

# MODELO DINAMICO DEL SUB-SUELO DE CONCEPCION\*

Mauricio POBLETE\*\*

Ricardo DOBRY\*\*

## RESUMEN

*Se entrega un modelo dinámico simple del centro de la ciudad de Concepción, para el cálculo del espectro de amplificación correspondiente a temblores de pequeña intensidad. Con tal objeto se utilizó información de Geología, Geofísica, Mecánica y Dinámica de Suelos; en particular, se realizó un sondaje hasta 134 m de profundidad. Se midieron las velocidades de ondas de corte de los estratos de suelo: 1) directamente en terreno mediante exploraciones, 2) en laboratorio con el método de pulsos, y 3) se estimaron a partir de la relación de vacíos y de la presión confinante efectiva. El acuerdo entre los tres procedimientos es bueno. Ello confirma la validez para la zona, de las correlaciones de Hardin-Richart (arenas) y de Lawrence-Hardin-Black (arcillas normalmente consolidadas).*

*Se entrega, además, información sobre la napa freática en Concepción, útil para propósitos de microrregionalización sísmica.*

## INTRODUCCION

Este trabajo forma parte del Plan Concepción de Mecánica de Suelos e Ingeniería Antisísmica, que se realiza en IDIEM y cuyo fin es estudiar el comportamiento sísmico de los suelos de la ciudad<sup>2,3</sup>.

---

\*Este trabajo es un extracto de la memoria<sup>1</sup> para optar al título de Ingeniero Civil de Mauricio Poblete, realizada en IDIEM bajo la dirección del Ingeniero Civil Ricardo Dobry.

\*\*Ingenieros del IDIEM, Laboratorio Zonal Concepción.

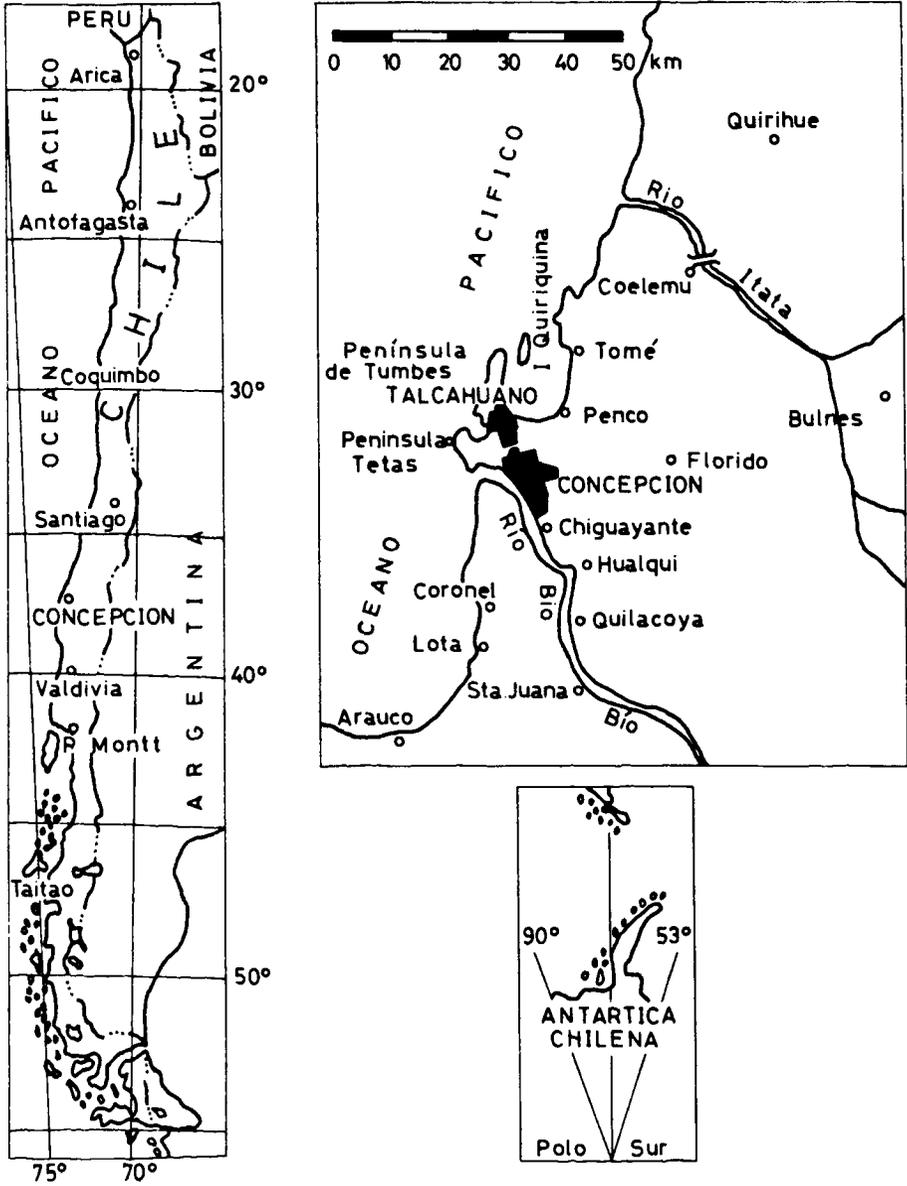


Fig. 1. Ubicación de Concepción.

Existe amplia evidencia de que un mismo terremoto produce efectos muy diferentes en las estructuras, dependiendo del suelo de fundación. En general, los daños menores se han observado en construcciones sobre roca sana, y los mayores sobre suelos pantanosos y rellenos artificiales<sup>4-12</sup>. La diferencia dentro de una ciudad puede llegar a ser tan grande como en el caso de Puerto Montt, Chile, en los sismos de mayo de 1960, donde en los cerros hubo intensidad VIII (MM\*) y en la zona del puerto intensidad XI<sup>9</sup>.

Este comportamiento se explica por dos tipos diferentes de fenómenos:

- a) la amplificación selectiva del movimiento, debida a la menor rigidez del suelo y a la reflexión múltiple de las ondas en las fronteras de estratos; y
- b) los efectos que sobre los suelos blandos, sensibles y sueltos, producen los sismos, sobre todo cuando la napa freática se encuentra cerca de su superficie (asentamientos, deslizamientos, licuación total o parcial).

La definición de un modelo dinámico simple del subsuelo del centro de Concepción que permita el estudio del primer grupo de fenómenos constituye el objetivo principal de este trabajo. Existen varias teorías de amplificación, que permiten cuantificar el movimiento en la superficie del suelo si se conoce el monto en la roca: Kanai-Duke<sup>13</sup>, Arias-P. Laurent<sup>14</sup>, Rosenblueth<sup>15</sup>. En el caso más simple, se idealiza un modelo como el de la Fig. 2 con  $n$  capas horizontales semi-infinitas de suelo sobre la roca. Se supone que los materiales de cada capa son homogéneos e isótropos, y que se comportan como sólidos viscoelásticos.

Si la roca es excitada por vibraciones sísmicas horizontales, el movimiento en la superficie dependerá del carácter de tales vibraciones y de las propiedades de las  $n$  capas intermedias. En particular, como el movimiento es transmitido por el suelo en forma de ondas de corte, serán sus propiedades al corte las que importarán.

Cada estrato  $i$  queda totalmente definido por las siguientes constantes:

- $H_i$  = espesor del estrato  $i$
- $\rho_i$  = densidad (húmeda) del suelo  $i$
- $V_{si}$  = velocidad de las ondas de corte en el estrato  $i$
- $C_i$  = constante que depende del amortiguamiento.

Este efecto de filtro del suelo cambia según el período de las ondas incidentes. Así, se define como *espectro de amplificación* a una curva amplificación-período como la de Fig. 3. Este espectro de amplificación depende sólo de las características mencionadas de los estratos de suelo y de la roca basal, y por lo tanto es fijo para un lugar dado.

---

\*MM : Escala Mercalli Modificada de 12 grados.

Si se conoce el acelerograma del temblor en un afloramiento rocoso (punto B, en Fig. 4), y se desea conocer el acelerograma en la superficie del suelo (punto A), se procede como sigue:

- se obtiene el espectro de Fourier del acelerograma en B.
- se multiplica este espectro de Fourier por el espectro de amplificación del lugar (Fig. 3). Se obtiene así el espectro de Fourier del acelerograma en A.
- se calcula el acelerograma en A, invirtiendo el espectro de Fourier correspondiente.

Este procedimiento es complicado y costoso, requiriendo el uso de un computador electrónico y programas especiales. Se ha encontrado que el espectro de amplificación, previas algunas correcciones<sup>16</sup>, se puede usar directamente para calcular el espectro de respuesta de una estructura en A.

Para calcular el espectro de respuesta en el punto A, se hace uso de la relación:

$$E_A(T) = E_B(T) \times M(T)$$

$E_A(T)$  = ordenada del espectro de respuesta en el punto A para el período  $T$

$E_B(T)$  = ordenada del espectro de respuesta en el punto B para el período  $T$

$M(T)$  = ordenada del espectro de amplificación para el período  $T$ .

Debe hacerse notar que, no siendo ningún suelo un sólido viscoelástico, las constantes usadas en el cálculo son sólo aproximaciones del comportamiento real. En particular, tanto  $V_{s,i}$  como  $C_i$  dependen del nivel de deformaciones de corte asociadas con los esfuerzos dinámicos. En este trabajo, los valores de  $V_{s,i}$  que se entregan son válidos sólo para temblores pequeños, ya que los métodos usados para su determinación han inducido deformaciones de corte pequeñas ( $\approx 10^{-6}$  cm/cm) en el suelo. Para terremotos, los valores de  $V_{s,i}$  a usarse

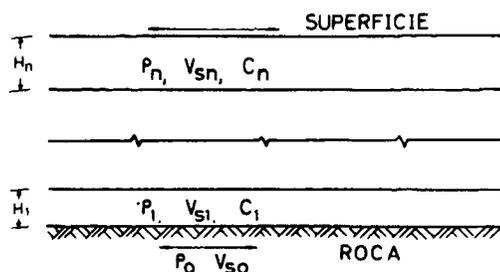


Fig. 2. Modelo dinámico típico de un suelo.

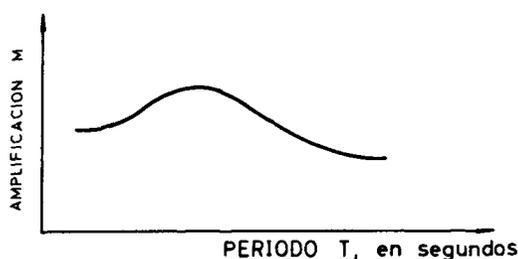


Fig. 3. Forma de un espectro de amplificación.

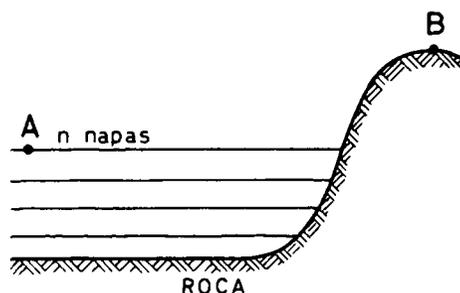


Fig. 4. Esquema de un perfil de suelos con afloramiento rocoso.

serán menores; deben usarse coeficientes de corrección<sup>17</sup>.

En el centro de Concepción existe una situación parecida a la ilustrada en la Fig. 4, cuya principal diferencia con las hipótesis teóricas es la existencia de cerros cercanos.

## ANTECEDENTES GEOLOGICOS

La ciudad de Concepción se encuentra ubicada al oeste de la Cordillera de la Costa, en una llanura formada por sedimentos del río Bío Bío acarreados desde la Cordillera de los Andes, Fig. 5. El límite occidental de la llanura está formado por la península de Tumbes y los cerros Tetas. Las bahías de San Vicente y Concepción la limitan por el noroeste y por el norte, y el río Bío Bío por el sur; siendo éstos los lugares hacia donde se orienta el drenaje de la zona.

Galli<sup>18,19</sup> ha diferenciado cuatro unidades geológicas fundamentales:

1. Rocas metamórficas, que constituyen el basamento cristalino del área; de edad precámbrica. Se presentan en algunos afloramientos reducidos.
2. Rocas intrusivas, que forman parte de una gran masa plutónica (batolito) de edad paleozoica. Presentan distribución continua solamente en los alrededores de la ciudad de Concepción, particularmente en los faldeos occidentales de la Cordillera de la Costa (Cerro Caracol y Lo Pequén) y en afloramientos aislados como los cerros La Pólvara, Chepe, Chacabuco y Lo Galindo. El batolito paleozoico del área presenta como roca más distribuida al granito; en estado fresco esta roca es dura y tenaz, pero normalmente está cubierta por un manto muy meteorizado, el que puede alcanzar hasta unos 50 m de espesor en partes donde no ha habido lugar a una erosión muy activa. La meteorización del granito ha dado origen a un material poco cohesivo y muy sensible a la acción erosiva de las aguas lluvias, que se conoce con el nombre de maicillo.
3. Rocas sedimentarias, de edad cretácica a cuaternaria, que yacen sobre las unidades anteriores. La más reciente de ellas (formación Huachipato) es la más importante desde el punto de vista de este trabajo, por cuanto se trata de sedimentos distribuidos en la llanura, los que se denominan corrientemente "sedimentos Bío Bío"; en los horizontes superiores de esta formación se han fundado la mayor parte de las estructuras construidas en la zona. Estos sedimentos consisten fundamentalmente en arenas basálticas, en general limosas, con estratificación alternada de limo y/o arcilla. La procedencia principal de los fragmentos es la Cordillera de los Andes, y en mucho menor medida las unidades atravesadas por el río Bío Bío en el Valle Central y la Cordillera de la Costa. El espesor máximo reconocido de la formación es de

unos 107 m en el centro de la ciudad de Concepción.

4. Depósitos superficiales. Incluyen arenas de dunas y limo asociado a ellas, barro, turba y otros materiales pobremente drenados, arena de playa, material coluvial y fragmentos de roca, materiales derrumbados, arena Andalién depositada por el río de ese nombre y relleno artificial.

## FALLAS GEOLOGICAS

Según Galli<sup>18</sup> la zona de Concepción y Talcahuano, estructuralmente ligada a la Cordillera de la Costa, habría sufrido profundas modificaciones y estaría surcada por numerosas fallas verticales, Fig. 5, entre las cuales cabe mencionar la falla Concepción, ubicada al oeste del bloque tectónico de la Cordillera de la Costa, y la falla San Vicente.

La falla Concepción está situada a unos 10 km al este de la ciudad de Concepción; entre esta falla y la de San Vicente se sitúa la fosa del área de Concepción y Talcahuano, surcada por otras seis fallas menores, inferidas por Galli. La ciudad de Concepción está edificada sobre una depresión cuyas fallas limitantes serían Lo Pequén, Caracol y La Pólvora (centro de la ciudad); otras fallas subparalelas en la zona urbana son las fallas Chepe y Chacabuco. Fuera de este sector, Galli ha inferido también la existencia de la falla Hualpencillo y otras, aparentemente de menor importancia estructural.

La falla San Vicente se presenta desde caleta Gloria hasta la Base Naval de Talcahuano, a lo largo de la escarpa sur y oriental de la península de Tumbes; ella pone en contacto rocas metamórficas y sedimentarias. La magnitud del desplazamiento no se ha determinado, se cree sin embargo que la falla es muy antigua y de actividad intermitente. Las otras fallas no han podido ser comprobadas por observaciones directas, debido a que se encuentran sepultadas por gruesos depósitos de sedimentos de la formación Huachipato, pero su presencia se ha podido inferir. Una prospección gravimétrica realizada en la ciudad de Concepción en 1966<sup>20</sup> parece confirmar las fallas que se encuentran en ese sector.

Recientemente se han comprobado movimientos de la corteza en la zona, producidos por los grandes sismos de los últimos años. A raíz del terremoto de 1939, el Instituto Geográfico Militar (IGM) repitió la nivelación del tramo de camino entre Chillán y Talcahuano, que había sido hecha en 1935, encontrando diferencias de altura que fueron atribuidas al sismo. La Fig. 6 muestra estas diferencias en las que se ha tomado como referencia cero el nivel medido en 1935. En la figura pueden observarse diferencias positivas del orden de 1 a 2 m entre Chillán y la falla Concepción; y diferencias negativas entre esta falla y

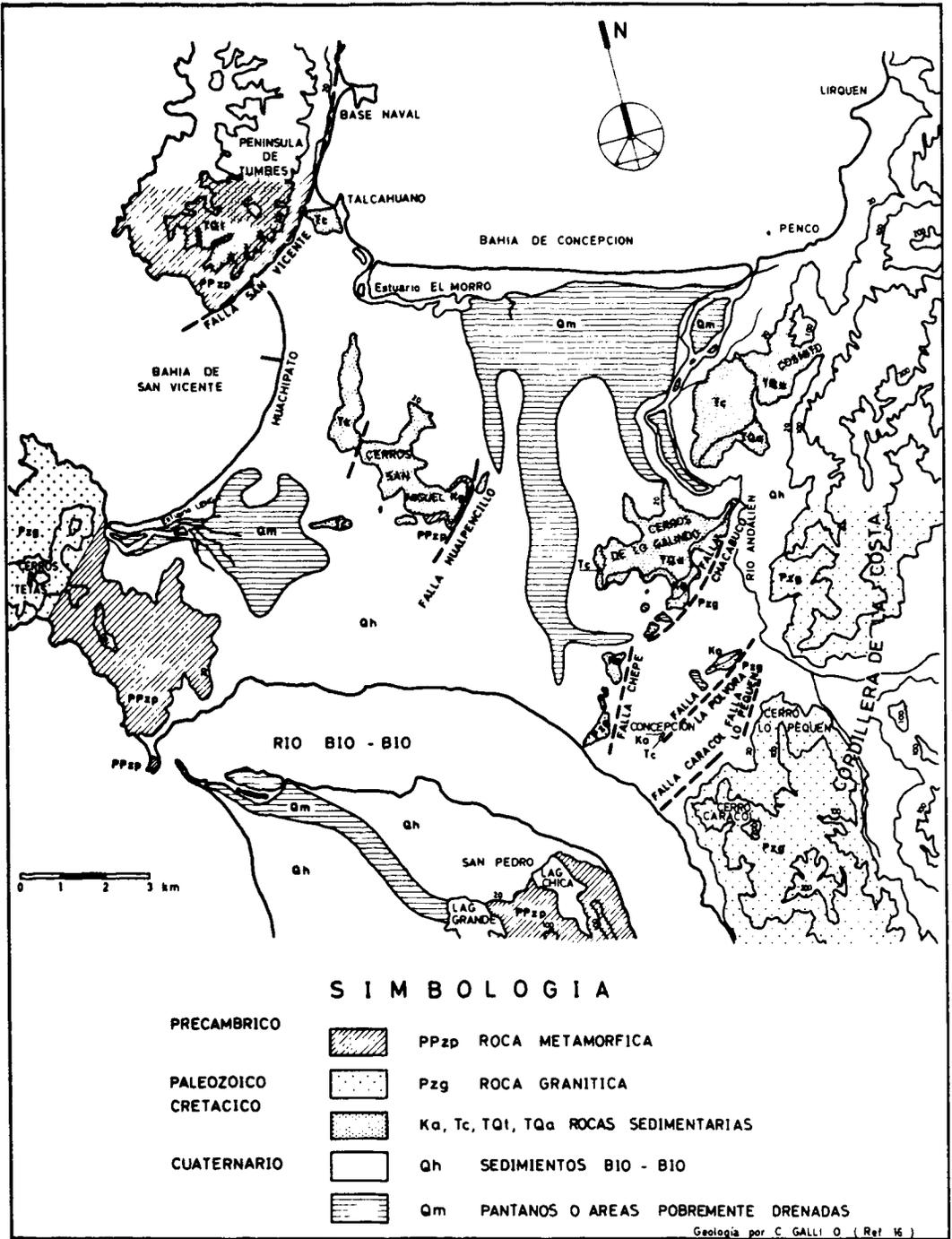


Fig. 5. Plano geológico regional Concepción-Talcahuano.

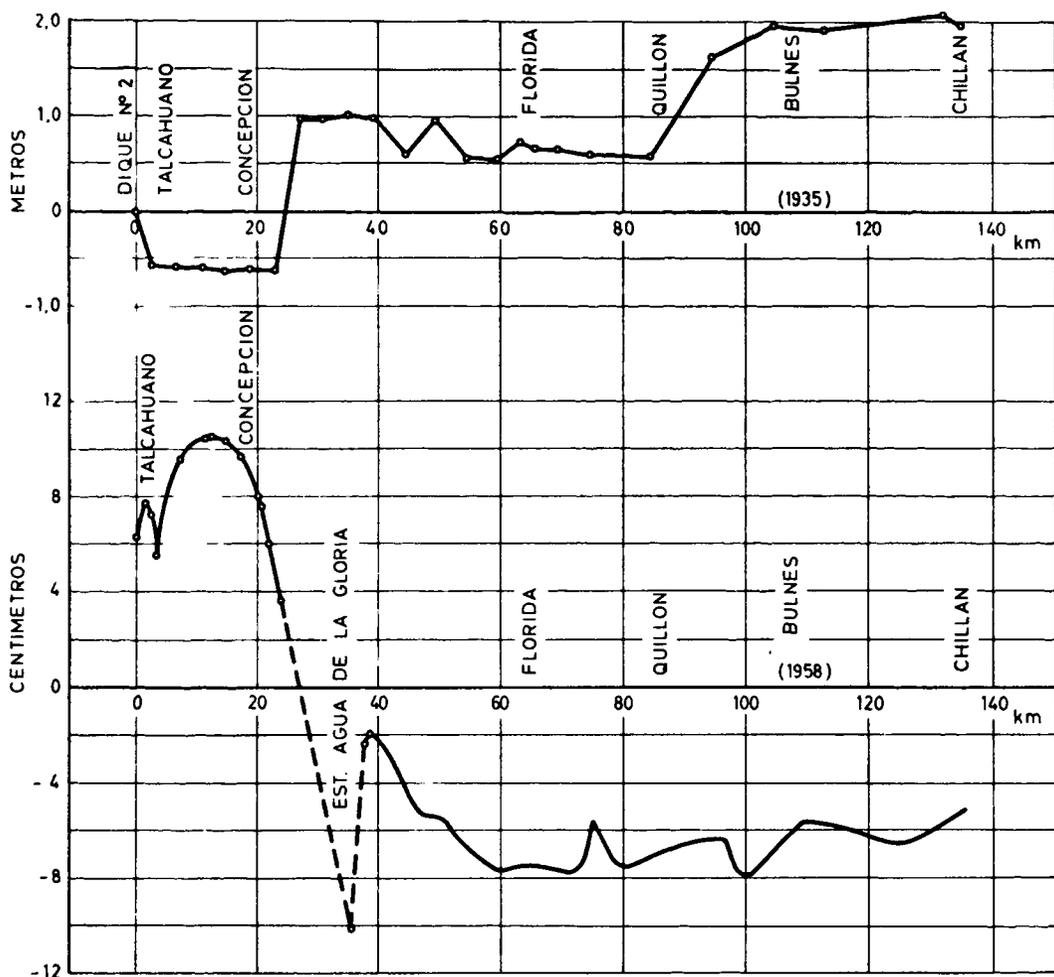


Fig. 6. Diferencias de altura entre las nivelaciones de 1935-1939 y 1958-1960 en la ruta de Chillán a Talcahuano (Instituto Geográfico Militar).

la Base Naval de Talcahuano, del orden de 1,60 m.

Nuevas nivelaciones en los años 1958 y 1960 (antes y después de los terremotos de 1960) mostraron diferencias de sentido contrario a las producidas por el sismo de 1939, y del orden de pocos centímetros; la máxima diferencia parcial se midió también cerca de la falla Concepción, Fig. 6.

Estos hechos permiten establecer que la fosa del área de Concepción y Talcahuano habría actuado durante esos períodos como una unidad tectónica, y que las mayores discontinuidades en la magnitud de los movimientos se produjeron, en uno o en ambos períodos, en la falla Concepción y tal vez San Vicente. La magnitud del movimiento relativo en esta última falla, en 1939, se desconoce, por cuanto el punto de partida de la nivelación, materializado como un

pilar en el Dique nº 2, se encuentra al este de esa falla, Fig. 5.

A fin de estudiar la posibilidad de que el asentamiento en 1935-1939 se haya debido a una compactación de sedimentos, se prepararon las Tablas I y II, que muestran el tipo de suelo de fundación de los pilares del IGM usados en las nivelaciones. En ese período, la mayor diferencia de cota parcial fue acusada en un tramo comprendido entre el pilar 7 y 6, fundados en roca y sedimentos respectivamente, sugiriendo la posibilidad de una compactación de estos últimos. Sin embargo, en el período 1958-1960 ello no es en absoluto evidente, puesto que las diferencias de cota parciales son independientes del tipo de suelo; además el hundimiento del área de Concepción y Talcahuano en 1935-1939, aparece como bastante uniforme, lo que es un hecho raro en compactación de sedimentos heterogéneos. Se concluye entonces, que si hubo alguna compactación de los sedimentos que cubren el basamento rocoso del área, ella debió ser relativamente pequeña.

TABLA I  
DIFERENCIAS DE ALTURA ENTRE 1935 Y 1939  
EN LA RUTA DE TALCAHUANO A AGUA DE LA GLORIA  
(Instituto Geográfico Militar)

Pilar de Referencia	Km (aprox.)	Diferencia (cm)*	Suelo de fundación del pilar**
0	0	0	Dique nº 2. Relleno sobre fondo del mar
1	2,4	-57,72	Puerta Los Leones. Relleno artificial
2	7,0	-59,42	Sedimentos Bío Bío
3	11,1	-61,43	Sedimentos Bío Bío
4	14,7	-63,53	Sedimentos Bío Bío
5	18,9	-61,54	Sedimentos Bío Bío (Plaza Concepción)
6	23,0	-62,85	Coluvio y arena Andalién
7	27,1	+97,92	Roca
8	31,1	+98,85	Suelo residual (roca)
9	35,3	+102,857	Suelo residual (roca)

\* - hundimiento

+ levantamiento

\*\* No fue posible ubicar en el terreno los pilares en referencia porque han desaparecido, pero el kilometraje permite determinar la zona en que fueron fundados.

TABLA II

DIFERENCIA DE ALTURA ENTRE 1958 Y 1960  
EN LA RUTA DE TALCAHUANO A AGUA DE LA GLORIA  
(Instituto Geográfico Militar)

Pilar de Referencia	km (aprox.)	Diferencia (cm)*	Suelo de fundación del pilar
DNH- 4	0	+6,17	Probable relleno artificial
1-G- 183	1,42	+7,68	Sedimentos Bío Bío, profundos
182	2,64	+7,34	Relleno artificial y coluvio, de poco espesor
181	3,44	+5,50	Relleno artificial y coluvio de poco espesor (próximo a cerro)
177	6,86	+9,49	Sedimentos Bío Bío, profundos
173	9,84	+10,21	Suelo residual (roca)
171	11,66	+10,35	Sedimentos Bío Bío, profundos
170-A	—	+10,75	Sedimentos Bío Bío, profundos
170	12,44	+10,47	Sedimentos Bío Bío, profundos
167	15,06	+10,27	Sedimentos Bío Bío, de poco espesor (próximo a cerro)
164	17,88	+9,58	Sedimentos Bío Bío, profundos
163	18,70	+9,50	Sedimentos Bío Bío, profundos
162	20,12	+7,85	Sedimentos Bío Bío, profundos
161	20,90	+7,51	Sedimentos Bío Bío, profundos
160	21,72	+5,97	Relleno artificial y coluvio, de poco espesor (próximo a cerro)
158	24,10	+3,96	Sedimentos Andalién y coluvio
146	35,36	-10,13	Suelo residual
143	37,56	-2,53	Suelo residual
142	38,58	-1,97	Suelo residual

\* + levantamiento

- hundimiento

## EL SUBSUELO DEL CENTRO DE CONCEPCION

Los sondeos recopilados por IDIEM (realizados por IDIEM y otros) permiten establecer que el subsuelo de la ciudad de Concepción está constituido por los sedimentos fluviales del río Bío Bío descritos en párrafos precedentes. Predominan en ellos los suelos arenosos -con intercalaciones limo-arcillosas de cierta importancia- constituidos fundamentalmente por arenas medias, en general uniformes y con porcentajes variables de finos limosos. Su compacidad varía de suelta a muy densa, aumentando en general con la profundidad. Con respecto a las capas limo-arcillosas, su distribución es variable, dependiendo del lugar; en el centro mismo de la ciudad se las encuentra bajo los 20 m de profundidad (excepciones son algunos lentes más superficiales); en cambio, en las zonas ribereñas y cercanas a los cerros, se hacen más potentes y superficiales. Tales capas contienen en general materia orgánica y poseen características mecáni-

cas variables.

En las cercanías de varios cerros los sedimentos Bío Bío engranan con depósitos de materiales derrumbados y coluvios desplazados de las laderas. En ciertas partes de la superficie, así como en algunos niveles del subsuelo, lentes y lenguas acuñadas de estos materiales se distribuyen hasta unos 200 m desde el pie del cerro. Las lenguas y lentes están constituidas por materiales finos o mezclas de arena con limo y arcilla.

Los suelos superficiales de la ciudad suelen consistir además en barros, turbas y otros materiales pobremente drenados, típicos de zonas bajas, localizados en cursos de inundación abandonados, rinconadas entre cerros y depresiones entre dunas o relleno artificial. A este respecto, son notorias las áreas circundantes a la laguna Las Tres Pascualas, el pajonal Chepe y otras; además de éstas, existían antiguamente otras áreas, hoy rellenadas, como el actual barrio Pedro del Río y Estación FF. CC., Barrio Universitario, Avda. Collao, etc. Dichos rellenos artificiales están formados por un conjunto heterogéneo de materiales tan diversos como maicillo, escombros, basuras, etc. En cualquier caso, existe en toda la ciudad una capa superficial de relleno y/o arena suelta (con índice de penetración estándar menor de 20 golpes/pie) cuyo espesor varía en general entre 3 y 7 m.

## NIVEL FREATICO EN LA CIUDAD DE CONCEPCION

En el conjunto de observaciones que se refieren al comportamiento sísmico de los suelos, parece resaltar un factor de relativa importancia, como es el de la posición de la napa freática respecto a la superficie. Medvedev<sup>5</sup> indica que en un suelo con napa superficial el valor de las aceleraciones podría llegar hasta duplicarse en relación con un suelo similar que la tuviera a más de 10 m de profundidad.

Según los datos disponibles al comenzar este trabajo, la napa se encontraría a profundidades variables entre 0 y 11 m más o menos, dependiendo fundamentalmente de la topografía; un intento de asociar la profundidad de la napa con sectores determinados de la ciudad demostró la necesidad de un estudio más completo, el cual se hizo según las siguientes etapas:

- reducción de todas las profundidades de napa existentes en los archivos de IDIEM a cotas absolutas, para eliminar el efecto de la topografía;
- medición simultánea de napas en 11 puntos de la ciudad, a fin de conocer la forma de la napa y el sentido del flujo en un momento dado;
- estudio de la variación de niveles del río Bío Bío, mes a mes, durante los

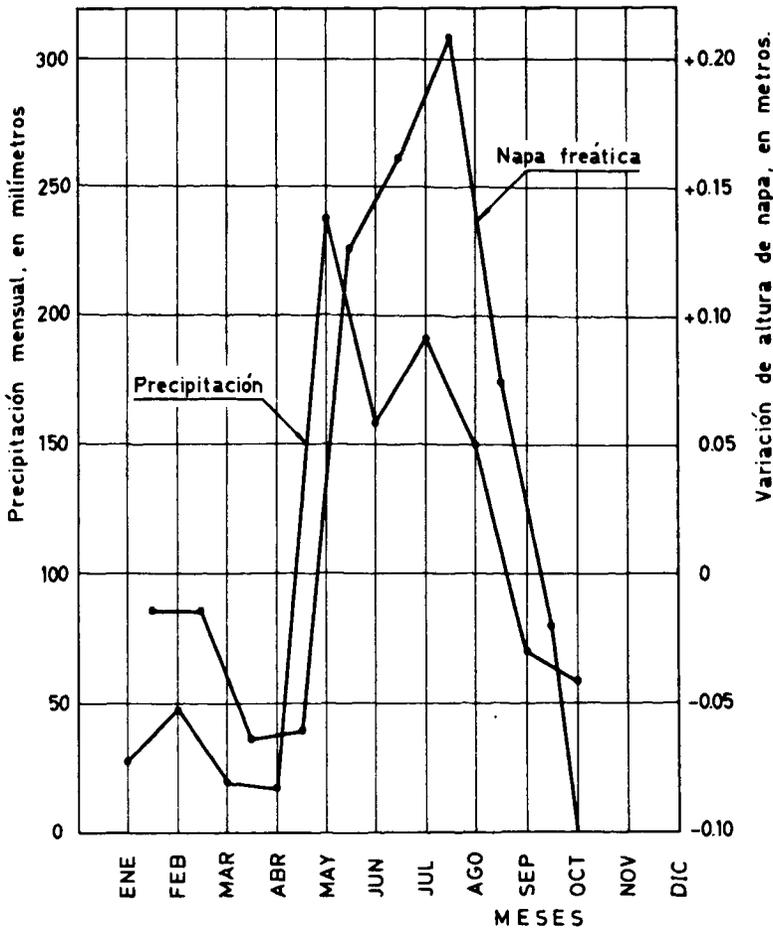


Fig. 7. Influencia de la precipitación mensual en la variación de la napa freática en el centro de Concepción (1967).

años 1964 a 1967;

- medición de la fluctuación de la napa en un punto del centro de la ciudad (SPC), a lo largo del año 1967;
- estudio de las precipitaciones caídas durante el mismo año 1967; y
- consideraciones acerca de la influencia del río Andalién, como dren natural.

La reducción de profundidades de napa a cotas absolutas fue posible gracias a la existencia del plano topográfico de la OEA, el que tiene su sistema de cotas referido al nivel del mar a través de nivelaciones hechas por el Instituto Geográfico Militar.

El estudio de nivelaciones del río se realizó con datos de mediciones diarias, hechas por ENDESA frente a la ciudad, durante los años 1964 al 67. Los niveles medios mensuales se muestran en la Fig. 9. Puede observarse un nivel mínimo en los meses de febrero-marzo, y máximo en los meses de julio-agosto y diciembre; los dos máximos corresponden respectivamente a las llu-

Fig. 8. Nivel medio mensual del río Bío Bío (1967) sobre el nivel del mar.

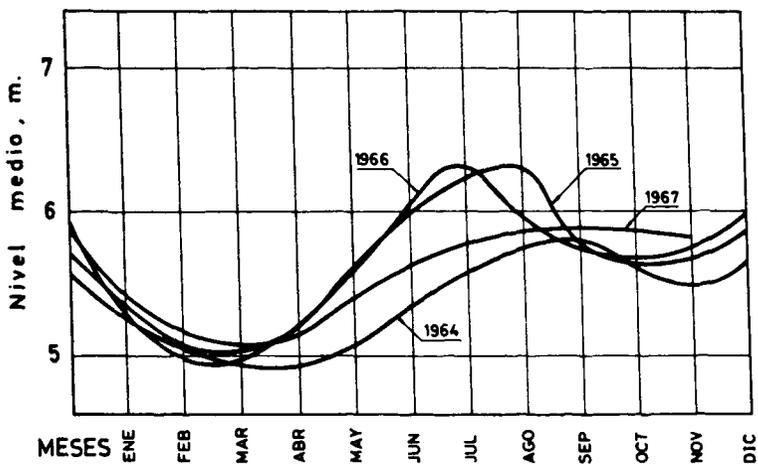
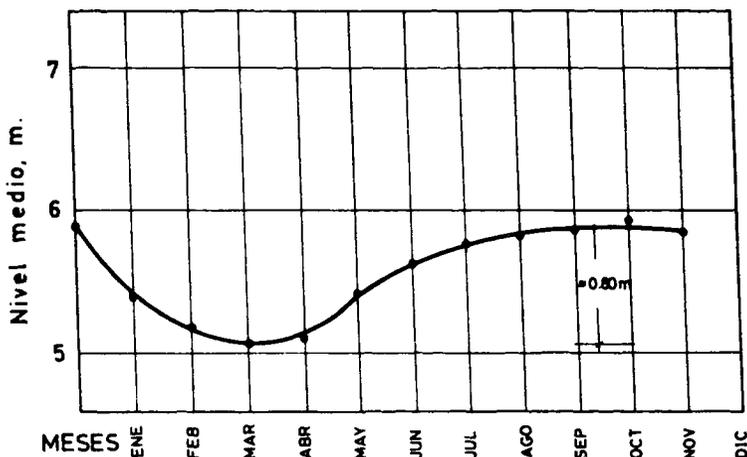
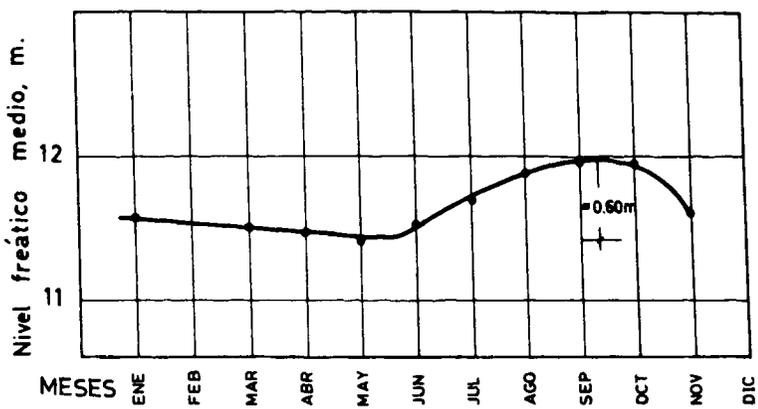


Fig. 9. Niveles medios mensuales del río Bío Bío (1964 a 1967), sobre el nivel del mar.

Fig. 10. Nivel freático medio mensual en SPC (1967), sobre el nivel del mar.



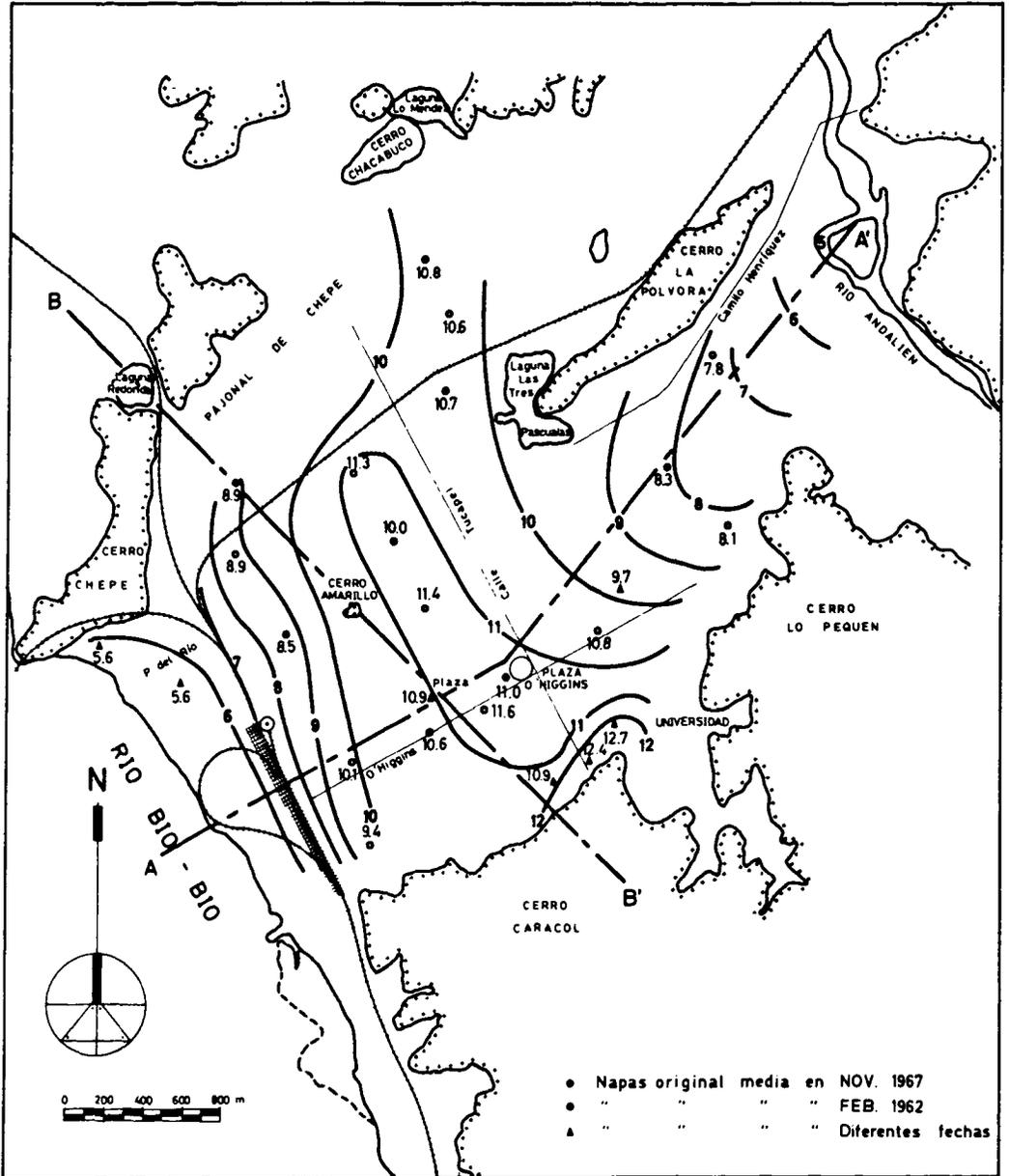


Fig. 11. Esquema de cotas absolutas de la napa freática en Concepción. Nivel mínimo (febrero).

vias de invierno y al deshielo de primavera en la Cordillera de los Andes. Las diferencias que se observan entre las curvas se asocian claramente a las características climáticas de los años respectivos.

La cota de la napa en el centro de la ciudad es siempre más alta que el nivel del río Bío Bío, por lo que el drenaje es hacia él en toda época del año. Ello significa que la napa es alimentada exclusivamente por las aguas lluvias, incluyendo el drenaje de los cerros cercanos (Lo Pequeño, Caracol), como lo demuestra la Fig. 7.

La Fig. 10 muestra la variación del nivel medio mensual en SPC durante el año 1967; ella muestra cierta correspondencia con la curva de la Fig. 8. Pese a que la napa no es afectada por el deshielo, la correlación resulta aceptable.

El río Andalién, como sistema de drenaje de la parte este de la ciudad, ejerce una acción comparable a la del río Bío Bío, por cuanto su nivel máximo no sobrepasa la cota 7,0 m sobre el nivel del mar en crecidas fuertes del invierno, y su nivel mínimo es también del orden de 5 m. Debido a que nace y se desarrolla en la cordillera de la Costa, presenta dos diferencias secundarias de comportamiento respecto al río Bío Bío: 1) no es afectado por el deshielo, y 2) en invierno es muy sensible a las lluvias intensas, desbordándose con cierta frecuencia, pero bajando en pocos días a niveles comparables a los del río Bío Bío. Por lo tanto, a falta de más datos y para los efectos de este estudio, se ha considerado razonable relacionar los niveles del río Bío Bío con las napas de toda la ciudad, incluso los barrios adyacentes al Andalién.

Si se observa la Fig. 9, puede apreciarse que el nivel medio del Bío Bío en febrero-marzo corresponde al mínimo y es independiente del año considerado.

Se dispone de 24 mediciones de napa en diferentes épocas y lugares de Concepción, las cuales se han reducido a este nivel mínimo de febrero, suponiendo arbitrariamente que hay proporcionalidad entre las fluctuaciones del río Bío Bío y la napa en toda la ciudad. Ellas, así corregidas, se han localizado en la Fig. 11, que muestra un esquema de cotas absolutas de la napa freática en Concepción en su nivel de febrero, que se puede suponer como mínimo en un año normal. Se ve que el nivel más alto de la napa se encuentra en el centro de la ciudad (entre calles Caupolicán y Tucapel), decreciendo hacia ambos ríos; en la zona del Barrio Universitario ella es excepcionalmente alta. En cuanto al nivel máximo, por diversos antecedentes se ha podido establecer que la fluctuación anual de la napa no superaría los 1,5 m.

## EL SONDAJE PROFUNDO (SPC)

A fin de determinar las características de los sedimentos que cubren el basamento rocoso de Concepción, se realizó un sondeo en el centro de la ciudad, en un sitio eriazo ubicado en calle Castellón entre Barros Arana y O'Higgins.

El sondeo fue realizado por IDIEM, alcanzándose la profundidad de 133,7 m, a la cual se extrajo un testigo granítico de 3 cm de longitud. Se desconoce si se trata de un bolón o de la roca basal, ya que dificultades mecánicas impidieron continuar el avance; por otra parte los cálculos efectuados a partir de las anomalías gravimétricas<sup>20</sup> indican que la profundidad de la roca es de 126

± 20 m.

En la Tabla III se muestra la estratigrafía observada en el sondaje, en la que se han definido 21 estratos. Los ensayos realizados sobre 90 muestras extraídas, como también los índices de penetración de cuchara normal medidos hasta los 50 m de profundidad, pesos unitarios secos y húmedos, pesos específicos, ensayos de clasificación, etc., se encuentran en detalle en la memoria de título de M. Poblete<sup>1</sup>.

TABLA III  
ESTRATIGRAFIA OBSERVADA EN EL SONDAJE (SPC)

Horizonte	Cotas límites m		Espesor m	Descripción del material
H-1	0	0,80	0,80	Relleno de escombros.
H-2	0,80	3,50	2,70	Arena media a fina, limosa; suelta.
H-3	3,50	4,70	1,20	Arena media, algo limosa; muy compacta.
H-4	4,70	9,40	4,70	Arena fina a muy fina; compacidad media.
H-5	9,40	12,00	2,60	Limo arenoso, compacto.
H-6	12,00	24,90	12,90	Arena media, algo limosa; compacta.
H-7	24,90	27,50	2,60	Limo de alta compresibilidad, plástico, algo orgánico; consistencia media.
H-8	27,50	31,90	4,40	Arena muy fina, limosa; muy compacta (cementada?).
H-9	31,90	32,50	0,60	Limo muy consistente.
H-10	32,50	34,40	1,90	Arena media, algo limosa; densa.
H-11	34,40	36,50	2,10	Arcilla de mediana plasticidad; consistencia media a alta.
H-12	36,50	43,10	6,60	Limo arenoso y arena limosa; muy compacto (cementado?).
H-13	43,10	45,80	2,70	Limo de baja compresibilidad; muy consistente.
H-14	45,80	55,60	9,80	Arena fina interestratificada con limo; muy compacta.
H-15	55,60	59,60	4,00	Limo arenoso.
H-16	59,60	62,80	3,20	Limo de compresibilidad media, algo orgánico.
H-17	62,80	66,10	3,30	Arena muy fina, limosa.
H-18	66,10	75,10	9,00	Limo arenoso y arena por capas; a 69,0 m limo muy blando.
H-19	75,10	85,00	9,90	Limo de alta compresibilidad, inorgánico, plástico.
H-20	85,00	107,00	22,00	Horizonte interestratificado de arena fina Bío Bío, gruesa cuarzosa y limo. Abundan los elementos minerales no Bío Bío.
H-21	107,00	133,70	26,70	Ripio grueso y bolones predominantemente graníticos.
H-22	133,70			Muy probablemente roca granítica.

Para estimar la velocidad de ondas de corte de pequeña intensidad ( $V_s$ ) en un suelo arenoso, se requiere conocer su relación de vacíos y la presión confinante efectiva. Así, experiencias realizadas en arenas cuarzosas han demostrado que  $V_s$  depende sólo de esos 2 parámetros, y es prácticamente independiente de la granulometría, de la humedad, de los esfuerzos de corte estáticos presentes en el suelo y de la historia de esfuerzos.

De esta forma, el problema en la práctica se reduce a conocer la relación de vacíos natural ( $e_{nat}$ ) a diferentes profundidades. Con la excepción de algunas muestras inalteradas en que se pudo hacer mediciones directas, este parámetro, en general, debió estimarse en los suelos arenosos del SPC a partir de otras mediciones.

Para estas estimaciones la expresión básica usada fue:

$$e_{nat} = e_{max} - D.R. (e_{max} - e_{min})$$

en que:

$D.R.$  = densidad relativa, en tanto por uno

$e_{max}$ ,  $e_{min}$  = relaciones de vacíos máxima y mínima del material.

En el caso del SPC, no fue posible determinar a cada muestra su  $e_{max}$  y  $e_{min}$ , dado que la cantidad de suelo disponible era insuficiente. Por esto, fue necesario establecer correlaciones entre estas variables y la curva granulométrica, válidas para arenas limosas Bío Bío. Por otra parte,  $D.R.$  se estimó a partir del índice de penetración estándar hasta los 50 m; bajo esa profundidad se supuso  $DR = 1^*$ . Se usó la correlación de Terzaghi-Peck, previa verificación. Para el caso de arenas muy finas o limosas, bajo la napa freática, se corrigió el índice de terreno en la forma recomendada por los mismos autores<sup>22</sup>.

### CARACTERISTICAS DINAMICAS DEL SUBSUELO

Tal como se explicó en la Introducción, el modelo dinámico del subsuelo correspondiente al SPC debe definirse como una sucesión de capas horizontales, cada una de las cuales queda caracterizada por 4 parámetros:

- $H$  : espesor del estrato
- $\rho$  : densidad húmeda
- $V_s$  : velocidad de ondas de corte
- $C$  : amortiguamiento

---

\*Experiencias mencionadas por Fletcher<sup>21</sup> indican que bajo 50 m de profundidad, el índice de penetración estándar deja de ser confiable como medida de la densidad relativa.

La estratigrafía del SPC, fue establecida en la Tabla III; en la Memoria de Poblete<sup>1</sup> se entregan las densidades húmedas de esas capas. El modelo dinámico puede estar constituido por estos estratos o un número menor, en la medida en que sea posible asimilar estratos adyacentes de densidades y velocidades parecidas.

Con respecto al valor del amortiguamiento, se trata de un asunto complejo, sobre el cual no existen aún criterios aceptados. Se ha preferido en este trabajo definir un modelo simplemente elástico, dejando el amortiguamiento para la etapa de cálculo del espectro de amplificación.

El problema restante es el de la elección de los  $V_s$ , lo que se trata en los párrafos siguientes.

### Determinación de $V_s$

Para obtener el valor de  $V_s$  de un estrato de suelo hay tres métodos posibles:

- 1) medición directa en terreno.
- 2) medición sobre muestras representativas, en el laboratorio.
- 3) estimación a partir de otras propiedades del suelo.

En el SPC se recurrió a los 3 métodos, con el fin de verificarlos entre sí y obtener datos finales de confianza.

#### 1) Medición de $V_s$ en terreno

Fue realizado por el Departamento de Geofísica y Geodesia de la U. de Chile, haciendo explotar pequeñas cargas de dinamita a diferentes profundidades dentro del SPC, una vez finalizado éste. Los tiempos de llegada de las ondas longitudinales y de corte fueron registrados en la superficie mediante geófonos; están disponibles para su consulta los detalles de las experiencias<sup>23</sup>.

Los valores de  $V_s$  y de los módulos de Poisson así obtenidos aparecen en la Tabla IV y en la Fig. 12.

TABLA IV  
VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE ( $V_s$ ) Y MODULOS  
DE POISSON, ( $\gamma$ ) EN SPC  
(Medidas por el Departamento de Geofísica y Geodesia, U. de Chile<sup>23</sup>)

Profundidades límites m	$V_s$ m/seg	$\gamma$	Profundidades límites m	$V_s$ m/seg	$\gamma$
1,0 18,0	210	0,422 - 0,487	51,0 55,6	314	0,484
18,0 24,9	207	0,474	55,6 75,1	308	0,477
24,9 34,4	348	0,496 (?)	75,1 85,0	317	0,464
34,4 40,0	262	0,495	85,0 102,5	565	0,409
40,0 45,8	264	0,486	102,5 117,0	373	0,477
45,8 51,0	267	0,484			

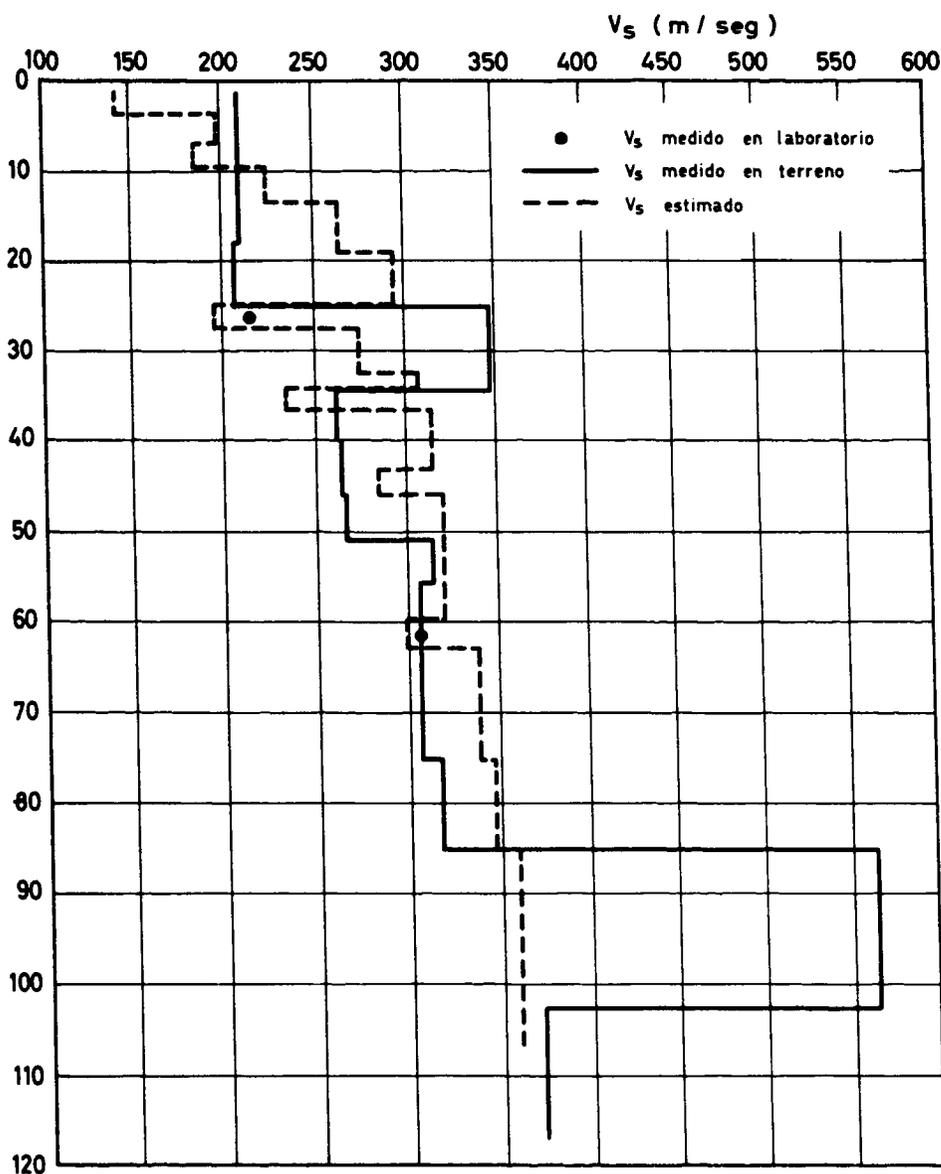


Fig. 12. Perfil de velocidad de ondas de corte: sondeo profundo plan Concepción (SPC).

2) Medición de  $V_s$  en laboratorio.

Se realizó en el Laboratorio de Dinámica de Suelos del MIT (USA), por el método de los pulsos<sup>24</sup>. Se ensayaron dos muestras inalteradas de estratos limo-arcillosos.

En este método, la muestra se ensaya dentro de una cámara triaxial; la presión confinante en cada caso fue elegida con el mismo criterio usado en el método 3. En la Tabla V y Fig. 12 se han colocado los dos resultados obtenidos; los valores medidos se incrementaron en un 10% de acuerdo a lo que se explica en el párrafo siguiente.

**TABLA V**  
**VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE ( $V_s$ ) DETERMINADAS**  
**SOBRE MUESTRAS DEL SPC**  
 (Medidas por el Laboratorio Dinámica de Suelos MIT).

Número muestra	Profundidad m	$\sigma_o$ (t/m <sup>2</sup> )		$V_s$ (m/seg)	
		Terreno	Laboratorio	Medido	$1,1V_s$ med.*
31	25,3	20,3	18,6	195	215
62	61,0	43,7	43,0	279	307

\* $V_s$ , incrementado en 10%, de acuerdo a Hardin y Black<sup>25</sup>.

### 3) Estimación de $V_s$

Según se expuso, es posible estimar el  $V_s$  de una arena cuarzosa si se conoce su relación de vacíos y la presión confinante efectiva. En el caso del SPC se emplearon las curvas de Hardin y Richart<sup>26</sup>, que se muestran en la Fig. 13. Estas curvas empíricas fueron determinadas sobre arenas cuarzosas limpias<sup>26, 27</sup>, y se ha supuesto su validez para las arenas limosas Bío Bío.

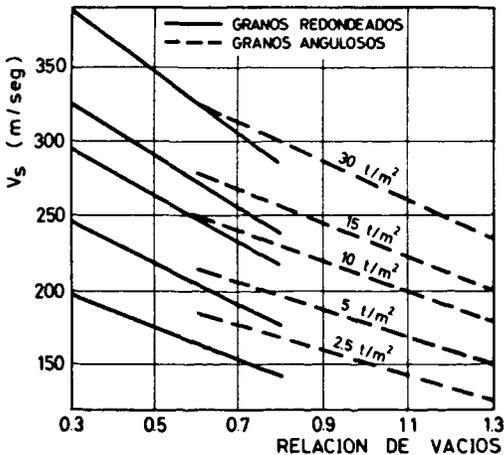


Fig. 13. Velocidad de onda de corte  $V_s$ . Relación de vacíos y presión de confinamiento, para arenas cuarzosas. (Tomado de Hardin y Richart<sup>26</sup>. 1963.

(De hecho, las curvas para arenas y arcillas son tan parecidas que sugieren la existencia de una relación única). Es así como para los estratos limo-arcillosos (indicados en la Tabla VI con un asterisco) se siguió un procedimiento similar al anterior, usando las curvas de Lawrence<sup>24</sup>, corregidas de acuerdo a Hardin y Black para considerar la historia de cargas. En efecto, experiencias realizadas por estos autores muestran que, si la consolidación de la arcilla se efectúa por

El detalle del cálculo de los  $V_s$ , usando las curvas mencionadas aparece en la Tabla VI. La presión confinante efectiva,  $\sigma_o$ , es el promedio de los 3 esfuerzos principales<sup>25</sup>; suponiendo un coeficiente de empuje de tierras en reposo<sup>22, 27</sup>  $k_o = 0,5$ :

$$\sigma_o = \frac{\sigma_z + 0,5 \sigma_x + 0,5 \sigma_y}{3} = 0,67 \sigma_z$$

en que  $\sigma_z$  es la presión vertical efectiva.

Se ha encontrado<sup>24, 28, 29</sup> que en las arcillas normalmente consolidadas existen relaciones similares  $V_s, e, \sigma_o$ .

incrementos de carga pequeños ( $1 \text{ t/m}^2$ ), el valor final de  $V_s$  es aproximadamente un 10% mayor que si se hace con incrementos grandes ( $15 \text{ t/m}^2$ )<sup>28</sup>. En consecuencia, para el caso del SPC, se aumentaron los valores de Lawrence un 10%.

Los  $V_s$  así obtenidos (Tabla VI) se han graficado en la Fig. 12.

TABLA VI

ESTIMACIONES DE VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE ( $V_s$ ) EN SPC

Profundidades límites m	Espesor capa $\Delta H$ m	Rel. de vacíos		Peso unitario saturado		Sobrecarga efectiva $\sigma_z$ t/m <sup>2</sup>	Presión confinante $\sigma_{o_2}$ t/m <sup>2</sup>	$V_s$ m/seg
		Número de puntos tomados	$e_{medio}$	Número de puntos tomados	$\rho_{sat \text{ medio}}$ t/m <sup>3</sup>			
1,00 3,50	3,5	3	0,880	3	1,628	2,849	1,91	142
3,50 7,00	3,5	4	0,720	4	2,066	7,564	5,07	198
7,00 9,40	2,4	3	0,926	3	1,951	10,570	7,08	186
9,40 13,40	4,0	5	0,758	5	2,030	13,771	9,23	225
13,40 19,00	5,6	7	0,596	7	2,142	19,028	12,75	264
19,00 24,90	5,9	8	0,523	8	2,203	25,775	17,27	294
*24,90 27,50	2,6	2	1,420	2	1,694	30,226	20,25	198
27,50 32,50	4,4	6	0,756	6	2,052	33,443	22,41	276
32,50 34,40	1,9	1	0,615	1	2,133	36,834	24,68	308
*34,40 36,50	2,1	1	1,248	1	1,805	38,756	25,97	235
36,50 43,10	6,6	4	0,657	4	2,097	43,221	28,96	315
43,10 45,80	2,7	2	0,869	2	1,910	48,070	32,21	285
45,80 59,60	13,8	9	0,700	9	2,058	56,598	37,92	321
*59,60 62,80	3,2	2	1,000	2	1,843	65,247	43,72	300
62,80 75,10	12,3	2	0,705	2	2,003	72,738	48,73	340
*75,10 85,00	9,9	1	0,902	1	1,831	83,047	55,64	347
*85,00 107,00	22,0	4	0,882	4	1,835	96,345	64,55	360

\*Los  $V_s$  correspondientes a estratos con asterisco se calcularon con las curvas para arcilla de Lawrence<sup>28</sup> aumentadas en un 10% de acuerdo a Hardin y Black<sup>28</sup>.

En los demás casos, se calculó con las curvas de Hardin y Richart para arenas cuarzosas (Fig. 13) promediando entre las curvas para granos redondeados y angulosos.

**Comparación de los 3 métodos**

En la Fig. 12 aparecen todos los valores de  $V_s$  obtenidos. Se puede apreciar la buena concordancia general entre los 3 métodos; la diferencia entre ellos es, en general, menor que 20%. Es especialmente notable el acuerdo existente entre los valores del laboratorio y las estimaciones en las capas limo-arcillosas. Existen algunas diferencias mayores entre las estimaciones y los datos de terreno; a este respecto debe notarse que, si bien el método de las explosiones reproduce más fielmente el fenómeno en estudio, está sujeto a errores experimentales fuertes, y no detecta los detalles de la estratigrafía. Por lo tanto,

los valores finales de  $V_s$ , se eligieron despreciando los resultados anómalos de terreno.

## ELABORACION DE UN MODELO PARA EL SUBSUELO DEL CENTRO DE CONCEPCION

En los párrafos anteriores se entregó y discutió la información básica para la elaboración de un modelo dinámico en SPC, válido para temblores de pequeña intensidad.

Respecto a las velocidades de ondas de corte, ellas fluctúan entre 140 y 380 m/seg (salvo una anomalía), creciendo en general con la profundidad. Esta última tendencia es lógica, debido a que con la profundidad aumentan tanto la compacidad como la sobrecarga efectiva.

Para la elección del modelo dinámico se despreciaron los valores anómalos de terreno y se asignaron a las capas  $V_s$  medios. La estratigrafía dinámica propuesta es la que aparece en la Fig. 14, cuyas fronteras entre estratos dinámicos coinciden con fronteras de estratos de suelo.

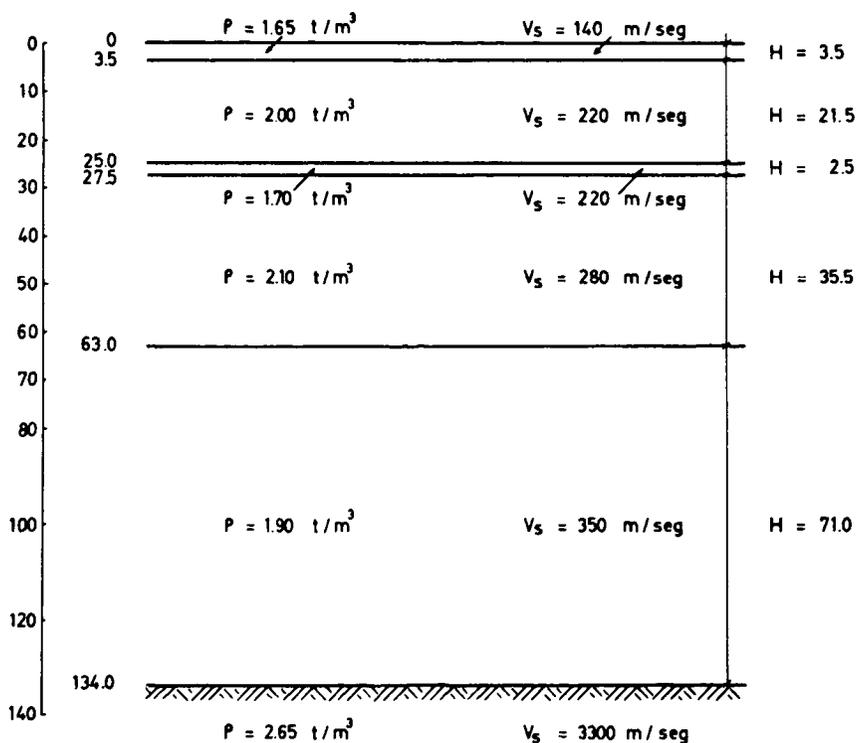


Fig. 14. Sondaje profundo: perfil dinámico propuesto. Perfil dinámico válido para deformaciones de corte  $< 2,5 \cdot 10^5$ . Para terremotos, disminuir los valores de  $V_s$  de los suelos en un 15%.

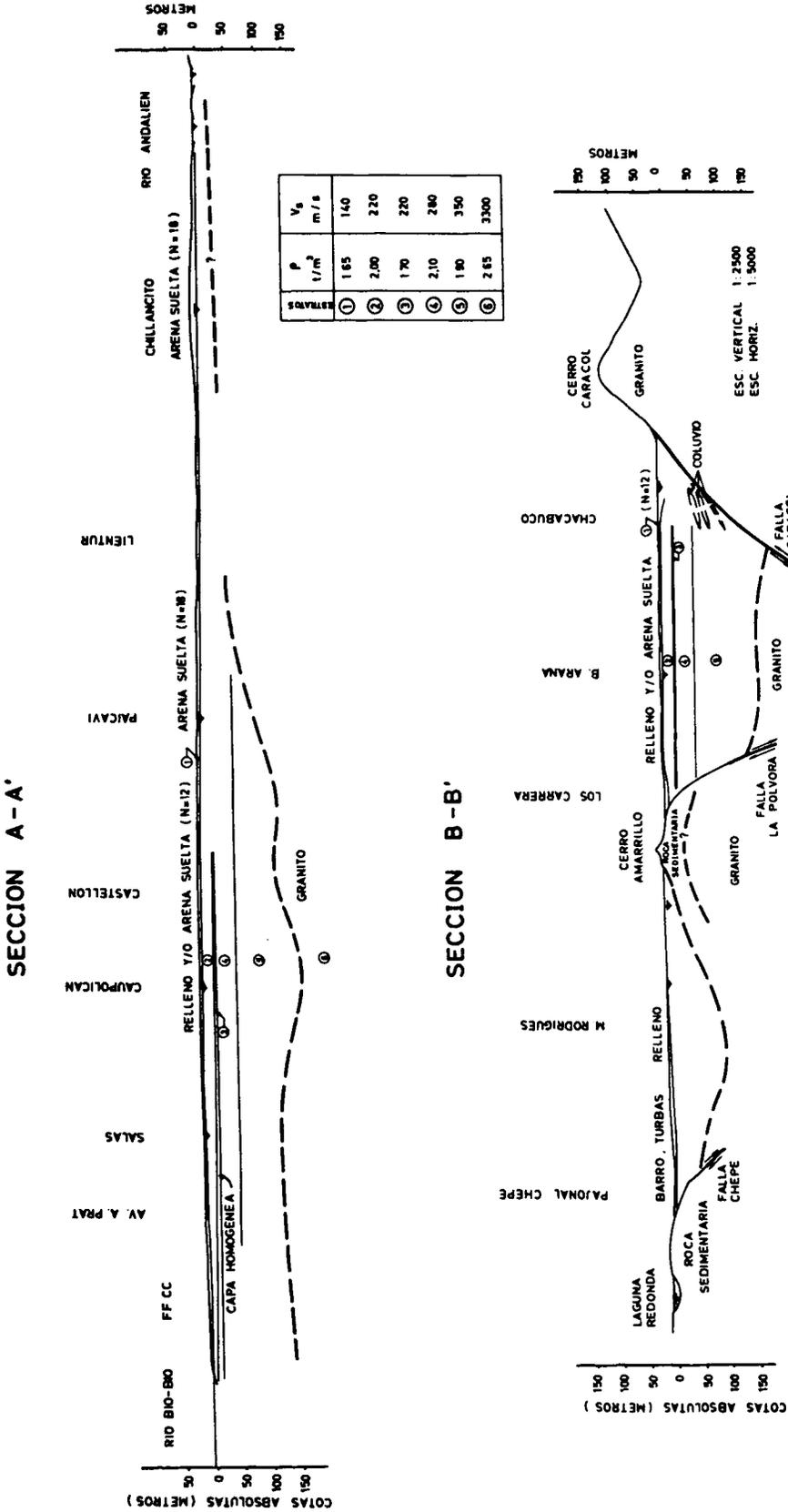


Fig. 15. Modelo dinámico propuesto para Concepción.

Se tomó como profundidad de la roca granítica 134 m. Se estima que el error que pueda tener esta cifra es de poca importancia para el cálculo del espectro de amplificación.

El valor de  $V_s$  para el granito se estimó en 3300 m/seg de acuerdo a los siguientes datos:

Velocidad de ondas longitudinales en granito<sup>5</sup> = 5600 m/seg

Coefficiente de Poisson<sup>30</sup> = 0,25

Se eligió como el valor de la densidad en el granito 2,65 t/m<sup>3</sup>, medido en el laboratorio sobre el testigo extraído.

La Fig. 14 es el modelo dinámico correspondiente al SPC. El modelo se ha extendido al resto de la ciudad mediante el trazado de las secciones esquemáticas A-A' y B-B' de la Fig. 15, cuya localización en planta se indica en la Fig. 11.

El trazado de las secciones mencionadas se basó en los siguientes antecedentes principales:

- plano topográfico del Proyecto Aerofotogramétrico Chile de la OEA, 1962.
- prospección gravimétrica<sup>20</sup>, para delimitar el contorno de la roca.
- perfiles de suelo<sup>1</sup>.
- estratigrafía dinámica del SPC.

## CONCLUSIONES

1. Se entrega, para el centro de la ciudad de Concepción, el perfil dinámico de suelos hasta la roca, válido para temblores de pequeña intensidad. No se han definido aquí los valores del amortiguamiento ni la variación de las velocidades con la intensidad del sismo. La aplicación de estos resultados a temblores fuertes exigirá estudios especiales al respecto.
2. El buen acuerdo entre las velocidades de ondas de corte medidas directamente en el suelo y las estimadas a partir de correlaciones es alentador. Para cálculos futuros de espectros de amplificación en otros puntos de la zona, estas correlaciones (válidas para arenas y arcillas normalmente consolidadas) pueden ser aplicadas con confianza.
3. Se entrega un mapa de niveles freáticos en la ciudad de Concepción el que será usado en estudios de microrregionalización sísmica de la ciudad.
4. El examen de las nivelaciones realizadas antes y después de los sismos de 1939 y 1960 permite concluir que, en ambos:
  - a) la fosa tectónica Concepción-Talcahuano se movió como una unidad.
  - b) Los movimientos verticales registrados después del terremoto fueron de

caracter tectónico. Compactación de sedimentos no existió, o fue muy pequeña.

## BIBLIOGRAFIA

1. POBLETE, M. *El subsuelo del centro de Concepción en relación con el diseño antisísmico*. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago 1967.
2. DOBRY, R. Plan de microrregionalización sísmica de Concepción. *Revista del IDIEM*, vol. 5, nº 2 (octubre 1968), pp. 147-149.
3. Microrregionalización sísmica de Concepción. *Revista del IDIEM*, vol. 7, nº 2 (septiembre 1968), i.
4. DUKE, C.M. Effects of ground destructiveness of large earthquakes. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 84, nº SM 3, (agosto 1958).
5. MEDVEDEV, S.V. *Engineering Seismology* (translated from russian).
6. GALLI, C. y SANCHEZ, J. Effects of earthquake of May 1960, in Concepcion and vicinity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 53, nº 6 (diciembre 1963), pp. 1281-1297.
7. KARZULOVIC, J. y WATANABE, T. Los movimientos sísmicos del mes de mayo de 1960 en Chile. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*. Universidad de Chile.
8. DUKE, C.M., y LEEDS, D.J. Response of soils, foundations and earth structures to the chilean earthquakes of 1960. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 53, nº 2 (febrero 1963), pp. 309-357.
9. DUKE, C.M., y LEEDS, D.J. Soil conditions and damage in the Mexico earthquake of July 28, 1957. *Bulletin of the Seismological Society of America* (abril 1959).
10. MONTESSUS DE BALLORE. El arte de construir en los países expuestos a temblores. *Anales de la Universidad de Chile*, (noviembre y diciembre 1906).
11. HUIDOBRO, C. Visita a Mendoza después del terremoto del 20 de marzo de 1861. *Anales de la Universidad de Chile*, (diciembre 1862).
12. DEL BARRIO, P. Memoria sobre los temblores de tierra. *Anales de la Universidad de Chile* (1855).
13. DUKE, M., y MATHIESEN, R. Amplification of earthquake motion due to site conditions.
14. ARIAS, A., y PETIT LAURENT, L. Un modelo teórico para los acelerogramas de temblores fuertes. *Revista del IDIEM*, vol. 4, nº 1 (mayo 1965), pp. 29-60.
15. ROSENBLUETH, E. Response spectra on stratified soil. *Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering*. New Zealand.
16. *The use of amplification functions to derive response spectra including the effect of soil conditions*. Report of MIT Department of Civil Engineering. En prensa.
17. WHITMAN, R.V. The current status of soil dynamics. *Applied Mechanics Review*. En prensa.
18. GALLI, C. *Geología urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcabuano, Chile*. Universidad de Concepción, 1967.
19. GALLI, C., y LEMKE, R.W. El suelo de fundación de Concepción. *Estudios Geotécnicos* nº 2, Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile 1967.
20. MEINARDUS, H., y VALDENEGRO, C. *Plano gravimétrico de Concepción*. Departamento de Geofísica y Geodesia. Universidad de Chile, 1968.

21. FLETCHER, R. Standard penetration test: its uses and abuses. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 91, n° S M 4 (julio 1965).
22. TERZAGHI, K., y PECK, R. *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. El Ateneo. Buenos Aires 1958.
23. *Velocidades de ondas sísmicas y constantes elásticas en los sedimentos del subsuelo de Concepción*. Departamento de Geofísica y Geodesia. Universidad de Chile, 1967.
24. LAWRENCE, F. Ultrasonic shear wave velocities in sand and clay. Research Report R-65-05. *Soil Publication n° 175*. Massachusetts Institute of Technology.
25. HARDIN, B., y BLACK, W. Sand stiffness under various triaxial test stresses. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 92, n° S M 2 (marzo 1966).
26. HARDIN, B., y RICHART, F. Elastic wave velocities in granular soils. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 89, n° S M 1 (febrero 1963).
27. WHITMAN, R., y RICHART, B. Design procedures of dynamically loaded foundations. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, SM, (noviembre 1967).
28. HARDIN, B. Vibration modulus of normally consolidated clay. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. En publicación.
29. MOORANY, I., y SEED, B. In-situ strength characteristics of soft clays. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 91, n° S M 2 (marzo 1965), Part I.
30. DUKE, MATHIESEN, LEEDS, FRAZER. *Site characteristics of California*. Part I and II.

#### DYNAMIC MODEL OF CONCEPCION SOIL

##### SUMMARY:

*This paper presents a simple dynamic soil model for the center of Concepcion, valid to compute the amplification spectrum of slow acceleration motions. For this purpose information from Geology, Geophysics, Soil Mechanics and Dynamics were used and a boring 134 m deep was drilled. The shear wave velocities of soil layers were determined 1) by direct measurement on the field of explosion excited vibrations, 2) by laboratory measurement and 3) by estimation on the basis of soil void ratio and effective confining pressure. The results from the three procedures are in good agreement. This confirms that the Hardin-Richart correlation (for sand) and the one of Lawrence-Hardin-Black (for normally consolidated clays) are valid for Concepcion soils.*

*Some information about the water table in Concepcion useful for seismic micro-zoning is also presented.*