es ~300 m/s lo que está en concordancia con el rango de valores de Vs propuestos por Tiedemann (1992) para este tipo de materiales.

La existencia de varios sistemas activos de fracturas conjugadas, que afectan al sustrato metamórfico, condiciona la aparición de valores-N inferiores a 50, por tratarse de zonas debilitadas mecánicamente. Sobre ellos se depositan materiales aluviales groseros proximales (valor-N entre 25 y 30 y Dr media de 1,82 gr/cm^3) y aluviales deltáicos poco densos y saturados en agua, que sugiere que se trata de zonas proclives a la amplificación sísmica. Su valor medio de Vs no ha podido ser determinado, aunque se sospecha que puede estar comprendido entre 750 y 1.000 m/s, según las aproximaciones propuestas por NCSE-94 (1994) y Tiedemann (1992) para estos casos.

Los glacis continentales, que aparentemente parecen ser materiales estables, pueden ser susceptibles, en cambio, de poder amplificar las ondas S cuando sus espesores se aproximan a los 50 metros, como muestra su valor-N medio de 41 y su Dr media (1,86 gr/cm^3). Su valor medio de Vs es ~340 m/s, que resulta ser inferior al propuesto por Tiedemann (1992) para este tipo de litologías.

Los rellenos antrópicos heterométricos y las terrazas marinas actuales son los materiales más suscepti-

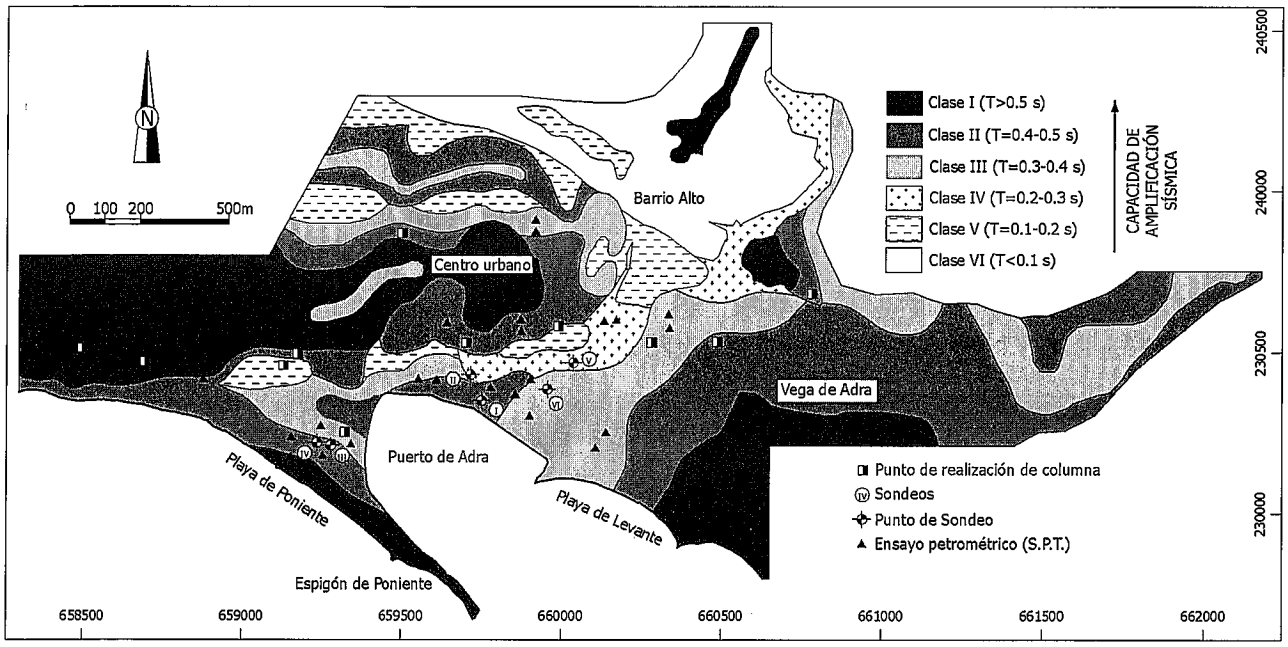

Figura 6.- Mapa de zonación sísmica donde se indican seis grados o rangos de susceptibilidad a la amplificación sísmica de los materiales geológicos de la localidad de Adra, según los valores de periodos dominantes obtenidos empíricamente.

bles de amplificación sísmica (Fig. 4), como se pone de manifiesto por su bajo valor-N (<10 y 17, respectivamente), su baja Dr (<1,70 y 1,81 gr/cm^3) y su tasa de saturación en agua. Los valores medios de Vs obtenidos son de 160 y ~200 m/s, que están en buena relación con los descritos por Tiedemann (1992). Es importante mencionar que los primeros rellenos antrópicos tuvieron lugar cerca del año 500 bp, coincidiendo con el asentamiento fenicio en la localidad, y otros muy importantes corresponden a la construcción del puerto de Adra en 1911 (espigón de poniente, Fig. 1c).

Discusión

Los resultados obtenidos (Tablas I, II y III) mediante la aplicación de los modelos de Imai (1981); Kukusho (1987); Towhaka y Roteix (1988) son coherentes, en líneas generales, con las observaciones de campo realizadas y con los modelos teóricos propuestos por Tiedemann (1992) y NCSE-94 (1994). El rango de valores de velocidad de cizalla, obtenidos para el conjunto de materiales estudiados, excepto el sustrato rocoso, permite encuadrar a todos ellos dentro del grupo de materiales de tipo III descrito en la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-94. La baja resolución que supone agruparlos a todos ellos dentro de un mismo tipo de terreno ha generado la necesidad de separarlos atendiendo a su variación de espesor, su diferente respuesta ante los ensayos SPT, su variación de densidad real y su rango de período dominante. Estas observaciones han permitido la discriminación más fina de los materiales geológicos, necesaria para caracterizar su respuesta sísmica, ya que se ha comprobado que terrenos con la misma tipología en superficie pero con diferente grado de espesor presentan diferente respuesta dinámica (Navarro *et al.,* 2001) y que edificaciones muy próximas y de iguales características constructivas, ubicadas en terrenos con la misma tipología de materiales pero con diferente respuesta dinámica, han sufrido diferentes grados de daños en terremotos recientes (Navarro *et al.,* 2000).

Se ha observado que algunos materiales como los glacis continentales y conglomerados arcillosos pliocenos muestran valores empíricos de Vs, según Imai (1981) y Kokusho (1987), no superiores a 400 m/s (Fig. 4) y por tanto menores a los propuestos en las clasificaciones litológicas de Tiedemann (1992) y NCSE-94 (1994). Esta discrepancia puede justificarse por el hecho de que estas relaciones consideran nulo el grado de saturación en agua de los materiales con matriz arcillosa, mientras que se asumen, que los materiales arenosos presentan un grado de saturación en agua elevado. Las observaciones de campo han mostrado que los materiales con matriz arcillosa presentan cierto grado de saturación en agua. Por ello se debe considerar, en la clasificación de periodos dominantes obtenidos (Tabla III), el valor de Vs propuesto por Tiedemann (1992) como más acertado, ya que asume un cierto grado de saturación en agua para este tipo de sedimentos.

Se debe indicar que la conjunción de factores intrínsecos de cada sedimento (p.e. potencia del sedimento, grado de compactación, grado de saturación en agua, capacidad de licuefacción, tipo de sustrato) pueden provocar que la tasa de amplificación de las ondas sísmicas se multiplique por dos o tres (Youd y Perkins, 1978; Seed *et al.*, 1985). Por ello se ha de ponderar la capacidad de amplificación de los sedimentos según los parámetros geológicos y geotécnicos encontrados (Tabla II). El análisis detallado de la litología (Fig. 2) permite observar heterogeneidades espaciales y verticales de distinto orden que condicionan el comportamiento general de amplificación sísmica del sedimento y su capacidad aproximada de licuefacción.

Una vez determinado el periodo dominante máximo y medio de cada material (Tabla II), se puede establecer una columna estratigráfica sintética para un lugar determinado (emulación del efecto de sitio) y se puede promediar, en la vertical, el valor medio de periodo dominante que debe aparecer en ese punto. La interpretación geológica espacial y temporal de facies es básica para poder entender la distribución de cortejos sedimentarios y poder predecir el efecto de sitio con el menor error posible. Esta distribución sedimentaria está condicionada por la evolución paleogeográfica Pliocuaternaria. En la figura 5 se muestra un cuadro resumen donde se exponen las principales características espaciales y temporales y donde se apunta la tasa de elevación estimada entre 0,10 y 0,20 m/ka para los distintos materiales desde el Mioceno superior hasta la actualidad (Goy y Zazo, 1986; Goy *et al.*, 1991).

La actividad sísmica regional y la evolución sedimentaria y tectónica local de Adra está condicionada por la evolución geodinámica de la convergencia entre las placas Africana y Euroasiática desde el Mioceno superior hasta la actualidad (Argus *et al*, 1989; Galindo-Zaldívar *et al*, 1993). Los sistemas de fracturas descritos (N160-180E y N120-140E), son consecuentes con esta evolución tectónica actual (Martínez-Díaz, 2000). La respuesta sísmica de los materiales geológicos superficiales estará controlada por esta actividad tectónica regional.

Conocida la distribución de facies y características geotécnicas e hidrogeológicas básicas de los materiales superficiales (Tabla II), se han agrupado en función a criterios de susceptibilidad a la amplificación de ondas S y capacidad de licuefacción (Fig. 4 y Tabla II), estableciendo un rango de valores de Vs entre ~160 y ~400 m/s, que indica que se trata de materiales, en general, susceptibles de poder amplificar las ondas S, siendo muy susceptibles aquellos con valores inferiores a 250 m/s y densidades reales bajas (rellenos, terrazas marinas actuales y aluviales holocenos). Se han establecido seis clases generales de materiales (Tabla III), dependiendo del rango de periodos dominantes obtenidos (>0,5; 0,4-0,5; 0,3-0,4; 0,3-0,2; 0,2-0,1 y <0,1 s) a partir de las relaciones empíricas utilizadas y de las observaciones de campo realizadas. La división de materiales en seis clases (Tabla III) se ha comparado con las encuestas realizadas a la población por técnicos de Protección Civil sobre daños observados después de cada terremoto, existiendo una buena correlación entre ambas.

El estudio del espesor de sedimentos, su grado de saturación en agua, el valor-N y Dr ha permitido la caracterización de la susceptibilidad sísmica de los materiales geológicos superficiales de la localidad de Adra, en función a los valores de periodos dominantes y velocidad de ondas S (Vs) obtenidos para cada uno de ellos de forma empírica. En la Fig. 6 se presenta una cartografía de zonación sísmica equivalente al diferente grado de susceptibilidad sísmica de los materiales geológicos de la localidad de Adra. En esta figura, se muestran las zonas más proclives a padecer amplificación sísmica (clase I) frente a las menos probables (clase VI), según los rangos de periodos dominantes obtenidos.

Conclusiones

En la localidad de Adra (Almería) han sido definidas seis clases de materiales diferentes a partir de las condiciones de suelo, establecidas según los valores empíricos de periodos dominantes obtenidos.

La división geológica propuesta, no sólo atiende a la disposición espacial y vertical de los materiales, sino también al grado de saturación en agua, capacidad aproximada de licuefacción y propiedades dinámicas de los materiales geológicos superficiales. Para ello se han tenido en cuenta las propiedades físicas básicas que definen el comportamiento de cada tipo de sedimento (litología, valor-N de penetración estándar y densidad real del sedimento). Con estos datos se ha estimado, de forma empírica, el periodo dominante máximo y medio de cada material, estableciendo estas seis clases de condiciones de sustrato geológico, todas ellas pertenecientes al terreno tipo III de la NCSE-94 (1994). El rango de valores obtenidos de Vs (~160 - ~400 m/s) indica que los materiales estudiados, en general, son susceptibles de poder amplificar las ondas S, siendo muy susceptibles aquellos con valores inferiores a 250 m/s.

Se ha observado que existen cuatro materiales que presentan valores de periodos dominantes especialmente altos. Por un lado el aluvial detrítico holoceno del río Adra, por otro los rellenos antrópicos (rellenos, cursos menores de agua pavimentados, etc.), las terrazas marinas actuales y, por último, los glacis continentales con potencias superiores a 50 metros. Estos materiales superficiales presentan las condiciones de suelo más desfavorables ante un evento sísmico.

El conocimiento de la vulnerabilidad sísmica de los materiales geológicos superficiales, al igual que su localización geográfica, podrá ser de gran ayuda a constructores, arquitectos y planificadores locales a la hora de evaluar el riesgo consecuente de cada emplazamiento. Este trabajo pretende aportar nuevos datos geológicos y geotécnicos para su aprovechamiento civil en la localidad de Adra.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado gracias al soporte económico del proyecto de la CICYT: AMB99-0795-CO2-02 y de la DGCYT: HID1999-0205. Agradecemos a los laboratorios de las empresas Eycom, S. L., ICC, S. L. y Geocisa, S. A. por facilitarnos diversos datos de sondeos básicos en esta investigación. Se agradece la colaboración del Ayuntamiento de Adra, Protección Civil de Adra, Instituto Nacional de Geofísica, Instituto Andaluz de Geofísica y empresas constructoras locales. Por último, agradecemos al Dr. José M. González Casado la lectura y revisión crítica del manuscrito original

Referencias

Aguirre, J (1998): El Plioceno del SE de la Península Ibérica (provincia de Almería). Síntesis estratigráfica, sedimentaria, bioestratigráfica y paleontológica. *Revista*

Sociedad Geológica España. 11: 297-315.

Alcalá-García, F. J., Zapata, A. y Morillas-Arcos, M. (2001): Estructuras de detención/retención en la localidad de Adra (Almería). Posible alternativa al aprovechamiento de aguas pluviales. En: V *Simposio sobre el Agua en Andalucía (SIAGA)*, (A. Pulido-Bosch, P. Pulido-Leboeuf y A. Vallejos, Eds.), Almería. 1: 143-154.

Aldaya, F. y García-Dueñas, V. (1976): Les nappes alpujarrides au Sud et Sud-Ouest de la Sierra Nevada (Cordillères Bétiques, Andalousie). *Bulletin Société Géologique France*. 7-18: 635-639.

Aldaya, F., Baena, J. y Ewert, K. (1983): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 1.057 (Adra)*. IGME, Madrid.

Argus, D. F., Gordon, R. G, De Mets, C. y Stein S. (1989): Closure of the Africa-Eurasia-North America plate motion circuit and tectonics of the Gloria faults. *Journal of Geophysic Research*, 94: 5585-5602.

Bousquet, J. C. y Montenat, C. (1974): Presence de décrochements NE-SW plio-quaternaires dans les Cordillères Bétiques Orientales (Espagne). Extension et signification général. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 278: 2617-2620.

Comas, M. C., Platt, J. P. Soto J. I. y Watts, A. B. (1999): The origin and tectonic history of the Alboran Basin: insights from Leg 161 results. En: *Proceedings Ocean Drilling Program, Scientific Results, vol. 161* (R. Zahn, M. C. Comas y A. Klaus, Eds.), U.S. Govert. Print. Of., Washington, 555-580.

D'Appolonia, D. J., D'Appolonia, E. y Brissette, R. F. (1972): Discussion on settlement of spread footings on sand. En: *ASCE- Soil Mechanics and Foundation Engineering 99*, 2: 754-762.

Fallot, P. (1948): Les Cordillères Bétiques. *Estudios Geológicos*, 4: 259-279.

Fourniguet, J. (1975): *Néotectonique et Quaternaire marin sur le littoral de la Sierra Nevada (Andalousie, Espagne)*. Tesis Doctoral Univ. Orleáns, 234 p.

Galindo-Zaldívar, J., González-Lodeiro, F. y Javaloy, A. (1993): Stress and paleostress in the Betic-Rif Cordilleras (Miocene to Present). *Tectonophysics*, 227: 105-126.

Goy, J. L. y Zazo, C. (1986): Synthesis of the Quaternary in the Almería litoral, neotectonic activity and its morphologic features (eastern Betics, Spain). *Tectonophysics*, 130: 259-270.

Goy, J. L., Silva, P. G., Zazo, C., Somoza, C. y Bardají, T. (1991): Model of Morpho-Neotectonic Map and Legend. *Bulletin INQUA Neotectonic Communications*, 14: 14-21.

Herraiz, M., Devicente, G., Lindón-Aupari, R., Giner, J., Simon, J. L., González Casado, J. M., Vadillo, O., Rodríguez-Pascua, M. A., Cicuendez, J. I., Casas, A., Cabanas, L., Rincón, P., Cortes, A. L., Ramírez, M. y Lucini, M. (2000): The Recent (Upper Miocene to Quaternary) and Present Tectonic Stress Distributions in the Iberian Peninsula. *Tectonics*, 19-4, 762-786.

ITGE (1999): Calidad Química y contaminación de las aguas subterráneas en España, periodo 1982-1993. Cuenca del Sur. ITGE, Madrid, 186 p.

Imai, T. (1981): P- and S- wave velocities of the ground in Japan. En: Proceedings *9th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokio, 2: 257-260.

Kokusho, T. (1987): In-situ Dynamic Soil Properties and Their evaluation. En: *Proceedings 8th Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Kyoto, 2: 215-240.

Larouziere de, F. D., Bolze, J., Bordet, P., Hernández, J., Montenat, C. y Ott d'Estevou, P. (1988): The Betic segment of the lithospheric Trans-Alboran shear zone during the Late Miocene. *Tectonophysics*, 152: 41-52.

Martínez Díaz, J. J. (2000): Análisis sismotectónico de la serie sísmica de Adra: Mecanismos de terremotos compuestos como respuesta a la interacción entre fallas activas en el Sureste de la Cordilla Bética. *Revista Sociedad Geológica España*, 13:31-44.

Mitchell, J K. y Katti, R. K. (1981): Soil improvement State Art Report. En: *Proceedings 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm.

Navarro, M., Sanchez, F.J., Enomoto, E., Vidal, F. y Rubio, S. (2000): Relation between the predominant periods of soil and the damage distribution after Mula 1999 earthquake. *Proc. 6th International Conference on Seismic Zonation*. Palm Spring, California, USA. CD-ROM.

Navarro, M., Enomoto, T., Sanchez, F.J. Matsuda, I., Iwatate, T., Posadas, A.M., Luzón, F., Vidal, F. y Seo, K. (2001): Surface soil effects using short-period microtremor observations in Almeria city, Southern Spain. *Pure Applied Geophysics*, 158: 2481-2497.

NCSE-94 (1994): Norma de Construcción Sismoresistente: Parte General y Edificación. *Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente*. BOE nº 33 (08-febrero-1995). 3935-3980.

Obermeier, S. F. (1996): Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis - ?. An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. *Engineering Geology*, 44: 1-76.

Pulido-Bosch, A., Morales, G. y Benavente, J. (1988): Hidrogeología del delta del río Adra. *Estudios Geológicos*, 44: 429-443.

Sanz de Galdeano, C. (1997): *La Zona Interna Bético-Rifeña. Antecedentes, unidades tectónicas, correlaciones y bosquejo de reconstrucción paleogeográfica*. Servicio Publicaciones Univ. de Granada, 316 p.

Sanz de Galdeano, C., López Casado, C., Delgado, J. y Peinado, M. A. (1995): Shallow seismicity and active faults in the Betic Cordillera. A preliminary approach to sources associated with specific faults. *Tectonophysics*, 248: 293-302.

Schmertmann, J. K. (1975): In situ Measurement of Shear Stregth. En: *ASCE Special Conference GED*, Raleigh, 57-138.

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. y Chung, R. M. (1985): Influence de SPT procedure in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal Geotechnical Engineering*. 3-12: 1425-1435.

Seo, K. (1994): On the applicability of microtremors to engineering purposes. Preliminary report of the Joint ESG Research on Microtremors after the 1993 Kushiro-Oki (Hokkaido, Japan) earthquake. En: X *European Conference on Earthquakes Engineering*. 4: 2643-2648.

Tiedemann, H. (1992): Earthquakes and Volcanic Eruptions: A Handbook on Risk Assessment. *Swiss Reinsurance Company*, Zurich, Switzerland.

Tokimatsu, K. y Yoshimi, Y. (1983): Empirical correlation

of soil liquefaction based on SPT *N*-value and fines content. *Soil and Foundations*, 23-4: 56-74.

Towhaka, I., y Roteix, R. (1988): Probabilistic estimation of shear wave velocity of sands in terms of SPT-N and its application to seismic response analysis. En: *Proceedings Annual Meeting of Japanese Soil Mechanics and Foundation Engineering*: 825-828.

Youd, T. L. y Perkins, M. D. (1978): Mapping of liquefaction induced ground failure potential. *Journal of Geology Engineering,* 104-4: 433-446.

Manuscrito recibido el 5 de septiembre de 2001
Aceptado el manuscrito revisado el 7 de marzo de 2002