

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



"SISTEMA DE PROSPECCIÓN SÍSMICA"

INFORME DE INGENIERÍA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR

RICARDO DAVID BAUTISTA GARCÍA

PROMOCIÓN

1978 – I

LIMA – PERÚ

2003

*A mis queridos Padres Julio y Salomé,
quienes me dieron la vida y me formaron
en mis primeros años de vida.*

*A mi esposa Ana, por su persistencia y
permanente apoyo para la culminación de
este trabajo.*

*A mis hijos Richi y Noelia, que con su
valioso aporte en los tramos finales, pude
terminar este proyecto.*

SISTEMA DE PROSPECCIÓN SÍSMICA

SUMARIO

El Capítulo 1, hace una breve descripción del aporte de las ciencias –la Sismología y la Geofísica entre otras- que han permitido el conocimiento tanto de la estructura de la tierra, como de los fenómenos físicos que en ella se producen. El Capítulo 2, describe los tipos de ondas sísmicas más comunes que se producen a consecuencia de un movimiento sísmico. El Capítulo 3, identifica y describe el área de estudio (Zona de Bayóvar, Piura). El Capítulo 4 describe cada una de las unidades del Sistema de Prospección Sísmica – DICGA, implementado por el IGP (Instituto Geofísico del Perú) para realizar el presente estudio. El Capítulo 5 describe los métodos usados para la determinación de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en el área de estudio. (El método de *sondaje* en los pozos, es similar al comúnmente usado en la prospección petrolífera. La fuente de energía sísmica se ubica en la superficie y los sensores se desplazan verticalmente a lo largo del pozo. El otro método, el de perfil de *refracción sísmica*, consiste en generar movimientos sísmicos a diferentes distancias, con respecto al pozo, registrándose las ondas sísmicas que arriban a los geófonos distribuidos en este perfil). Los Capítulos 6 y 7 se refieren a los procedimientos para la determinación de las densidades y los parámetros necesarios para la construcción de los modelos dinámicos del suelo. El

Capítulo 8 resume en dos tablas los promedios de los parámetros de los modelos dinámicos que describen con mayor aproximación las propiedades físicas generales de los horizontes (estratos) identificados. Finalmente, el Capítulo 9 se refiere a las conclusiones a las que se ha arribado.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivo del estudio.....	10
CAPÍTULO II: ONDAS SÍSMICAS	11
2.1 Ondas de Compresión (Ondas P)	12
2.2 Ondas de Corte (Ondas S)	14
2.3 Ondas Superficiales	16
CAPÍTULO III: ÁREA DE ESTUDIO	22
3.1 Generalidades	22
3.2 Descripción del Área de Estudio	22
CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PROSPECCIÓN SÍSMICA – DICGA	26
4.1 Fuentes de Energía Sísmica.....	29
4.1.1 Generadores de Ondas de Corte (Generador Horizontal).....	30
4.1.2 Generadores de Ondas de Compresión (Generador Vertical)	31
4.2 Unidad de Detección	34
4.2.1 El Equipo OYO	35
4.2.2 Geófonos de Superficie	37
4.3 Unidad de Monitoreo y Almacenamiento	38
4.3.1 Acondicionador de señales BISON.....	38
4.3.2 Convertidor DC/DC	43
4.3.3 Oscilador de Calibración	44

4.3.4	Selector de señales.....	45
4.4	Unidad de Registro.....	46
4.4.1	Registrador GULTON.....	46
4.4.2	Motor-Generador.....	47
4.4.3	Control Remoto.....	48
4.5	Funcionamiento del Sistema de Prospección Sísmica – DICGA.....	49
CAPÍTULO V: PROCEDIMIENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS.....		51
5.1	Sondaje en Pozos.....	51
5.1.1	Adquisición de datos.....	52
5.1.2	Procesamiento de datos.....	56
5.1.3	Análisis e interpretación.....	59
5.1.4	Cálculo de velocidades de propagación promedio.....	63
5.2	Perfiles de Refracción Sísmica.....	64
5.2.1	Adquisición de datos.....	65
5.2.2	Análisis e interpretación.....	69
5.2.3	Cálculo de velocidades y espesores.....	70
5.2.4	Gráficas de Perfiles de Refracción Sísmica.....	74
5.3	Problemas Técnicos.....	77
CAPÍTULO VI: DETERMINACIÓN DE DENSIDADES.....		79
6.1	Procedimientos.....	80
6.1.1	Densidad de Campo.....	80
6.1.2	Densidad de Laboratorio.....	80
6.1.3	Densidad de Campo y Laboratorio.....	80

6.1.4 Densidad por Correlación.....	82
6.1.5 Densidad por Velocidad de Ondas de Compresión.....	83
6.2 Representatividad	85
CAPÍTULO VII: DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL MODELAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO	86
7.1 Velocidades de las Ondas de Compresión.....	86
7.2 Velocidades de las Ondas de Corte	86
7.3 Densidades.....	90
7.4 Módulo de Corte.....	90
7.5 Razón de Poisson.....	90
7.6 Módulos de Elasticidad e Incompresibilidad	92
CAPÍTULO VIII: MODELOS DINÁMICOS DEL SUELO	96
8.1 Modelo Dinámico.....	96
CONCLUSIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA.....	105

PRÓLOGO

Cuando el ser humano comenzó a preguntarse porqué ocurren los temblores y terremotos, es que nació la necesidad, como con tantos otros hechos “inexplicables” que ocurren en la naturaleza, de contar con medios que permitan desenmarañar y explicar estos fenómenos que suceden en la tierra.

En líneas generales, desde el comienzo de esta inquietud natural del ser humano por saber el cómo y el porqué ocurren las cosas, no ha sido fácil encontrar la manera de poder explicar todos estos fenómenos.

Felizmente, gracias a la permanente investigación y recopilación de información desplegada por estudiosos en la búsqueda de la explicación a todo cuanto represente una interrogante, es que se han ido aclarando, gradualmente, estos “misterios” y avanzar en el conocimiento cada vez más profundo de los mismos.

Esta misma inquietud por el conocimiento de todo aquello que era considerado “inexplicable” en su momento, motivó en el ser humano –ávido de nuevos retos y de descubrir todas las incógnitas posibles- la creación de métodos, técnicas, equipos, etc., tendientes a explicarlas.

En la actualidad, gracias a los soportes de ayuda con que cuenta el ser humano -debido al avance tecnológico logrado-, es posible emprender diversos tipos

de investigación, entre ellos el de poder evaluar y conocer las condiciones del suelo de una zona en particular de manera que se pueda prever y minimizar los efectos de fenómenos naturales tales como los terremotos o las inundaciones.

Para ello es necesario recurrir a métodos indirectos para tratar de predecir el tipo de movimiento que se espera en la superficie. Estos métodos permitirán determinar las características de la respuesta dinámica del suelo ante posibles sollicitaciones sísmicas en la zona, de tal forma que, empleadas adecuadamente, servirán para introducir en el diseño sismo-resistente, factores que soporten las sollicitaciones sísmicas dentro de un nivel tolerable de seguridad.

El presente proyecto, realizado entre fines de 1979 y comienzos de 1980, permitió demostrar que el Sistema de Prospección Sísmica, desarrollado por el Instituto Geofísico del Perú, resultó satisfactorio para la obtención de los parámetros que describen, con bastante aproximación, las propiedades físicas generales de los estratos identificados en la zona de estudio.

Dado el resultado satisfactorio obtenido, es que este sistema de prospección sísmica se puede aplicar, en general, para la determinación de los estratos de cualquier terreno en estudio; tanto así, que en la actualidad se viene utilizando básicamente este mismo sistema con algunas modificaciones hechas producto de las experiencias obtenidas en este proyecto.

CAPÍTULO I ANTECEDENTES Y OBJETIVO

1.1 Antecedentes

El conocimiento actual acerca del interior de la Tierra es resultado de numerosos estudios científicos, en su mayoría basados en la propagación de las ondas sísmicas a través del propio material terrestre. De esta manera ha sido posible determinar su composición y dividirla en varias capas concéntricas; del exterior al interior son: corteza, manto, núcleo externo y núcleo interno. (Fig. 1)

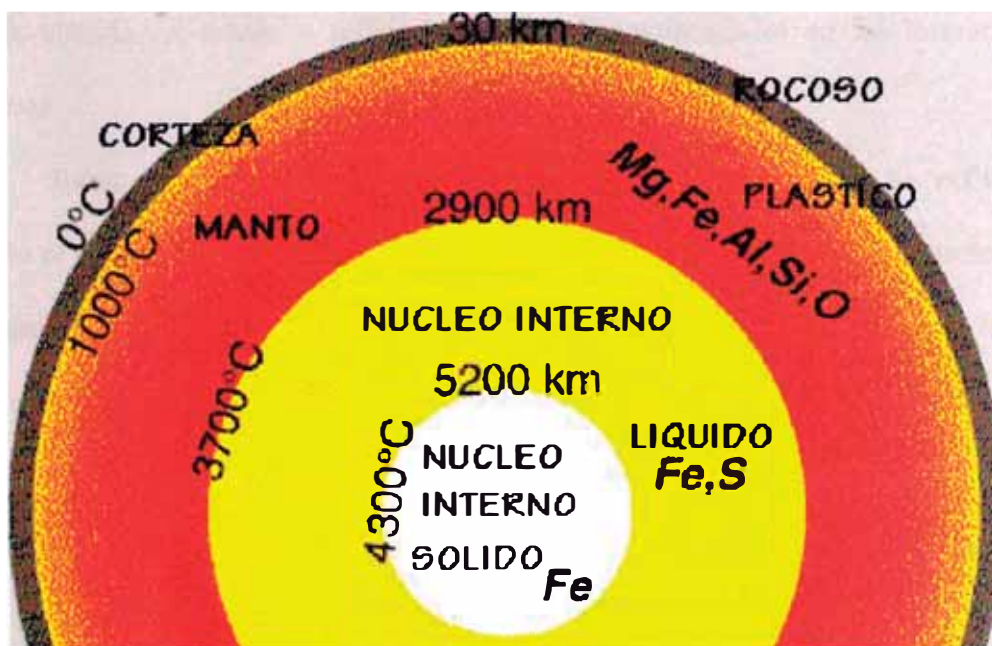


FIG. 1: Capas del interior de la Tierra

Tanto la **Sismología** como la **Geofísica** han contribuido al conocimiento de la estructura de la Tierra.

La **Geofísica** (ciencia que estudia los fenómenos físicos que se producen en nuestro planeta, como el electromagnetismo, la propagación de ondas mecánicas en la corteza terrestre y la gravedad entre otros), ha permitido el conocimiento de los materiales que componen la corteza terrestre y de los campos de fuerza que surgen de ella y ejercen su influencia hacia el exterior.

Dentro de la **Geofísica Aplicada** destacan las prospecciones o exploraciones geofísicas, mediante las cuales esta ciencia investiga y define particulares formaciones geológicas y/o cuerpos mineralizados de interés práctico y apto para la explotación industrial.

Los **métodos sísmicos de prospección** utilizan explosivos u otros medios alternativos para generar ondas sísmicas artificiales en puntos determinados; en otros lugares, usando geófonos y otros instrumentos, se determina el momento de llegada de la energía refractada o reflejada por las discontinuidades en las formaciones rocosas.

Estas técnicas producen **perfiles sísmicos de refracción** o de **reflexión**, según el tipo de fenómeno registrado. En las prospecciones sísmicas de petróleo, las técnicas avanzadas de generación de señal se combinan con sistemas sofisticados de registro digital y de cinta magnética para un mejor análisis de los datos.

Algunos de los métodos más avanzados de investigación sísmica se usan en la búsqueda de petróleo. (Fig. 2)

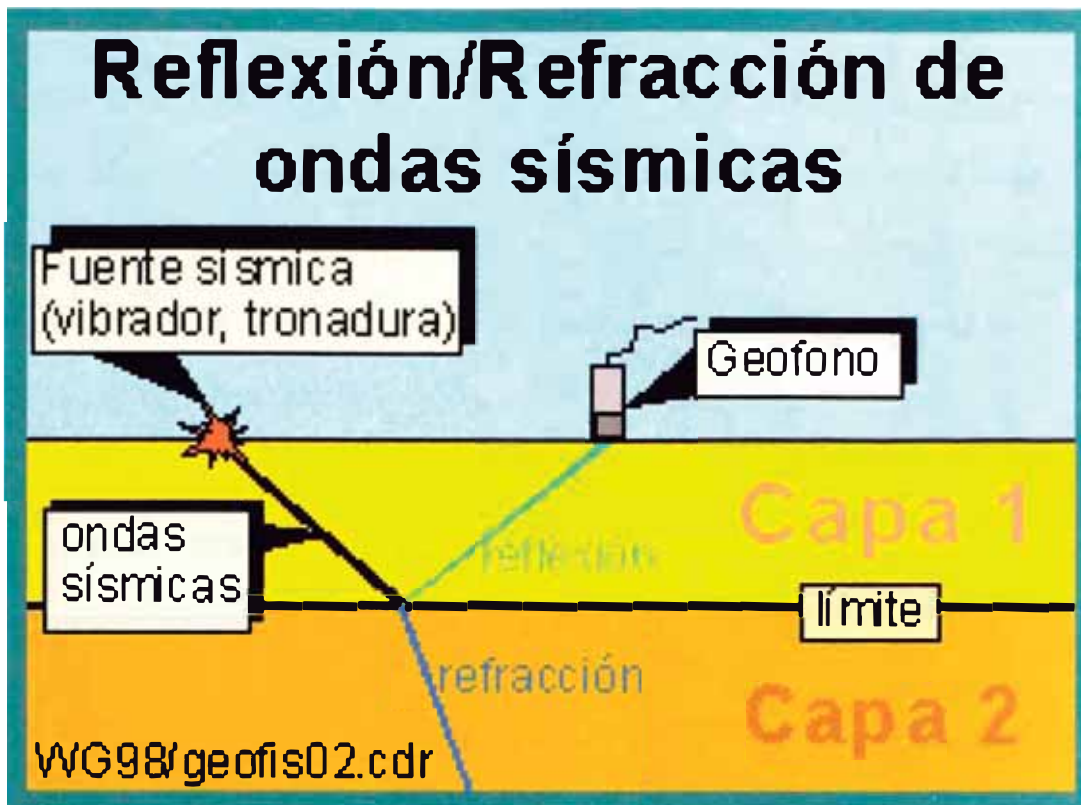


FIG. 2: Método de Investigación Sísmica.

El **perfilado sísmico de reflexión**, desarrollado en la década de 1940 para la exploración petrolera, ha sido utilizado en los últimos años en investigación básica. En la actualidad hay programas destinados a descifrar la estructura de la corteza continental oculta que han usado esta técnica para sondear rocas a decenas de kilómetros de profundidad; con ellos se resuelven muchos de los enigmas sobre el origen y la historia de determinados puntos de la corteza terrestre.

La **investigación sismológica** básica se concentra en la mejor comprensión del origen y propagación de los movimientos sísmicos y de la estructura interna de la Tierra. Según la teoría elástica del rebote, la tensión acumulada durante muchos años se libera de manera brusca en forma de vibraciones sísmicas intensas por movimientos de las fallas.

Los movimientos sísmicos, paradójicamente, poseen un aspecto positivo y éste es el de proporcionarnos información sobre el interior de nuestro planeta. De igual manera que un médico puede saber si existe fractura en los huesos de un accidentado, por medio de los rayos X, el sismólogo ha deducido la estructura terrestre por medio de las ondas sísmicas que viajan a través de ella, como los rayos X a través del cuerpo humano.

Al ocurrir un sismo, tres tipos básicos de ondas producen la sacudida que se siente y causa daños, sólo dos se propagan en todas direcciones en el interior de la Tierra; por ello se les denomina ondas internas.

Estos tres tipos de ondas básicas reciben las denominaciones de: **ondas compresionales** u **ondas P**; **ondas de corte** u **ondas S** y finalmente las **ondas superficiales**. Las más rápidas de éstas son las ondas compresionales u ondas P, mientras que las que se desplazan a menor velocidad son las ondas superficiales.

Debido a que las ondas internas P y S se desplazan a diferentes velocidades y son más rápidas frente a las ondas superficiales, es posible calcular, de una manera relativamente rápida y simple, la distancia donde se encuentra localizado el foco del movimiento sísmico.

Para ello se aplica la siguiente fórmula:

$$D = (V_p \times V_s \times \Delta t) / (V_p - V_s) \dots\dots(1)$$

Donde:

D = Distancia

V_p = Velocidad de la onda P

V_s = Velocidad de la onda S

Δt = Tiempo entre la llegada de la onda P y S.

Todo este conocimiento logrado gracias a la Geofísica y a la Sismología, se puede aprovechar para conocer el comportamiento de una pequeña parte de la superficie terrestre ante eventuales sollicitaciones sísmicas que puedan ocurrir, haciendo uso de los **métodos de prospección sísmica**.

Para conseguir este propósito, bastará con “**generar movimientos sísmicos artificiales**” en el suelo sometido a estudio, para en simultáneo, captar y registrar las ondas generadas como consecuencia de ello. Una vez captadas y registradas estas ondas, podrán ser estudiadas para conocer sus características, tales como la duración del movimiento, sus direcciones principales de desplazamiento, velocidades de propagación, etc

El conocimiento de las velocidades de propagación de las **ondas sísmicas compresionales P** (u ondas longitudinales) y de **corte S** (u ondas transversales), tal como se puede observar en la fórmula anterior (1), resulta de vital importancia en la simulación matemática de la respuesta dinámica del suelo.

Para registrar las ondas sísmicas se emplean principalmente sismógrafos y acelerógrafos.

El **sismógrafo** se caracteriza por su alta sensibilidad, pues tiene la capacidad de ampliar decenas o centenas de miles de veces la velocidad de movimiento del terreno, ya sea a causa de un sismo cercano muy pequeño o de uno grande y lejano. Los registros obtenidos mediante este tipo de instrumento reciben el nombre de sismogramas. (Fig. 3)

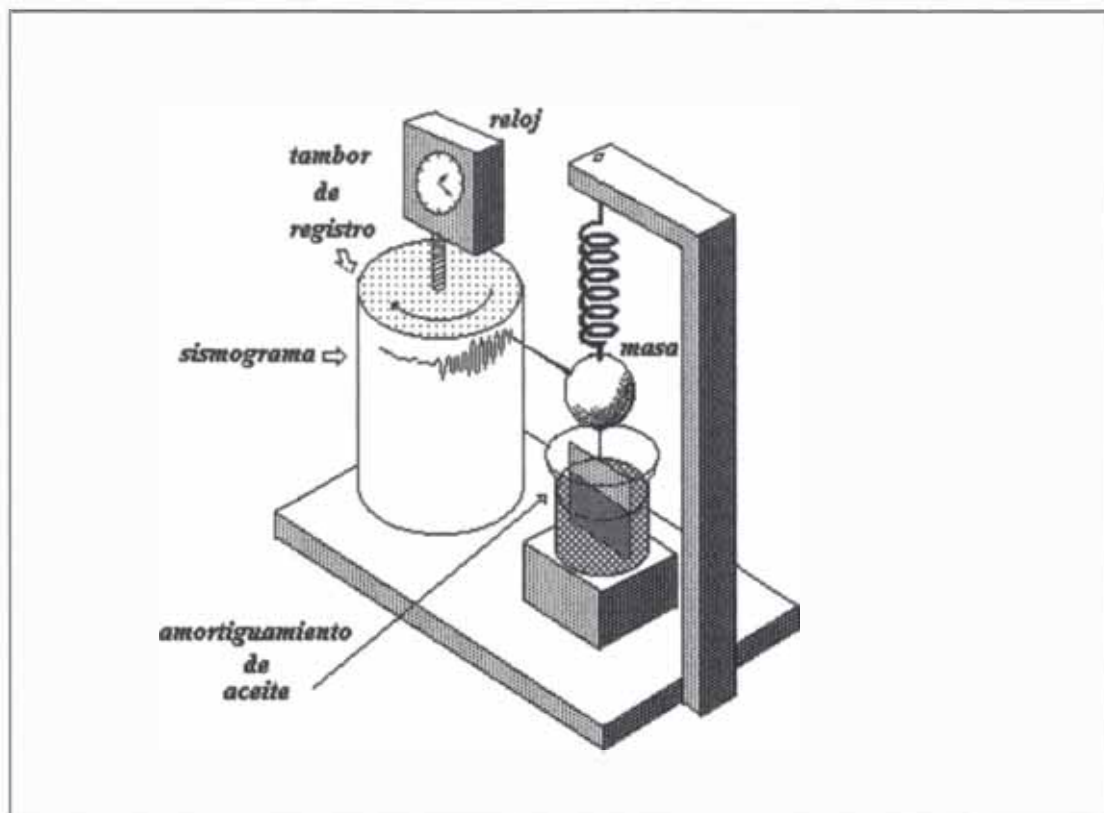


FIG. 3: Sismógrafo.

Sin embargo, cuando ocurre un sismo cercano muy fuerte, el sismógrafo no es capaz de registrarlo íntegramente, pues por su gran sensibilidad produce un sismograma saturado.

A diferencia de los sismógrafos, independientemente de la magnitud del sismo, una característica de los acelerógrafos es la de registrar la aceleración del terreno. Generalmente son capaces de graficar aceleraciones mayores que la gravedad terrestre; por ello los acelerogramas obtenidos nunca están saturados.

Existen diversas modalidades de registro: tiras de papel, cintas magnéticas (analógicas y digitales) y película. Algunos de estos registros o sismogramas típicos se muestran en las figuras 4, 5 y 6.

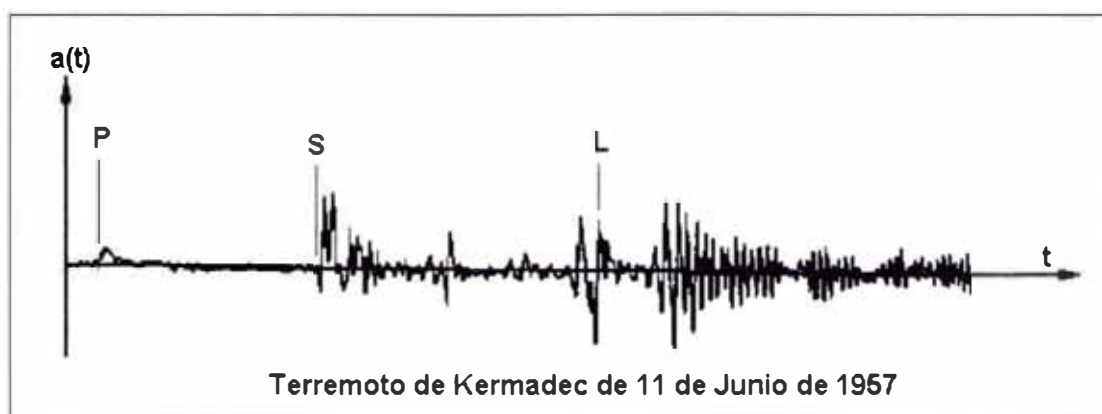


FIG. 4: Sismograma.

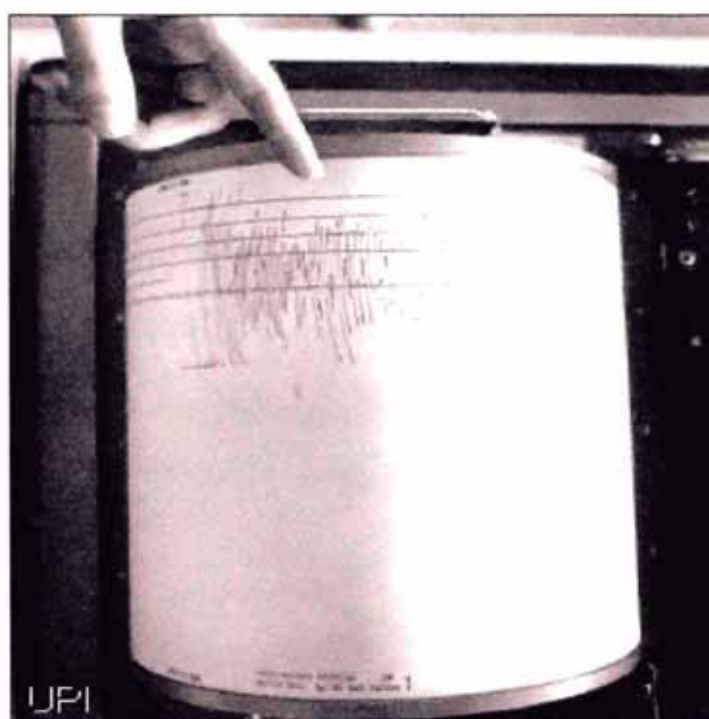


FIG. 5: Sismograma.

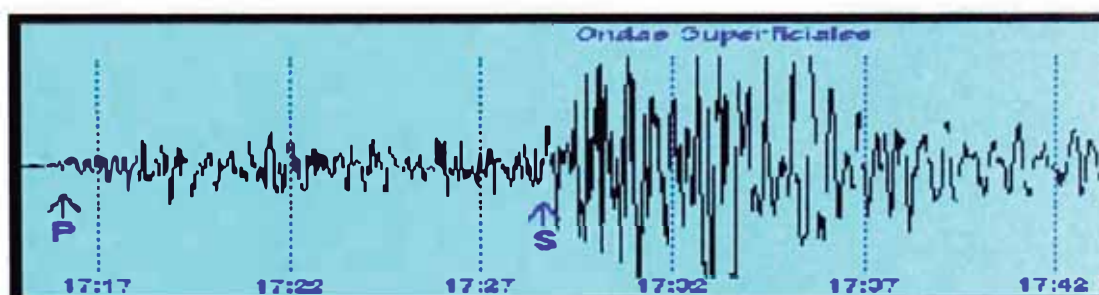


FIG. 6: Sismograma.

1.2 Objetivo del Estudio

El objetivo principal de los trabajos de Geofísica de Prospección realizados, fue el determinar las propiedades físicas, en el rango elástico, del material del suelo - subsuelo en 8 (ocho) pozos perforados en el Área Industrial del Complejo Bayóvar. Esto permitió conocer los estratos ubicados en el área de estudio. (Fig. 7)

Para el logro de este objetivo, se emplearon métodos de Prospección Sísmica (métodos de exploración indirecta del subsuelo) que posibilitaron la obtención de perfiles sísmicos en las zonas de los pozos perforados.

Las propiedades que se determinaron en los pozos perforados comprendieron: velocidades de propagación de las ondas sísmicas de corte S y de compresión P, módulo de corte y razón de Poisson.

Toda esta información obtenida se destinó luego para los estudios de las “Propiedades Dinámicas de Suelos” y “Simulación Matemática de la Respuesta Dinámica de Suelos” del área de Bayóvar y de las áreas vecinas.



FIG. 7: Ubicación del área de estudio en el departamento de Piura. El Área Industrial de Bayóvar se encuentra representada con la zona sombreada

CAPÍTULO II ONDAS SÍSMICAS

Al romper un objeto (supongamos una regla de plástico) se produce un chasquido u ondas sonoras que se desplazan por el aire. De igual forma cuando arrojamus una piedra a un estanque también se producen unas ondas (en este caso pequeñas olas) que se propagan desde donde cayó la piedra hacia las orillas del estanque.

Algo similar ocurre con los movimientos sísmicos: al romperse la roca se generan ondas que se propagan a través de la Tierra, tanto en su interior como por su superficie. (Fig. 8)

Estas ondas son de tres tipos básicos:

- **Ondas de compresión**, también llamadas ondas longitudinales, ondas primarias u ondas P.
- **Ondas de corte**, también llamadas ondas transversales, ondas secundarias u ondas S.
- **Ondas superficiales**, que comprenden a dos tipos: las ondas Rayleigh y las ondas Love.

Los dos primeros tipos de ondas (onda de compresión y onda de corte) son las

que penetran en el interior de la tierra, por lo que también reciben el nombre de *ondas interiores*.

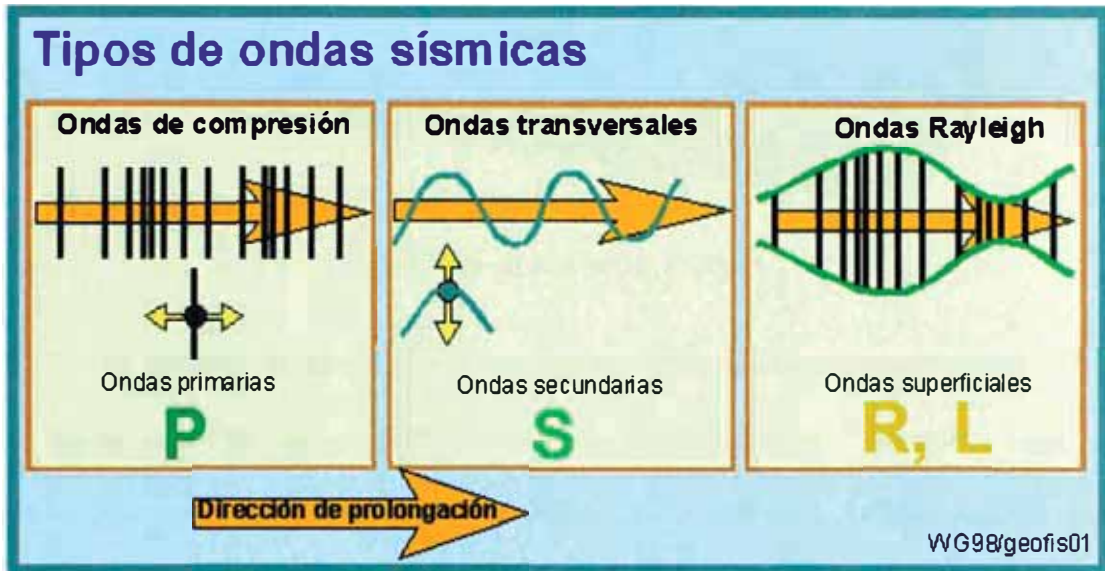


FIG. 8: Tipos de ondas sísmicas.

2.1 Ondas de Compresión (Ondas P)

La característica principal de esta onda es que alternadamente comprime y expande la roca en la misma dirección de su trayectoria. Es capaz de propagarse a través de cualquier medio, ya sea sólido (roca), líquido (océano y magma) o gas (atmósfera).

En ocasiones, personas y animales la perciben como un sonido grave profundo. Esta onda es análoga a la onda sonora y recibe también el nombre de **onda longitudinal**. (Fig. 9)

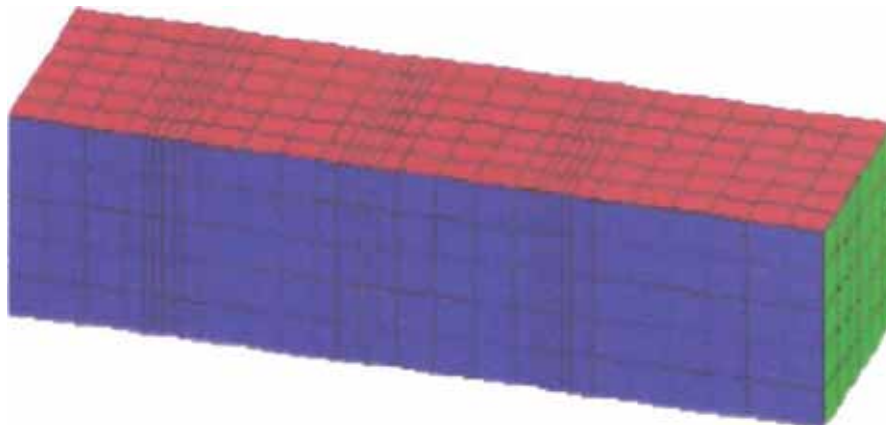


FIG. 9: Onda de Compresión (Onda P).

La onda de compresión es la más rápida de los dos tipos de ondas interiores y se llama por lo tanto la *primera trepidación preliminar P*, ya que ambos tipos de ondas interiores se registran mucho antes de cualquiera de las ondas superficiales antes mencionadas.

En la región del epicentro, las ondas P tienen períodos menores a un segundo, habiendo ondas de períodos de más o menos un segundo que se transmiten a gran distancia y aún hasta las antípodas. Las amplitudes pueden disminuir tanto, que sólo son captadas por sismógrafos de alta amplificación y características de funcionamiento que permitan la inscripción de períodos cortos. Los sismógrafos estándar sólo inscriben estas ondas en la región del epicentro; aumentando la distancia inscriben claramente los períodos de hasta cinco segundos. Más allá del área del epicentro, las ondas de período corto son de desplazamiento pequeño, siendo superpuestas sobre ondas de período más largo de mayor desplazamiento.

Los sismógrafos llamados péndulos de período corto son los que mejor registran la parte de períodos cortos del tren de ondas de compresión. Los péndulos de período medio o largo (6 segundos y más) registran mejor los períodos largos.

En los temblores, tanto de foco poco profundo, como también profundo, las ondas de compresión (longitudinales), inscritas por sismógrafos de período corto, tienen siempre amplitudes más grandes en el registro. Sin embargo, en un sismógrafo estándar de período largo, estas mismas ondas aparecen, en el caso de temblores de foco poco profundo (profundidad normal) con amplitudes menores que aquellas de cualquier otro tipo de onda.

Si un temblor de foco muy profundo, es inscrito en un sismógrafo de período largo, las ondas superficiales llegan a tener amplitudes tan pequeñas, tanto en el terreno como en el registro, que las ondas P y S dominan en el sismograma.

En profundidades comprendidas entre estos dos extremos se encuentra que en el registro hecho por un sismógrafo de período largo, las inscripciones varían gradualmente de un extremo a otro.

2.2 Ondas de Corte (Ondas S)

La segunda onda interior, llamada secundaria, de cizalla, transversal, de corte u onda S, viaja a menor velocidad que la onda P.

Las ondas de corte (transversales) se trasladan con una velocidad de más o menos 0.6 veces la velocidad de las ondas longitudinales y aparecen como el segundo grupo más conspicuo de ondas en un registro normal (foco poco profundo) de un sismógrafo estándar de período largo. Por esto se llaman *segunda trepidación preliminar, S*.

Esta onda es análoga a la luminosa o a la vibración transversal de una cuerda. Mientras se propaga, deforma el material lateralmente respecto de su trayectoria. La partícula de tierra se mueve siempre en dirección normal o transversal a la dirección

en que avanza la onda. Por esta razón no se transmite en fluidos (líquidos y gases).

(Fig. 10)

Las ondas S pasan a través del globo terrestre por caminos muy parecidos a los de las ondas P, sólo que hasta ahora no se dispone de una demostración definitiva de su penetración en el núcleo de la Tierra. Esto permite suponer que parte del núcleo es un líquido, pero es posible que otros tipos de fenómenos expliquen por qué la onda S no penetra en el núcleo.

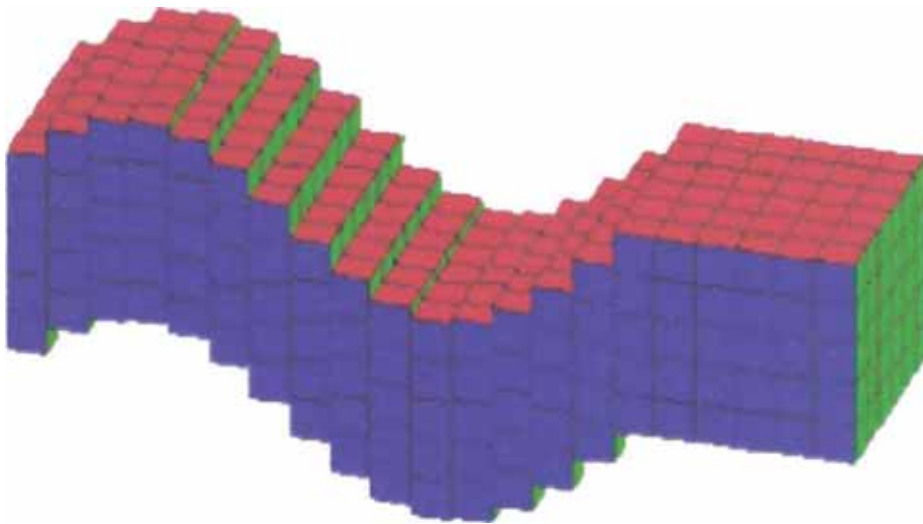


FIG. 10: Onda de Corte (Onda S).

Cuando ocurre un movimiento sísmico, primero se siente la onda P, con un efecto de retumbo que hace vibrar paredes y ventanas. Unos segundos después llega la onda S, con un movimiento vertical de arriba hacia abajo -y viceversa- y de lado a lado, que vertical y horizontalmente sacude la superficie del terreno. En zonas cercanas al epicentro, éste es el movimiento responsable del daño a las construcciones.

Con respecto al movimiento efectivo del terreno se puede suponer, que los períodos de las ondas S, son a grosso modo, alrededor del doble de las ondas P,

relación que también puede aceptarse para las amplitudes.

En las inscripciones de los sismógrafos estándar de período largo, esta apreciación también se aplica a las amplitudes de las inscripciones, recordando que esta comparación sólo vale para las ondas P de período largo y no para las de período corto. Como el grupo de ondas S representa una energía mayor, en muchas inscripciones de temblores pequeños, aparecen en forma clara pero débil, faltando totalmente las ondas P.

En las inscripciones de sismógrafos de período corto, que inscriben las ondas P de período corto tan perfectamente, la onda S podrá distinguirse apenas o estar ausente totalmente, sin embargo se recomienda, cualquiera que sea la profundidad del foco, buscar alguna onda S en el sismograma en que las ondas de período largo superficiales sean perceptibles.

2.3 Ondas Superficiales

El tercer tipo de ondas sísmicas es el de las llamadas ondas superficiales, cuya característica es la propagarse por la parte más superficial de la corteza terrestre, a medida que la profundidad aumenta disminuye la amplitud de su movimiento. Las ondas superficiales viajan más despacio que las ondas internas P y S.

Estas ondas representan la mayor cantidad de energía inscrita en el sismograma de un instrumento de período largo, tanto en los terremotos poco profundos como también en aquellos ocurridos a profundidades medias. Esto se evidencia por la gran amplitud registrada en miles de sismogramas; sin embargo, en los temblores extraordinariamente profundos, la energía que entra en las capas de la

corteza terrestre es tan reducida, que las ondas pueden faltar completamente en la inscripción. No obstante, esto pasa tan raras veces que al sismólogo no le llama la atención a no ser que obtenga una o varias inscripciones en que no resulte otra interpretación.

Dentro de este tipo de ondas se pueden diferenciar dos modalidades, denominadas ondas Rayleigh y ondas Love en honor a los científicos que demostraron teóricamente su existencia.

Cuando un sólido posee una superficie libre, como la superficie de la tierra, pueden generarse ondas que viajan a lo largo de la superficie. Estas ondas tienen su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad, y son conocidas como ondas Rayleigh. (Fig. 11)

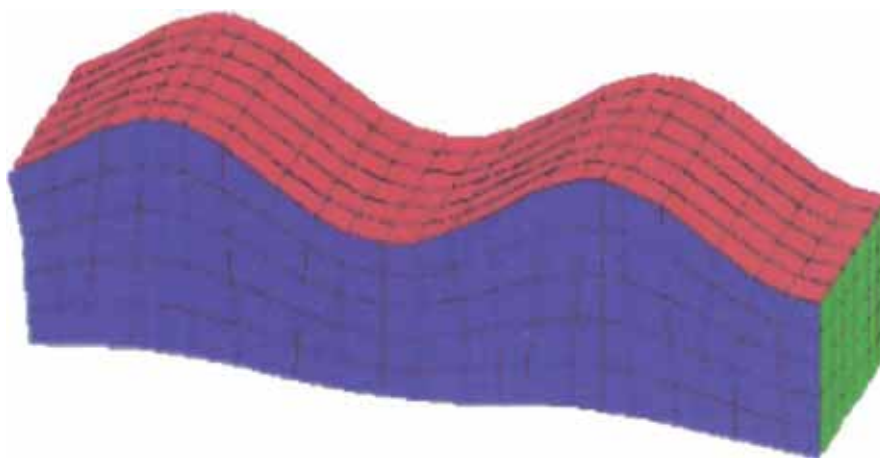


FIG. 11: Onda Superficial RAYLEIGH.

Las **Ondas Rayleigh** causan un movimiento rodante parecido a las ondas del mar y sus partículas se mueven en forma elipsoidal en el plano vertical que pasa por la dirección de propagación. En la superficie, el movimiento de las partículas es retrógrado con respecto al avance de las ondas, no existiendo ningún movimiento transversal a la dirección de la propagación. (Fig. 12)

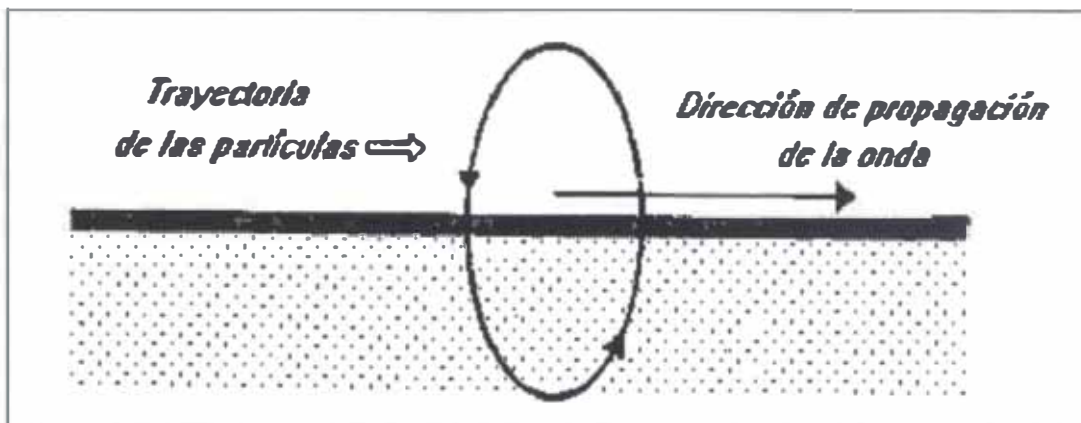


FIG. 12: Trayectoria de las partículas causada por la Onda Superficial RAYLEIGH.

La onda Rayleigh llega algo después de la onda transversal Love, siendo su velocidad más o menos 0.92 veces la velocidad de esta última.

En la mayoría de los registros de los sismos normales, captados por sismógrafos estándar, la onda Rayleigh generalmente es la onda superficial de mayor amplitud. Esto no significa necesariamente que represente el mayor desplazamiento del suelo, ya que puede ir acompañado por la onda transversal Love.

En distancias epicentrales cortas, las verdaderas ondas Rayleigh prácticamente están oscurecidas, en todos los registros sismográficos, por las ondas S, de la misma manera que las ondas Love.

Las **Ondas Love** -en honor al físico que desarrolló el concepto teórico (esta onda es también llamada Onda G, por el sismólogo B. Gutenberg, quien descubrió y estudió su presencia en los sismogramas)-, se originan en la interfase de dos medios con propiedades mecánicas diferentes (cuando el medio elástico se encuentra estratificado). (Fig. 13)

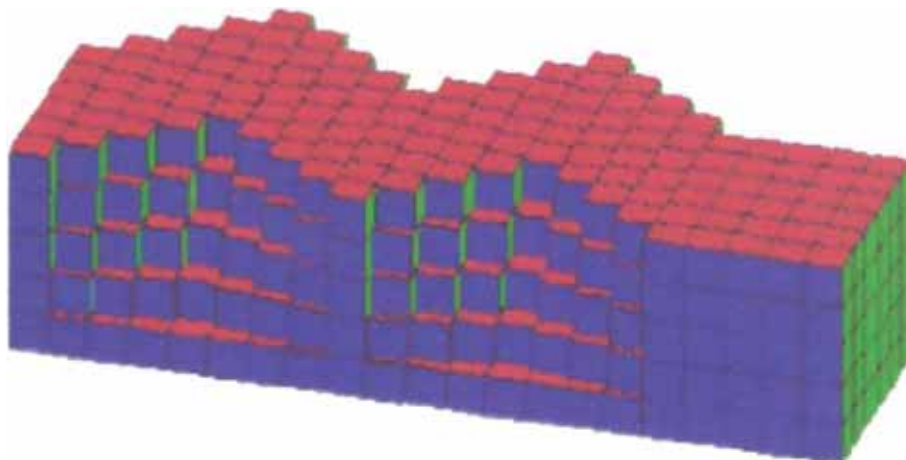


FIG. 13: Onda Superficial LOVE.

El movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación, similar a las ondas S, pero solo oscilan en el plano horizontal (en la superficie terrestre), no tiene componente vertical. (Fig. 14)

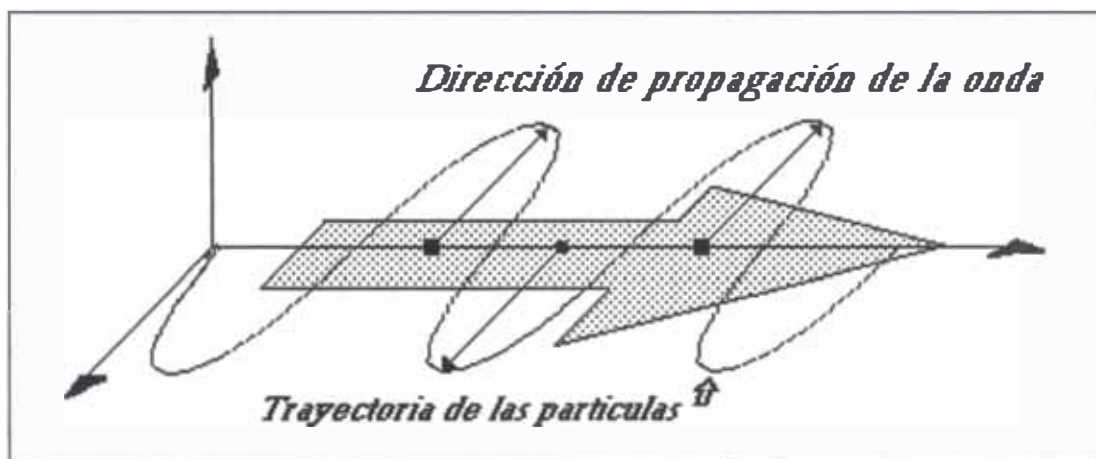


FIG. 14: Trayectoria de las partículas causada por la Onda Superficial LOVE.

La longitud de onda a distancias epicentrales grandes, depende del espesor de la capa que atraviesa y ha sido utilizada, por los investigadores, para determinar el espesor de la corteza. Su comienzo, para grandes distancias epicentrales, se marca generalmente por la emergencia de una onda de poca amplitud de alrededor de 30

segundos de período o más (registrándose, en temblores fuertes, ondas con un período de 2 a 3 minutos), con ondas sucesivas del grupo, que decrecen en período y crecen en amplitud. Si los péndulos del sismógrafo se encuentran orientados de tal manera que inscriban el grupo entero de ondas en una sola componente, las características de este grupo completo sirven para su estudio, pero por lo general, si la orientación del péndulo es inadecuada, su continuidad sufre perturbaciones por la llegada del segundo tipo de ondas superficiales, la onda Rayleigh.

La velocidad de la onda Love, 4.5 km/seg., es la misma de las ondas de corte S, si se propagan a distancias cortas del epicentro.

Existe una variación apreciable en la velocidad de la onda transversal superficial, según el camino que recorre. En distancias epicentrales cortas es muy difícil distinguir verdaderas ondas superficiales porque las ondas de período más corto y de gran amplitud, asociadas principalmente a grupos de ondas S, las oscurecen; sin embargo podrían ser verdaderas ondas superficiales que se han propagado por capas sedimentadas.

De los tres tipos de ondas elementales descritos anteriormente, sólo las ondas interiores P y S generan otros tipos de ondas o combinaciones de ellas, debido a que, mientras se desplazan, encuentran planos reflectantes no sólo en la superficie de la tierra sino también en discontinuidades interiores o interfases. (Fig. 15)

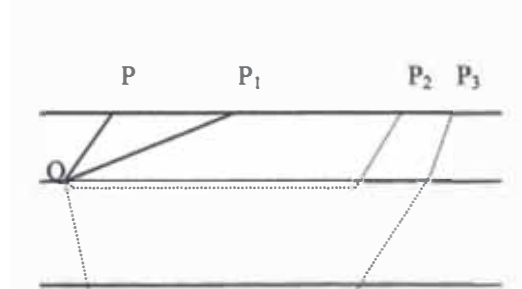


FIG. 15: Caminos recorridos por las ondas al atravesar diversas capas.

Si una onda llega a la superficie de discontinuidad bajo cierto ángulo crítico, puede propagarse horizontalmente en las capas inferiores y ser refractada hacia la superficie de la Tierra donde se inscribirá en el sismógrafo. En esta forma, si una onda llega a una capa intermedia, es posible que emerjan otros grupos de ondas diferentes o fases, como las ondas reflejadas y refractadas. La magnitud depende de la distribución de la energía en estas nuevas ondas. La distribución de la energía en estas nuevas ondas es un fenómeno complejo, siendo función del ángulo de incidencia de la onda en la superficie de separación y de las constantes físicas de los medios o interfases y debajo de la superficie de discontinuidad. La presencia de estas ondas complica y dificulta la interpretación de un sismograma, pero afortunadamente, los tipos de ondas elementales más importantes dominan, por regla general, en la inscripción.

El carácter de las capas superficiales juega un rol importante en distancias epicentrales cortas. Tanto el espesor de estas capas superficiales como también sus velocidades superficiales varían en las diferentes partes de la Tierra. Por este motivo, *al efectuar un estudio sismográfico intensivo de un área local, es necesario determinar previamente las velocidades locales obtenidas de los sismogramas.*

CAPÍTULO III ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Generalidades

Los estudios de Geofísica de Prospección se realizaron en el Área de Bayóvar y comprendieron observaciones en ocho (8) pozos y cuatro (4) perfiles ortogonales de 200 m en cada pozo.

En la Fig. 16 se muestra la ubicación general de los pozos (P-1 al P-8) y de los perfiles ortogonales.

3.2 Descripción del Área de Estudio

Con excepción de las áreas bajas en el sector de Punta Lagunas y los bordes costeros al pie de los acantilados constituidos por playas y marismas, el “Área Industrial del Complejo Bayóvar” se extiende sobre una semiplanicie de depósitos aluviales que comprende desde el pie de los cerros Illescas hasta cerca de los acantilados que bordean las playas en el área de Bayóvar.

La semiplanicie tiene una suave pendiente hacia el mar, variando desde unos 40 – 50 m.s.n.m. hasta alrededor de 6 m.s.n.m. en la repisa de los acantilados.

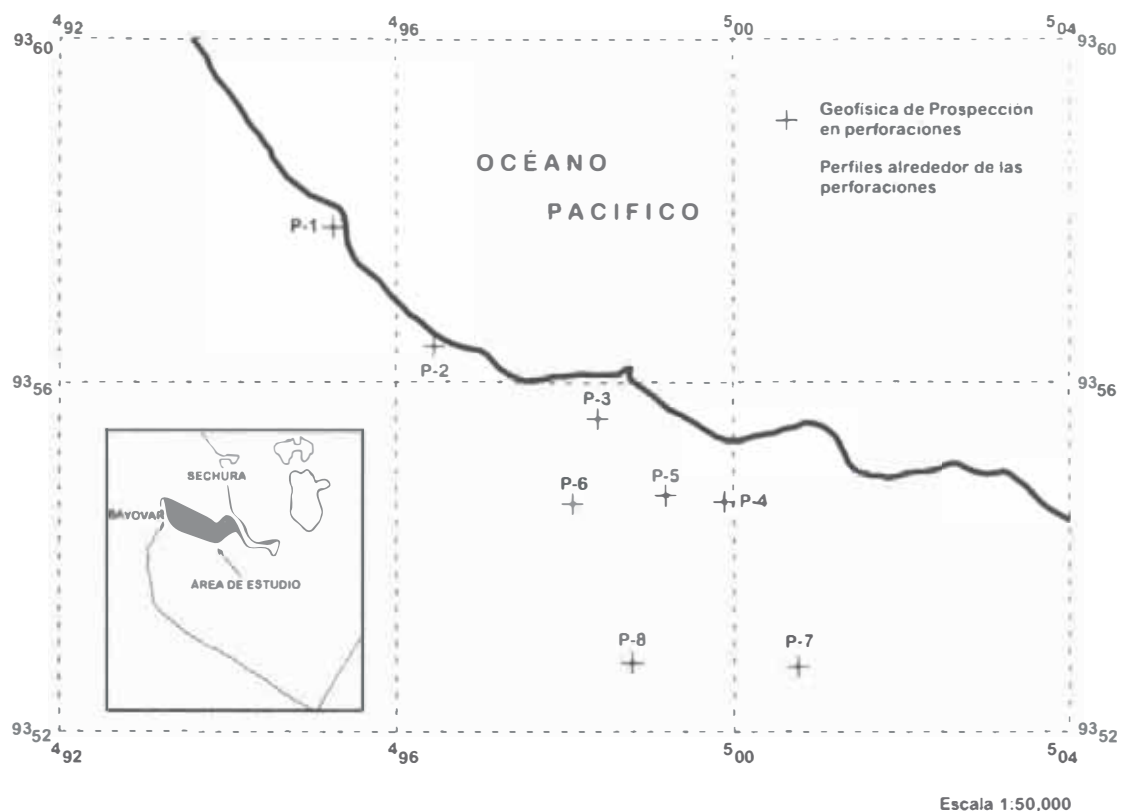


FIG. 16: Ubicación general de los ocho pozos y de sus respectivos perfiles de refracción sísmica en el Área Industrial de Bayóvar.

La superficie aluvial está disecada por quebradas de corto recorrido y de fondo plano que descienden de los cerros Illescas. Estas quebradas representan antiguos cursos de torrentes que, en su mayoría, están orientados aproximadamente en dirección Suroeste (SW) – Noreste (NE).

Las quebradas más importantes son: la quebrada Tijeras, con desembocadura en el sector de Bayóvar y la de Tric - Trac con desembocadura al este de la Punta del mismo nombre. El lecho, que estas quebradas atraviesan, es de material aluvial reciente de clastos del macizo Illescas.

Existe otra quebrada, con desembocadura al este de la Punta Lambayeque, de extensión longitudinal similar a las anteriores (aproximadamente unos 3 a 4 km). Mientras la quebrada Tijeras en su recorrido se encuentra limitada por el material

aluvial más antiguo, las otras dos quebradas disectan la terraza “Tablazo Lobitos”.

A lo largo de la costa, desde la quebrada Tijeras y desde el borde del acantilado hasta las proximidades de la carretera Bayóvar – Cruce, existe una superficie llana de depósitos semiconsolidados, adosados al material aluvial. Son materiales de origen marino que conforman una terraza sobre la cual se han levantado campamentos y el aeropuerto de Tric – Trac.

La parte expuesta del tablazo, en el área del futuro Complejo Industrial, es bastante llana, en oposición a los depósitos aluviales que presentan desniveles a manera de ondulaciones. (Fig. 17)

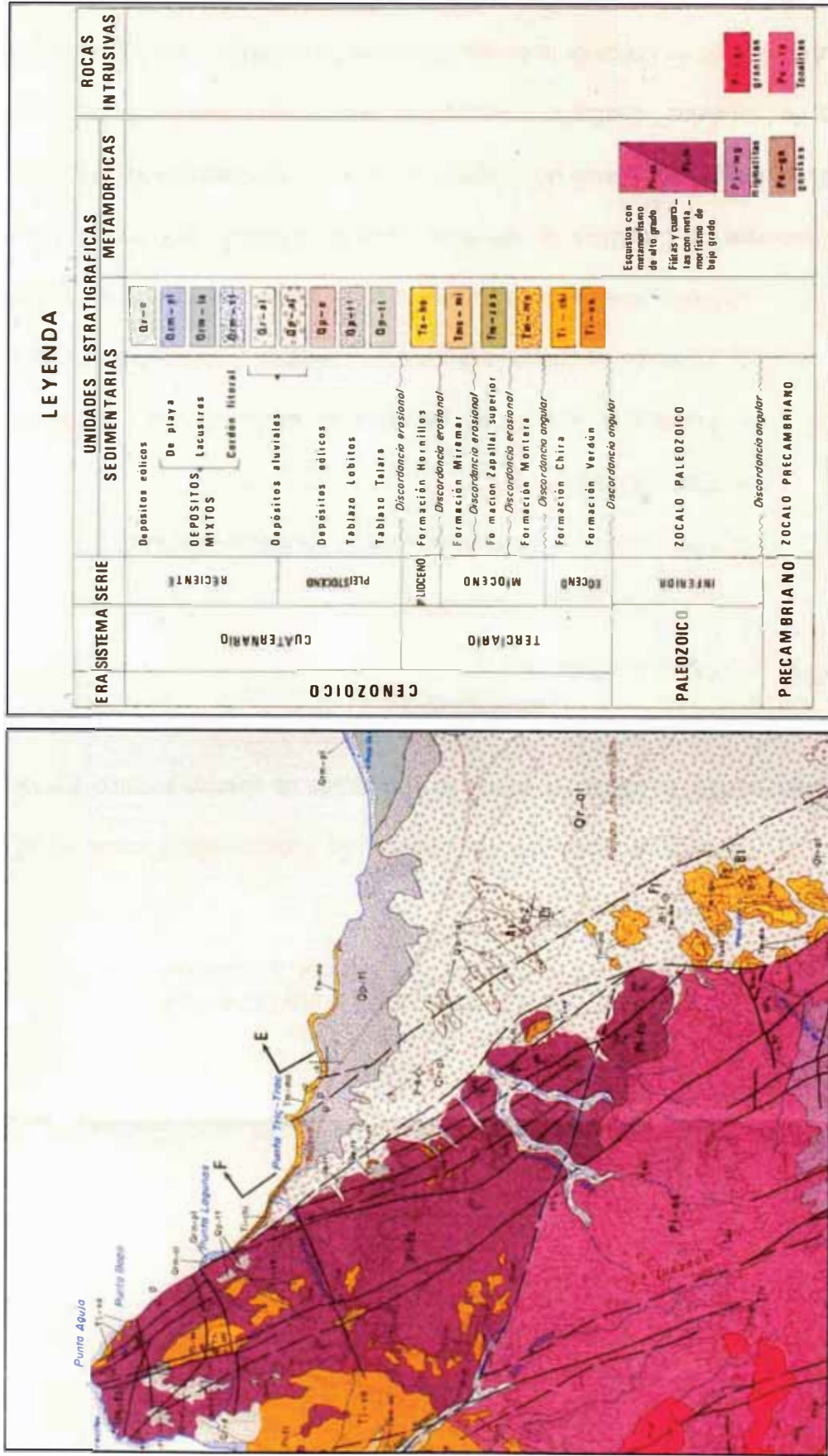


FIG. 17: Mapa Geológico del Área de Bayóvar.

CAPÍTULO IV DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PROSPECCIÓN SÍSMICA - DICGA

Cuando se realizaron los trabajos de Prospección Sísmica en el Área de Bayóvar (1979 -1980), no existía en el mercado un sistema sísmico que reuniera los requisitos necesarios para una:

- Operación automática,
- Ejecución masiva de observaciones,
- Obtención de una alta resolución de las señales sísmicas,
- Que sea modular, y
- Permita la adquisición de datos de ondas de corte por el método de inversión de dirección de fuente - inversión de polaridad de sensor.

Debido a todos estos inconvenientes señalados anteriormente, la Dirección de Investigación Científica de Geofísica Aplicada (DICGA) del Instituto Geofísico del Perú, integró un sistema de prospección sísmica con elementos de diferentes fábricas y de “módulos” diseñados y construidos por el Departamento de Instrumentación y Adquisición de Datos de la propia Dirección de Investigación Científica de Geofísica Aplicada (DICGA), al cual se le denominó: “Sistema de Prospección Sísmica - DICGA”.

Este Sistema de Prospección Sísmica comprende cuatro unidades básicas:

1: Fuentes de Energía Sísmica

2: Unidad de Detección

3: Unidad de Monitoreo y Almacenamiento

4: Unidad de Registro

La interrelación de cada una de estas unidades se muestra en el siguiente Diagrama de Bloques. (Fig. 18)

**UNIDAD DE MONITOREO Y
ALMACENAMIENTO**

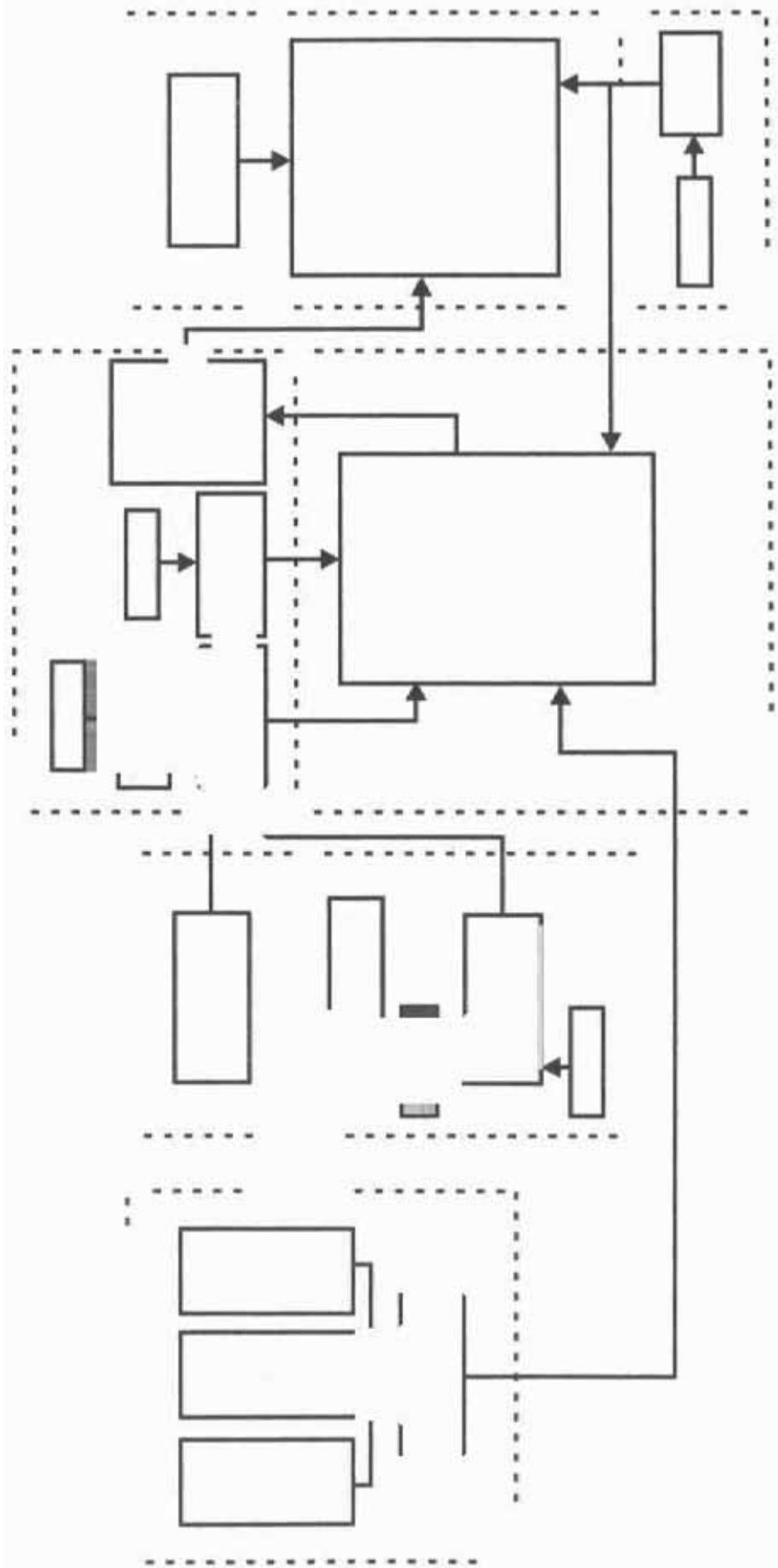


FIG. 18: Diagrama de Bloques del Sistema de Prospección Sísmica – DICGA.

4.1 Fuentes de Energía Sísmica

Las fuentes de energía sísmica tienen como principio general el impacto mecánico de una masa que se mueve a alta velocidad sobre una placa de acero. Se diseñaron y construyeron dos generadores de ondas de corte, un generador de ondas de compresión y se adaptó un martillo para generar señales de ondas de compresión de corto recorrido. (Fig. 19)



FIG. 19: Generador de Ondas de Compresión.

Tanto el martillo, indicado en la Fig. 19, como los generadores de ondas de compresión (Fig. 21) y de corte (Fig.22) cuentan con un “interruptor inercial” que permite el inicio del almacenamiento de las señales sísmicas desde el instante del impacto o disparo de la fuente sísmica. (Fig. 20)



FIG. 20: Interruptor Inercial.

4.1.1 Generador de Ondas de Corte (Generador Horizontal)

Se diseñaron dos generadores de ondas de corte, uno con un área de acoplamiento de 3.5 m x 0.40 m y otro con un área de 1.5 m x 0.40 m. Ambos usan el mismo sistema de transmisión de energía mecánica de suelo y eléctrica a la Unidad de Monitoreo y Almacenamiento de señales sísmicas. (Fig. 21)

Las partes principales del generador de ondas de corte que se diseñó son:

- 1) El “durmiente” o viga de madera acoplado al suelo
- 2) El eje de transmisión de impacto
- 3) El martillo de 50 Kg. y los resortes de activación
- 4) El sistema de carga y disparo, y
- 5) El sistema eléctrico de conexión a la Unidad de Monitoreo y Almacenamiento de señales sísmicas.

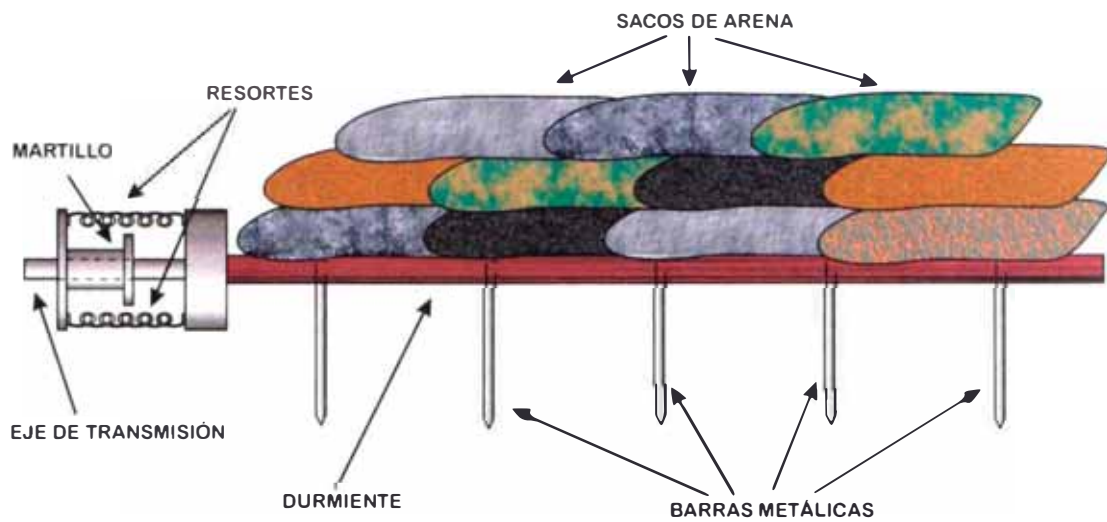


FIG. 21: Generador de Ondas de Corte.

El “**durmiente**” o viga es una madera de 3.5 m de longitud, 40 cm de ancho y 5 cm de espesor. El acoplamiento del “durmiente” con el suelo se consigue por medio de barras metálicas de longitud variable y una carga vertical (sacos de arena).

El **eje de transmisión** de energía mecánica es un tubo de acero que acopla el martillo al “durmiente” por medio de 2 bloques de madera encofrado en planchas de acero que están soldadas al tubo.

El **martillo** tiene un recorrido longitudinal libre de 45 cm. El generador es activado por la extensión de un número máximo de 6 resortes de acero que ejerce en total una fuerza de 50 Kg. cuando éstos son activados.

El sistema es reversible en cuanto a la dirección del impacto y la señal irradiada por el generador es reproducible.

4.1.2 *Generador de Ondas de Compresión (Generador Vertical)*

Se prepararon dos tipos de generadores de ondas de compresión los cuales comprenden el generador mecánico (Fig. 22) y un martillo (Fig. 19), ambos provistos de un interruptor inercial que se conecta a la Unidad de Monitoreo y

Almacenamiento de señales sísmicas.

El generador mecánico de ondas de compresión se basa en el impacto de una masa regulable (de acuerdo a las necesidades del nivel de señal) sobre una plancha de acero acoplada al suelo. Las partes principales son:

- 1) La placa de impacto acoplada al terreno
- 2) El eje de guía del martillo
- 3) El martillo y los resortes de activación
- 4) El sistema de carga y disparo, y
- 5) El sistema eléctrico de conexión a la Unidad de Monitoreo y Almacenamiento de señales sísmicas.

La **placa de impacto**, que se acopla al terreno, es una plancha de acero de 30 cm x 30 cm x 5 cm.

El **eje de guía del martillo** es un tubo de acero sólidamente unido a la placa de impacto.

El **martillo** está constituido por una “caja cilíndrica” formada por dos tubos de acero unidos por medio de una plancha de acero. El tubo interior de la “caja cilíndrica” se desliza por el tubo de guía del martillo y sirve además de eje a los discos que conforman la masa del martillo.

Este martillo es activado por la extensión de un máximo de 6 resortes de acero, los cuales ejercen una fuerza de 50 Kg. cuando éstos son activados. Estos resortes de tracción tienen un diámetro de 4” y un desplazamiento máximo de 45 cm. Están unidos en uno de sus extremos a la placa de impacto y en el otro al martillo.

El **sistema de carga y disparo** está formado por unos ganchos que sirven de “gatillos” y que sujetan al martillo cuando éste se encuentra activado. Estos gatillos

están montados sobre dos guías que también van unidas a la placa de impacto.

El **sistema eléctrico** de conexión al acondicionador de señales está constituido por un interruptor inercial (que se encuentra en la placa de impacto) y su respectivo conector de salida.

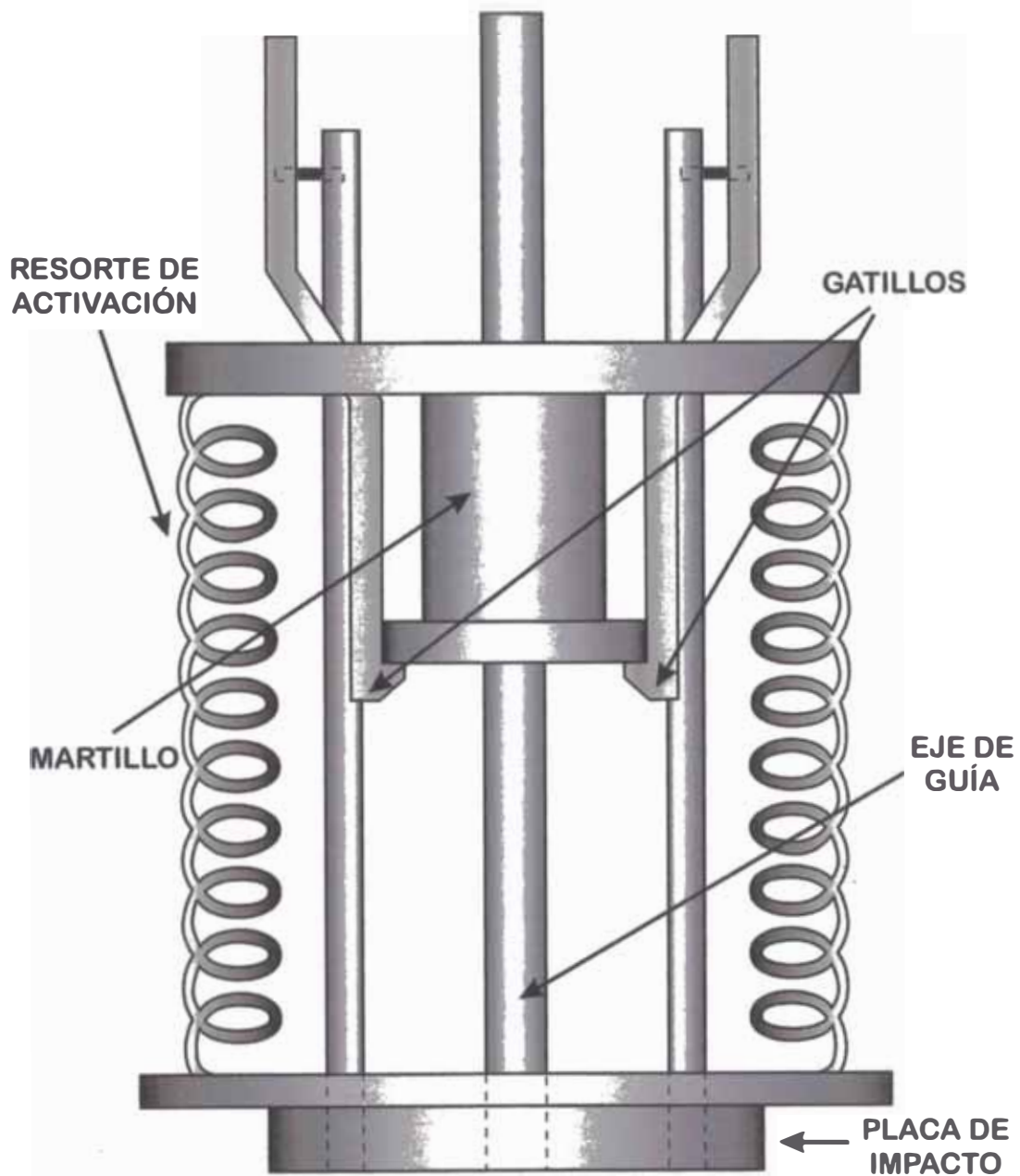


FIG. 22: Generador de Ondas de Compresión.

4.2 Unidad de Detección

La Unidad de Detección está constituida por:

- La *Sonda OYO*, que se emplaza en el pozo a diferentes profundidades, y
- Los *Geófonos de Superficie*.

El interconexión de las diferentes partes de esta unidad se indica en el siguiente Diagrama de Bloques. (Fig. 23)

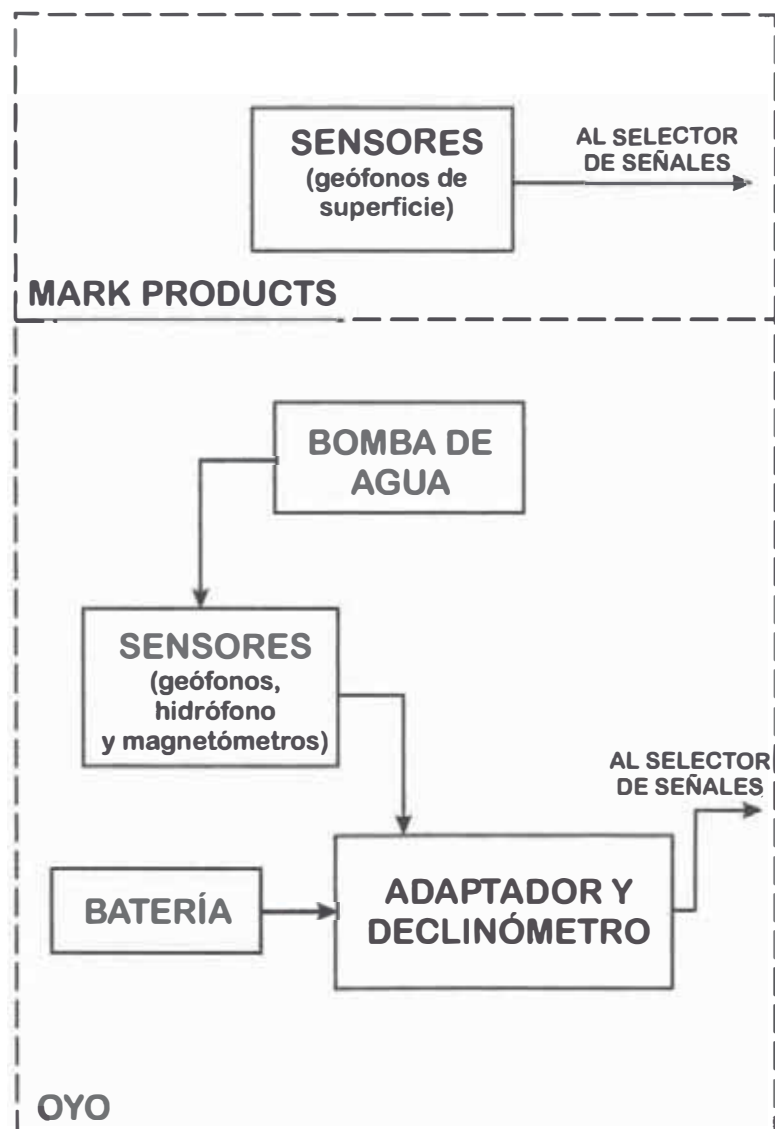


FIG. 23: Diagrama de Bloques de la Unidad de Detección.

4.2.1 *El Equipo OYO*

El sistema “Bore Hole Pick Up” (la Sonda OYO) es un instrumento que se usa para prospección geofísica.

Está compuesto de 3 unidades:

- 1) Sensores : “Bore Hole Pick” 3320
- 2) Adaptador : “Bore Hole Pick Adapter” 3350
- 3) Bomba de agua : “Pressure System” 3910

- 1) **SENSORES:** El sistema “Bore Hole Pick” consiste de una barra cilíndrica donde van montados los sensores, el cual se introduce en el pozo perforado para efectuar las mediciones respectivas; además contiene un tubo de jebe que sirve para su acoplamiento en las paredes del pozo. Los sensores instalados dentro de esta unidad son: 3 geófonos, 1 hidrófono y 2 magnetómetros.

- a) **Geófono:** Es un sensor que presenta en su salida un *voltaje proporcional a la velocidad del movimiento del terreno* donde se acopla. Se encuentran instalados 3 geófonos correspondientes a las componentes *radial, transversal y vertical*.

Las características de estos geófonos son:

- Frecuencia natural : 28 Hz.
- Sensibilidad : 1 mV/(cm/seg)
- Impedancia : 215 ohm

- b) **Hidrófono:** Es un sensor de forma cilíndrica que emplea el efecto piezo eléctrico. En presencia de agua el sensor proporciona un *voltaje que es proporcional a la variación de presión del agua*

ejercida sobre el hidrófono. Este sensor indica básicamente la presencia de agua en el pozo.

Sus características son:

- Sensibilidad : 30 mV/bar
- Impedancia : 300 ohm

c) **Magnetómetro:** Es el sensor utilizado como declinómetro y que *indica la dirección de los ejes de los geófonos*, con lo cual se puede conocer la dirección de éstos en el pozo perforado. Utiliza dos componentes dispuestos ortogonalmente.

Sus características son:

- Frecuencia estándar : 2 KHz
- Precisión : $\pm 2^\circ$

2) **ADAPTADOR:** Es un equipo usado para interconectar los sensores (geófonos e hidrófono) al acondicionador de señales y que incluye además el circuito del declinómetro.

3) **BOMBA DE AGUA:** Es parte básica del sistema de acoplamiento del “Bore Hole Pick Up” a las paredes del pozo, evitando así una posible resonancia. La bomba inyecta agua a un tubo de jebe, el cual al expandirse acopla la sonda a las paredes del pozo. La misma bomba sirve para extraer el agua.

Sus características son:

- Presión máxima que se puede inyectar : 2 Kg/cm²
- Diámetro máximo expandible : 70 mm

4.2.2 *Geófonos de Superficie*

Son los sensores que se usan para el estudio de Prospección Geofísica en superficie, marca Mark Products, modelo L-25D, son del tipo de bobina móvil. (Fig. 24)

Sus características son:

- Frecuencia natural : 14 Hz.
- Sensibilidad : 510 mV/(cm/seg)
- Impedancia DC : 1130 ohm
- Amortiguamiento : 0.6 del crítico

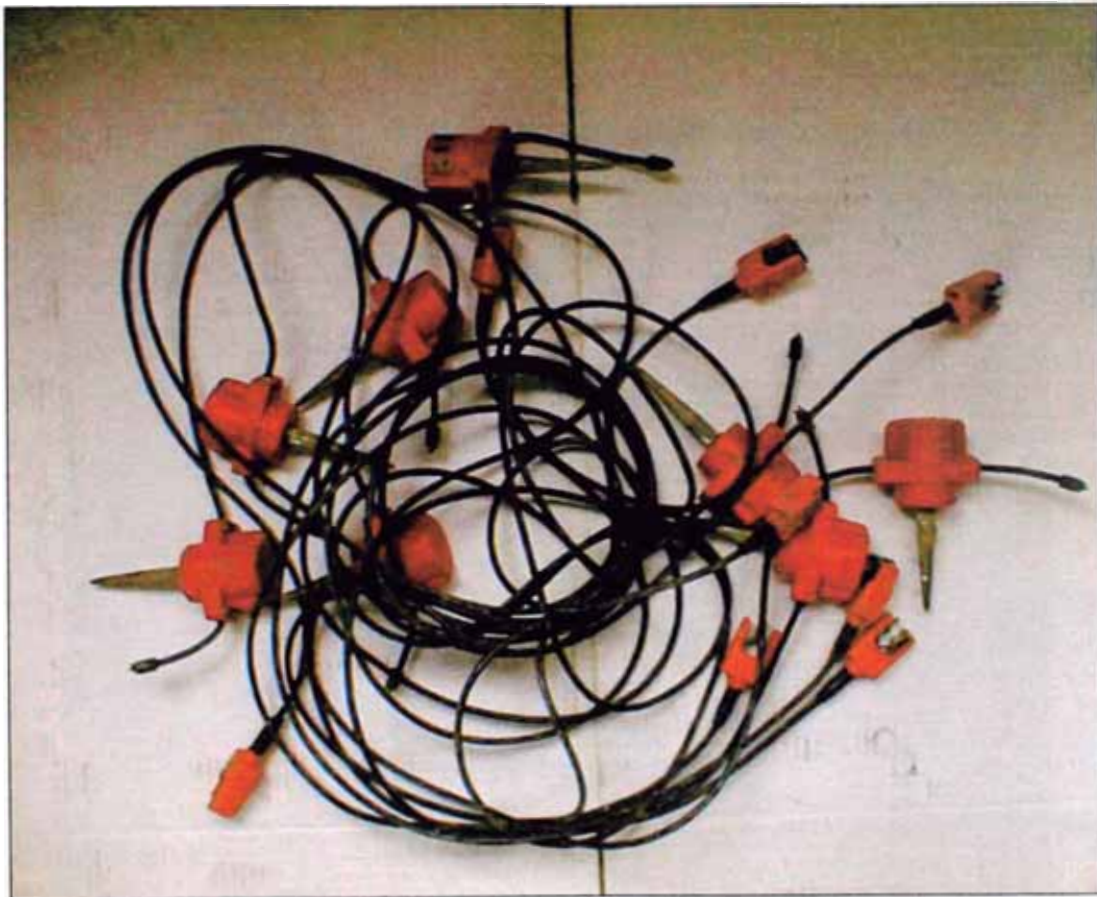


FIG. 24: Geófonos de Superficie.

4.3 Unidad de Monitoreo y Almacenamiento

Esta unidad ha sido construida en base al acondicionador de señales BISON. Las diferentes partes y su interconexión se presentan en el diagrama de bloques mostrado en la Fig. 18.

4.3.1 *Acondicionador de señales BISON*

El equipo BISON modelo 1580 (Fig. 25), es un acondicionador digital de 6 canales que registra, almacena y suma las señales sísmicas recibidas de 6 geófonos individuales, originadas por un impacto remoto. Estas señales son mostradas simultáneamente en una pantalla catódica.

El equipo cuenta con un control que permite ajustar el Tiempo de Barrido (Sweep Time), el cual varía en el rango de 10 a 500 mseg.

Está dotado además, de un visualizador digital que permite lecturas directas de los arribos de las ondas sísmicas en la pantalla a través de un Marcador de Posición (Marker Position). (Fig. 26)



FIG. 25: Acondicionador de Señales BISON.

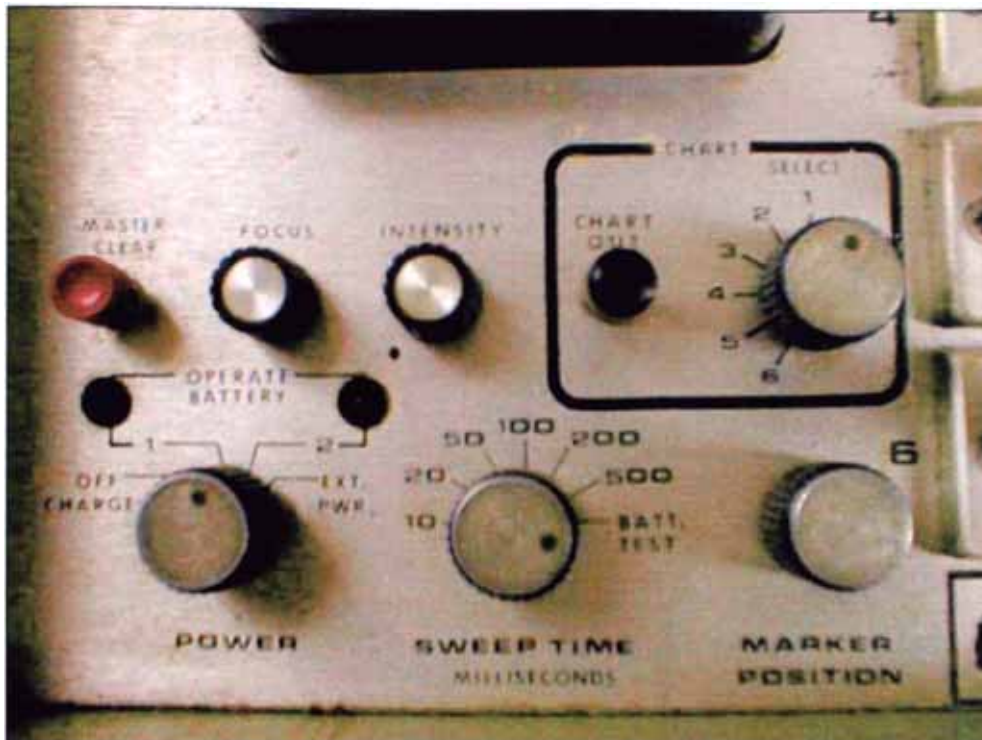


FIG. 26: Controles del Acondicionador BISON.

El equipo cuenta también con un dispositivo de retardo (Delay Time) que permite visualizar los arribos de las ondas sísmicas a pesar de que éstas lleguen con retraso a los geófonos. Para ello se calcula el tiempo de retardo o "delay" de la llegada de la onda al geófono, de manera tal que dicho valor sea tomado en cuenta en el Delay Time. (Fig. 27)

Como el tiempo que tarda en llegar la onda, desde el instante de disparo de la fuente sísmica hasta los geófonos, es un parámetro de relevancia en el cálculo de las velocidades de propagación de estas ondas sísmicas, este control resulta de vital importancia si se quiere visualizar y registrar las ondas que llegan a los geófonos que se encuentran ubicados lejos de las fuentes generadoras de señales sísmicas.



FIG. 27: Control Delay Time.

Cada canal del acondicionador BISON cuenta con su propio Delay Time, lo que permite individualizar los retardos. Así mismo, este circuito se encuentra incorporado dentro de cada una de las seis tarjetas de entrada (una para canal) con que cuenta este equipo.

Cada una de estas seis Tarjetas de Entrada incorpora los circuitos de Amplificación de señal, Delay Time y Memoria, que permiten acondicionar y “memorizar” cada señal por separado y ajustarla para obtener la mejor información de ella. (Fig. 28)

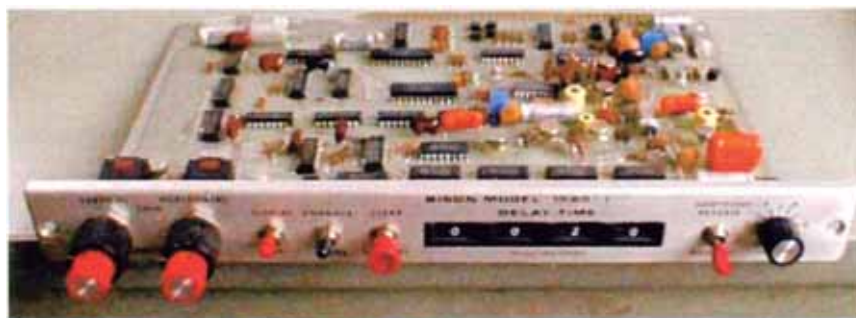


FIG. 28: Tarjeta de Entrada.

Una de las características del acondicionador de señales BISON es la de permitir acumular la señal que llega a un canal en particular, tantas veces como sea necesario.

En algunas circunstancias la señal que llega a los geófonos puede ser muy débil (sobre todo cuando se trata de geófonos ubicados muy lejos de la fuente sísmica), tanto que su visualización en pantalla y su posterior registro no permita rescatar información de ella. Ante esa situación es posible repetir el disparo del generador de ondas, permitiendo que la nueva señal generada se acumule sobre la anterior, obteniéndose de esta manera una amplitud mayor de la señal. (Fig. 29)



FIG. 29: Controles del Acumulador.

El equipo BISON fue modificado en el Laboratorio del IGP para obtener en forma simultánea las 6 salidas en analógico y puedan registrarse en forma permanente utilizando el registrador GULTON.

Especificaciones:

- Número de canales : 6 canales
- Tiempo de barrido : 10-20-50-100-200 y 500 mseg
- Tiempo de retardo : 1 mseg a 10,000 mseg
- Salida : tipo analógica, simultáneamente en 6 canales

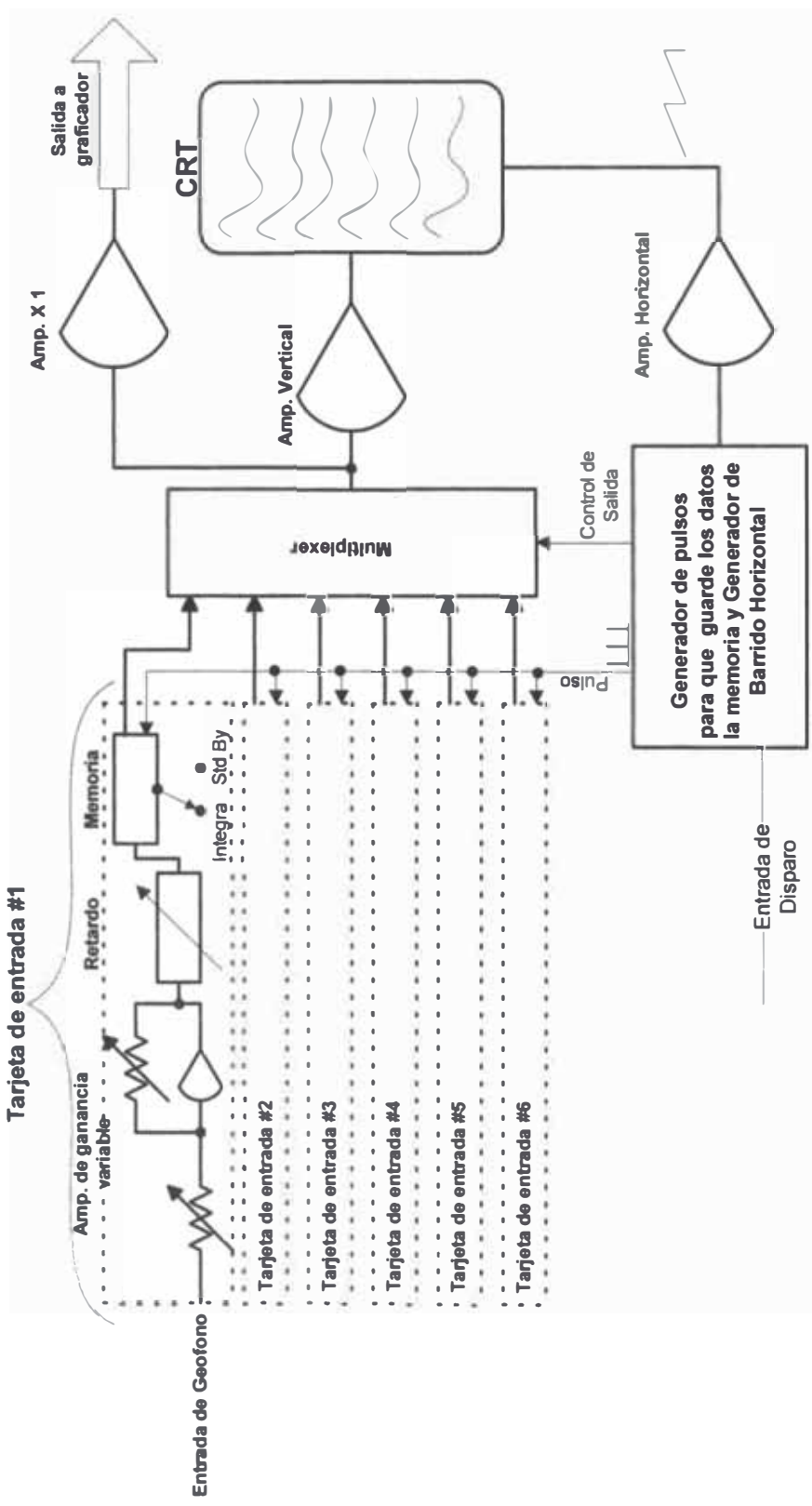


FIG. 30: Diagrama de Bloques del Acondicionador de Señales BISON

- Voltaje de trabajo : de 6 a 7 VDC
 - Longitud de memoria : 1024 bits
 - Muestreo de registro : 256 palabras
 - Muestreo de salida : 25 palabras por segundo en analógico y 8 bits en paralelo (digital)
- El bit menos significativo representa 12 mv referido a la salida analógica.



FIG. 31: Input / Output del Acondicionador BISON.

4.3.2 Convertidor DC/DC

Esta unidad, construida en el Laboratorio de Electrónica del IGP, permite reducir el voltaje de 12 (suministrado por una batería) a 7 voltios, para la operación correcta del equipo BISON. (Fig. 32)

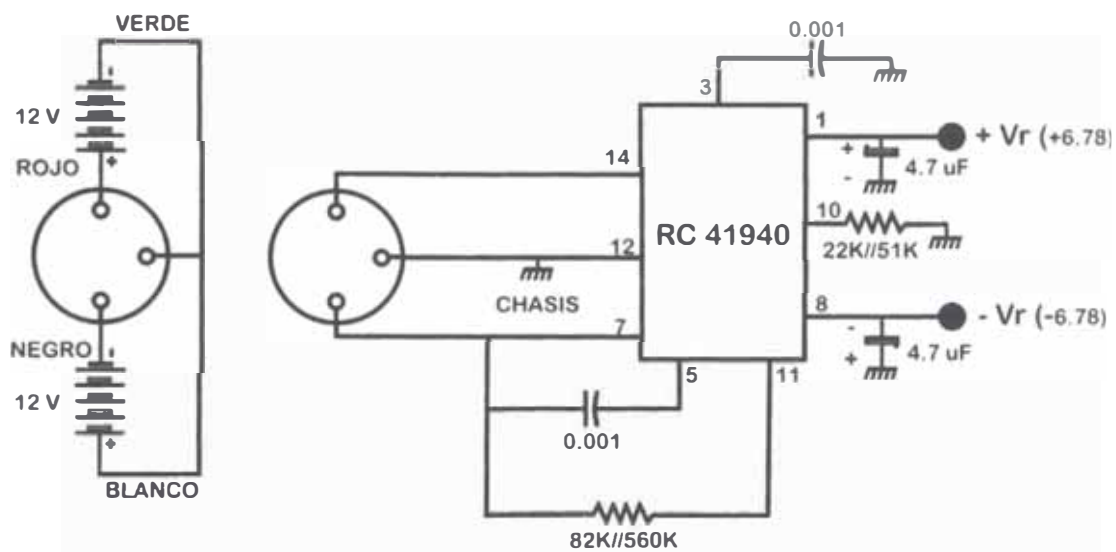


FIG. 32: Convertidor DC/DC.

4.3.3 Oscilador de Calibración

Esta unidad, también construida en el Laboratorio de Electrónica del IGP, proporciona señales sinusoidales de 20 Hz que permiten la calibración de todo el sistema electrónico. (Fig. 33)

Los voltajes de salida proporcionados son fijos y están dentro del rango de 0.1 mv a 2 v.

Posición	V_{RMS} (medido)	$V_{pp} = 2\sqrt{2}/V_{RMS}$
0.2	0.707	2
0.5	0.3465	0.9465
1.0	0.1755	0.4964
2.0	0.0700	0.1980
5.0	0.0346	0.0980
10	0.0174	0.0494
20	0.0071	0.0202
50	0.0033	0.0093
100	0.0017	0.0048
200	0.0007	0.0020
500	0.0003	0.0008
1000	0.0002	0.0006

TABLA 4.1: Voltajes de Salida del Oscilador de Calibración

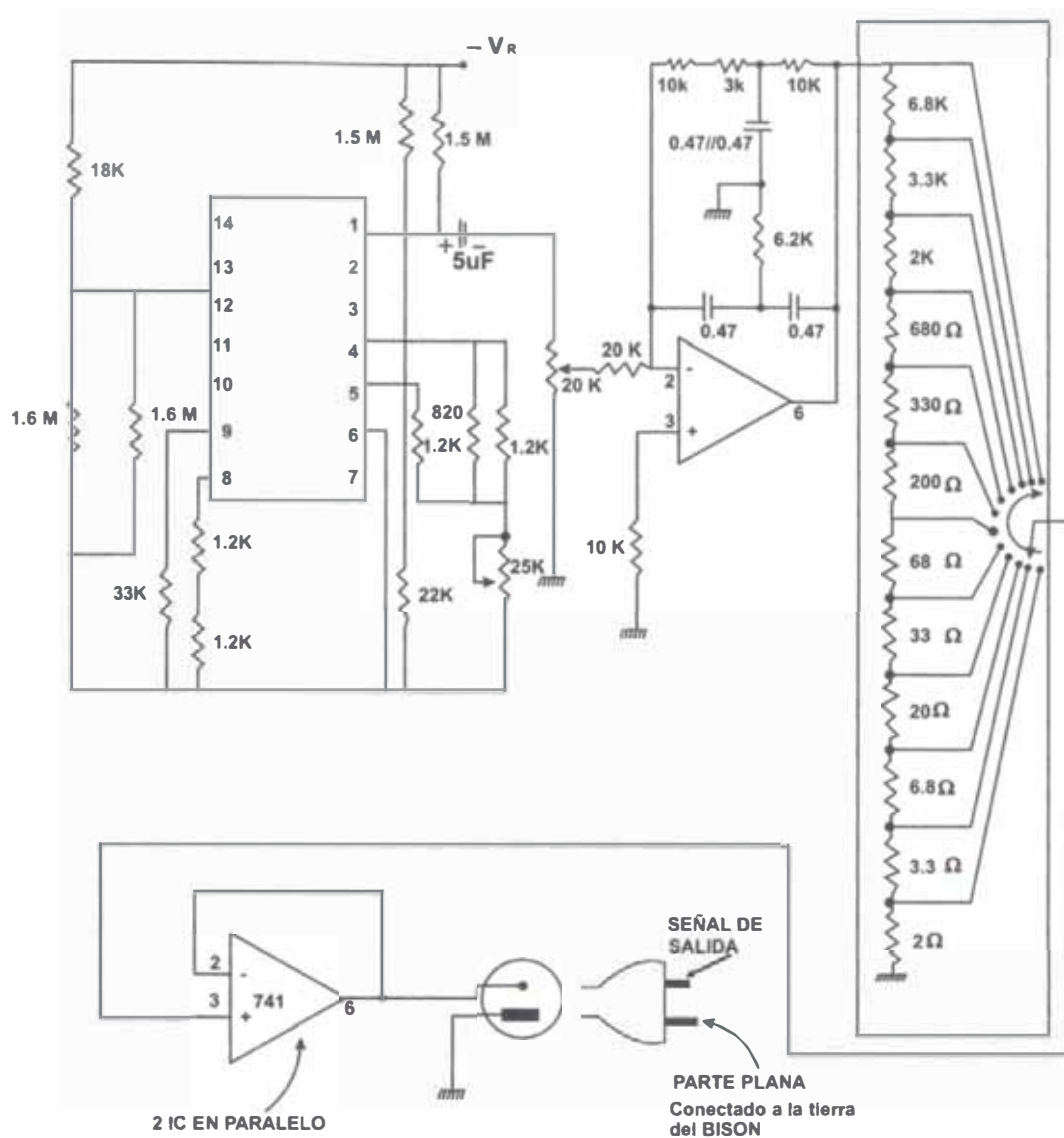


FIG. 33: Oscilador de Calibración.

4.3.4 Selector de Señales

Permite una gran versatilidad en las entradas al equipo BISON de los diferentes sensores y señales de calibración. (Fig. 34)

Esta unidad permite además intercambiar los diferentes canales del equipo; es decir, una señal conectada a un canal puede ser derivada a otro canal. Esto es útil en el caso de que la señal visualizada presente problemas en su conformación y se desea determinar si es por problemas propios de la señal o de la tarjeta de entrada usada.

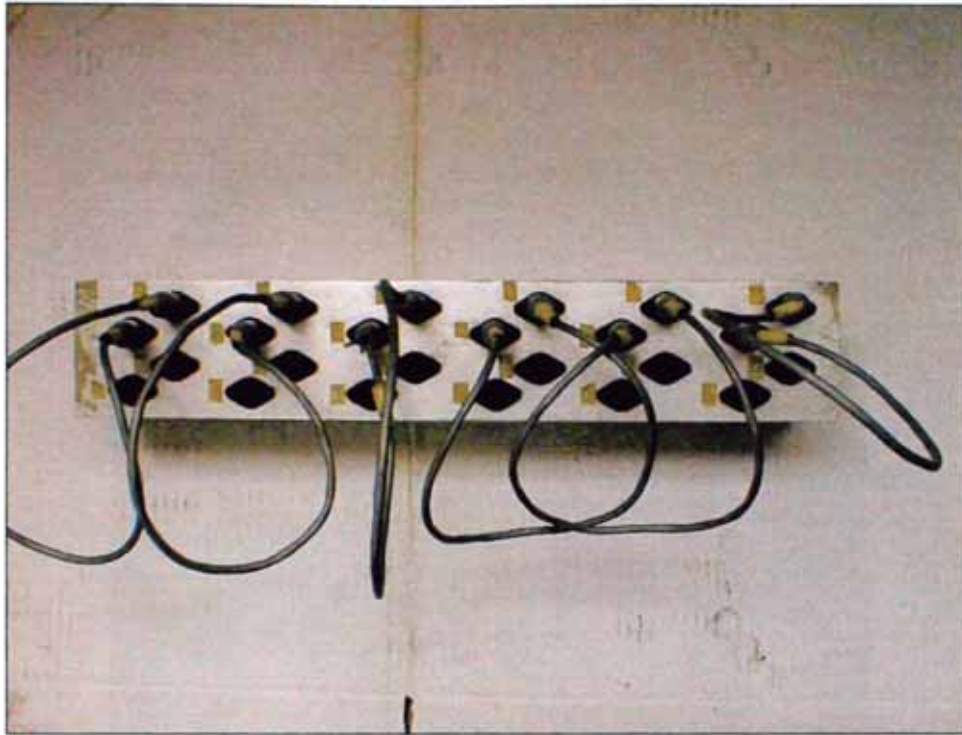


FIG. 34: Selector de Señales.

4.4 Unidad de Registro

La Unidad de Registro fue implementada teniendo como base el registrador multicanal GULTON. Dado que este registrador requiere de una fuente de energía eléctrica de 110 VAC, la unidad cuenta con un motor – generador que provee de esta energía a dicho equipo.

La unidad cuenta además con un circuito de control electrónico que permite la sincronización de los equipos GULTON y BISÓN.

4.4.1 *Registrador GULTON*

El Registrador GULTON modelo 888-HT es un registrador de 8 canales, de impresión directa en papel térmico. (Fig. 35)

Las características técnicas de este equipo son:

- Número de canales : 8 canales

- Velocidades : 8, de 1 mm/seg a 200 mm/seg
- Sensibilidad : 1 mv/div (nominal)
- Rango de ganancias : 8 pasos de 1 mV/div a 2 V/div
- Respuesta en frecuencia : 1000 Hz/mm
- Fuente de alimentación : 110 VAC

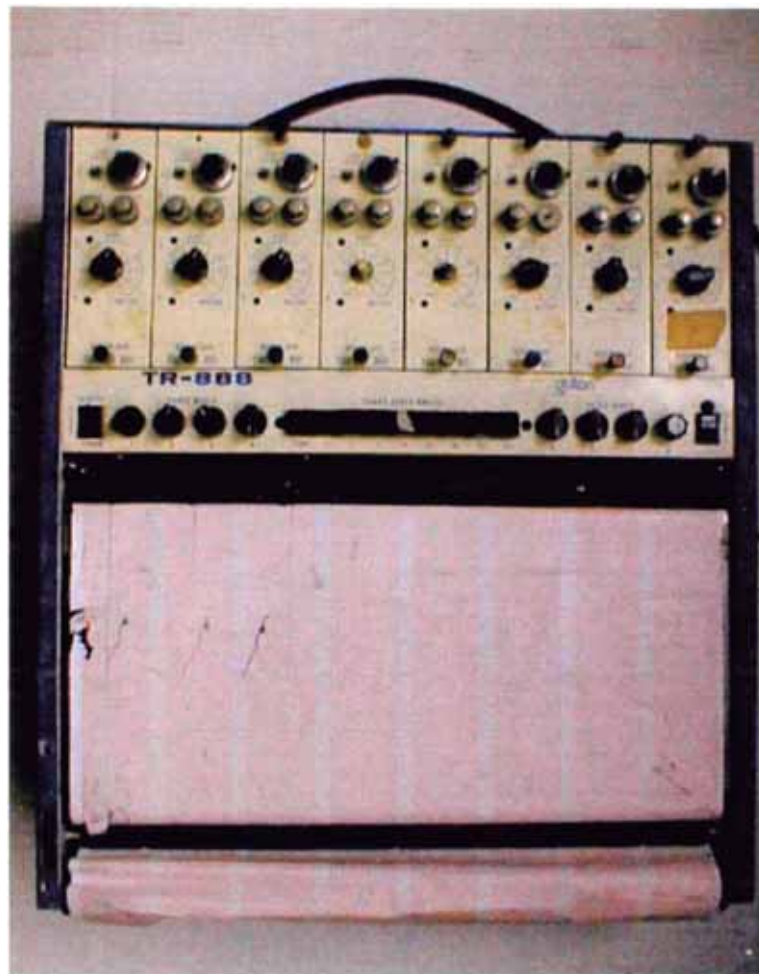


FIG. 35: Registrador GULTON.

4.4.2 Motor – Generador

Se utiliza para operativizar el equipo GULTON, ya que éste necesita de una fuente de energía eléctrica de 110 VAC. El generador utilizado, marca NIAGARA, tiene una potencia de salida de 1 Kw.

4.4.3 Control Remoto

Este circuito, implementado también en el Laboratorio de Electrónica del IGP, es utilizado para sincronizar en forma automática el inicio y fin del registro analógico (GULTON/BISON). (Fig. 36)

Después que las señales visualizadas y “memorizadas” por el acondicionador BISON se muestran adecuadas para obtener información de ellas, es preciso obtenerlas en papel. Para ello se requiere pasar toda esta información almacenada, en cada uno de los seis canales, al registrador GULTON de una manera sincronizada.

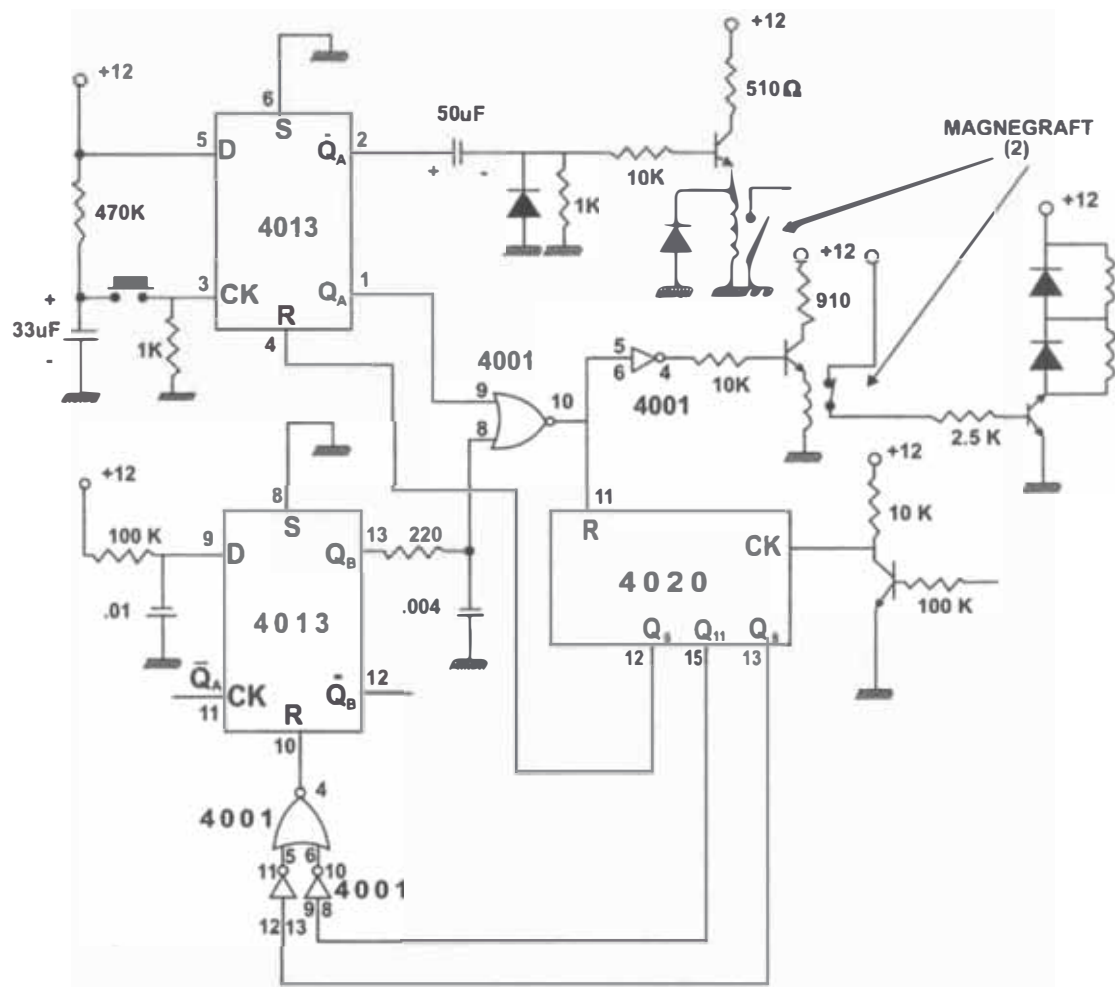


FIG. 36: Circuito del Control Remoto.

4.5 Funcionamiento del Sistema de Prospección Sísmica – DICGA

Las fuentes sísmicas artificiales (Generador Vertical –generador de ondas P- y el Generador Horizontal –generador de ondas S-) generan ondas sísmicas que viajan a través del terreno hacia los sensores de superficie y a los ubicados dentro del pozo.

Estos sensores convierten los movimientos del terreno causados por estas ondas sísmicas en señales eléctricas que son almacenadas en formato digital por el equipo BISON y son mostradas en la pantalla multicanal del mismo equipo. Esto permite una evaluación visual de las señales sísmicas.

Si se desea mejorar la conformación de estas señales, el equipo permite la acumulación de señales generadas por disparos sucesivos del generador de ondas sísmicas.

El equipo comienza a almacenar la información sísmica desde el instante de disparo de la fuente sísmica, permitiendo observar y determinar el tiempo que demora la onda en llegar a los sensores.

La calidad y fidelidad de las señales producidas por las ondas de corte depende de la correcta orientación de los sensores (geófonos) ubicados en el pozo.

La orientación precisa de los geófonos que se desplazan en el pozo, se obtiene mediante el declinómetro.

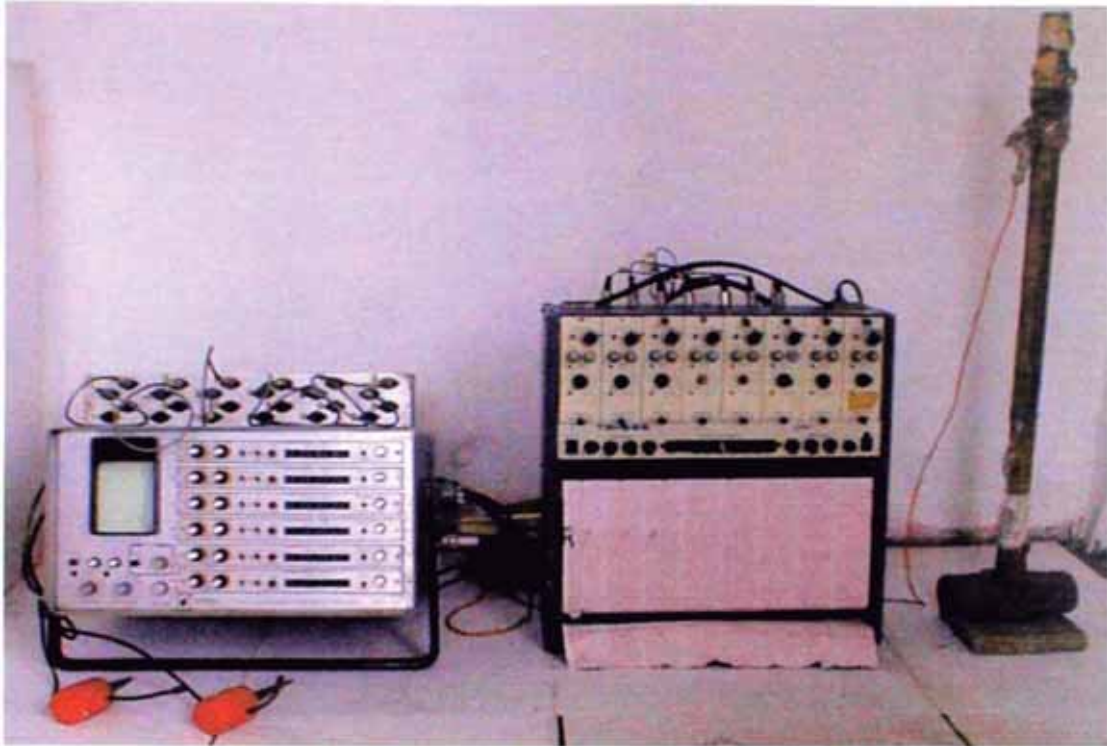


FIG. 37: Sistema de Prospección Sísmica DICGA.

Una vez optimizadas las señales mostradas en la pantalla, son extraídas de las memorias mediante el “buffer analógico” y registradas simultáneas y analógicamente en 6 canales del equipo GULTON.

Todo este último proceso se realiza automáticamente y en forma sincronizada mediante el Control Remoto.

CAPÍTULO V

PROCEDIMIENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS

La metodología desarrollada e implementada para realizar los trabajos en el Área Industrial de Bayóvar ha requerido de la documentación amplia de experiencias previas.

Los procedimientos desarrollados permiten obtener la mayor información posible con el máximo detalle permisible, tanto en los pozos como en los perfiles de refracción sísmica.

En la etapa de interpretación se han implementado técnicas que normalmente no se utilizan rutinariamente en trabajos similares, pero que son indispensables si se desean resultados confiables.

A continuación se hace una descripción de los aspectos más saltantes de las dos metodologías desarrolladas para los estudios objeto del presente informe: el sondaje en los pozos y los perfiles de refracción sísmica.

5.1 Sondaje en Pozos

Para facilitar la descripción de la metodología se le ha dividido en cuatro partes mayores:

- Adquisición de datos
- Procesamiento
- Análisis e interpretación
- Cálculo de velocidades promedio

5.1.1 Adquisición de Datos

El procedimiento seguido para la adquisición de datos en los ocho pozos perforados comprende los siguientes trabajos:

a) En el Laboratorio:

- Identificación de unidades litológicas cuyas propiedades físicas han de ser determinadas. La identificación se hace en base de la estratigrafía geológica y de mecánica de suelos en cada pozo.
- Determinación de la densidad de puntos de observación: normalmente un punto corresponde a cada medio metro en los primeros 15 metros de profundidad del pozo y cada metro para profundidades mayores.
- Verificación de que existan 3 o más puntos en cada unidad litológica diferenciada.

b) En el campo:

- Ubicación y orientación del generador de ondas transversales o de corte (ondas S).
- Orientación del declinómetro magnético de la unidad de detección (sonda OYO). Con esta orientación se logra que el eje de uno de los geófonos horizontales sea paralelo al eje longitudinal del generador de ondas de corte.
- Ubicación del punto de impacto para el generador de ondas longitudinales

o de compresión (ondas P) y el centro del generador de ondas de corte.

- Determinación de la posición horizontal y diferencias de nivel de los generadores con respecto a la boca del pozo.
- Activación y calibración de las unidades de “monitoreo” y almacenamiento, y de la unidad de registro (Fig. 18)
- Montaje del generador de ondas de corte.
- Pruebas de los sistemas eléctricos y de los “interruptores inerciales” para ambos generadores.
- Adquisición de información sísmica. Este paso involucra las siguientes acciones:

a) *Ondas de Corte (ondas S)*:

- Activación del generador de ondas transversales o de corte (ondas S).
- Acumulación de la señal en forma digital.
- Impacto de la masa sobre una placa metálica acoplada al suelo.
- Inversión de la polaridad del detector (sonda OYO) e inversión de la dirección del impacto en el Generador Horizontal (generador de ondas S).

Se repiten estas acciones hasta obtener una señal satisfactoria.

- Registro analógico permanente en papel.
- Tabulación de la información instrumental en formatos especiales (Fig. 38) y rotulado de los registros.

El número de impactos en ambas direcciones del generador de ondas de corte (ondas S) depende del acoplamiento generador- suelo,

detector-suelo y la transparencia de los estratos (suelo-subsuelo) a las ondas sísmicas.

b) *Ondas de Compresión (ondas P)*:

- Activación del generador de ondas longitudinales o de compresión (Generador Vertical que proporciona las ondas P).
- Impacto de la masa sobre la placa metálica acoplada al suelo.

Se repiten estas acciones hasta obtener una señal satisfactoria.

- Registro analógico permanente en papel.
- Tabulación de la información instrumental en formatos especiales (Fig. 38) y rotulado de los registros.

INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU CIOGA

DPTO. INGENIERIA GEOFISICA

PROYECTO : MICROZONIFICACION SISMICA EN ZONA INDUSTRIAL DE BAYOVAR

FECHA : 06-12-79

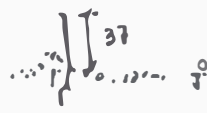
POZO #: 6

DECLINACION: X = +2
Y = -26

No. de Rec	Prof. Z.	Swing Time	Sq. Blon Gain						DELAY					P. S	GV GN	OBSERVACIONES	
			1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5				6
11.21	0.13	100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	4	4	(Pozo 7) 20m/2
11.26		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	4	4	✓
11.29		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	6	4	✓
11.31		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	6	6	✓
11.34		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
11.45		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	4	4	✓
11.51		200	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	1	6	✓
11.53		200	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
11.56		200	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
11.58		200	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
12.26		200	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
14.00		200	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	4	4	(Pozo 12) 20m/2
14.32		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	4	4	✓
14.04		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	4	4	✓
14.05		200	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	4	6	✓
14.12		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	4	4	✓
14.21		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
14.24		100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	7	6	✓
14.48	11	100	15	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	10	6	(ALMORZAR)
14.54		100	3	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-	2	2	✓
14.59		100	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
15.02		100	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	3	2	✓
15.04		100	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
15.20		100	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
15.21		100	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
15.22		100	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
15.27		100	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	3	4	✓
15.41		200	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	6	4	✓
15.63		100	3	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-	6	6	✓
16.25		200	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	10	2	(Pozo 12) 20m/2
16.49		200	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	10	2	✓
16.53		200	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	7	4	(Pozo 12) 20m/2

OPERACION DE EQUIPO:
OPERADOR: [Signature]
MANTENIMIENTO: [Signature]

Nivel de agua A : 32.30 mds.
Fecha : 18-12-79
Hora : 12.36 Horas.



NOTA: Se debe revisar y se garantiza la seguridad de los datos en el momento de introducirlos en el sistema de procesamiento de datos.

FIG. 38: Reporte de operación diaria de sondeo de pozos.

5.1.2 *Procesamiento de Datos*

El procesamiento de datos involucra las siguientes actividades.

- Cálculo de la distancia mínima recorrida por las ondas sísmicas en base a la información que proporciona el topógrafo:

- Distancias horizontales y
- Diferencias de nivel

Los cálculos se realizan tanto para el generador horizontal (ondas de corte S), como para el generador vertical (ondas de compresión P).

- Preparación de secciones de registro:
 - Comprende la graficación de los sismogramas espaciados a la distancia mínima de recorrido.
 - Las secciones en formato de tiempo reducido, previa corrección por topografía, se preparan para las componentes:
 - Horizontal transversal (T)
 - Horizontal radial (R) y
 - Vertical (Z).

Un ejemplo de la sección de registro, elaborado en el campo, de las componentes transversal (Ts) y vertical (Zp), en tamaño reducido, se presenta en las Figs. 39 y 40. En estas secciones se puede notar la contaminación de los registros del 8 al 12, debido a la mala orientación de la sonda OYO, lo que originó que el geófono capte otras componentes.

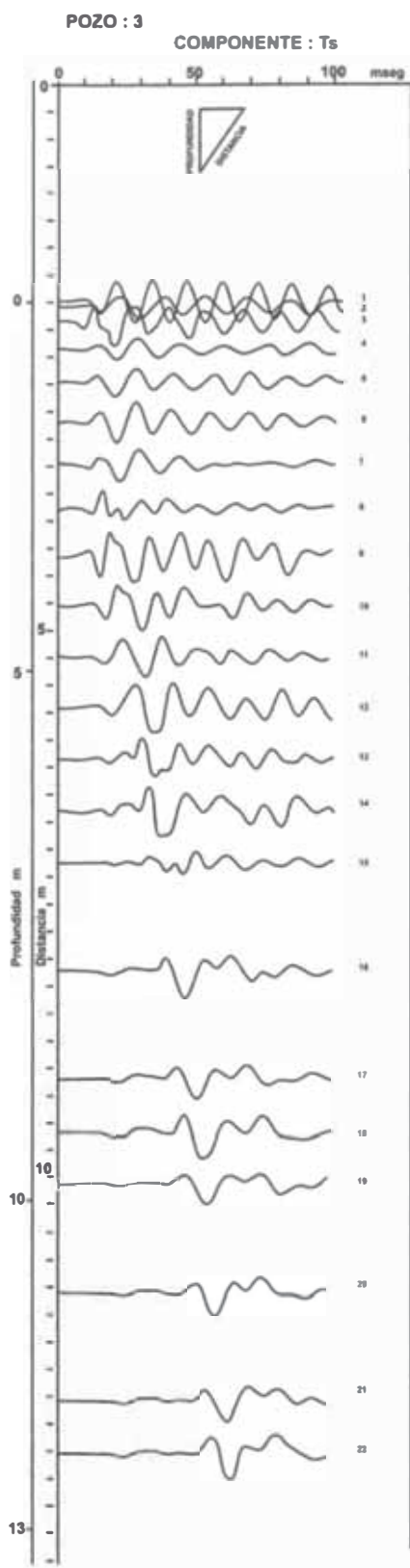


FIG. 39: Sección de registro elaborado en el campo para la componente horizontal transversal Ts, correspondiente al Pozo 3 (reducido cuatro veces de su tamaño original; T: componente horizontal; S: generador de ondas de corte).

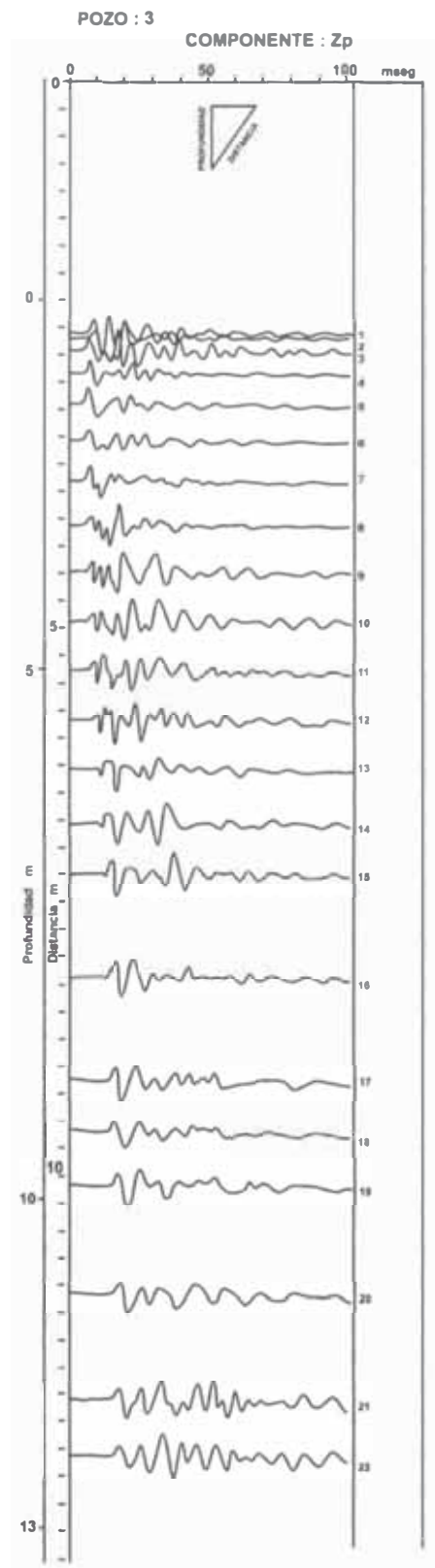


FIG. 40: Sección de registro elaborado en el campo para la componente vertical Zp, correspondiente al Pozo 3 (reducido cuatro veces de su tamaño original; Z: componente vertical; P: generador de ondas de compresión).

5.1.3 *Análisis e Interpretación*

El método de campo empleado para la adquisición de datos sísmicos permite eliminar la contaminación de las señales S_H (componente horizontal de la onda de corte) con ondas S_V (componente vertical de la onda de corte) o P y sus convertidas.

El proceso de análisis e interpretación consiste en *identificar* en cada sismograma *los arribos* de las fases de las ondas sísmicas. La identificación se realiza en las secciones de registro, utilizando el método de correlación de fases.

Para facilitar la correlación de fases se empleó secciones de registro en el formato de tiempo reducido versus la distancia inclinada generador-detector.

Un ejemplo de estas secciones de registro, con el formato de tiempo reducido versus la distancia inclinado generador-detector, se muestran para las componentes T_s y Z_p en las Figs. 41 y 42 respectivamente.

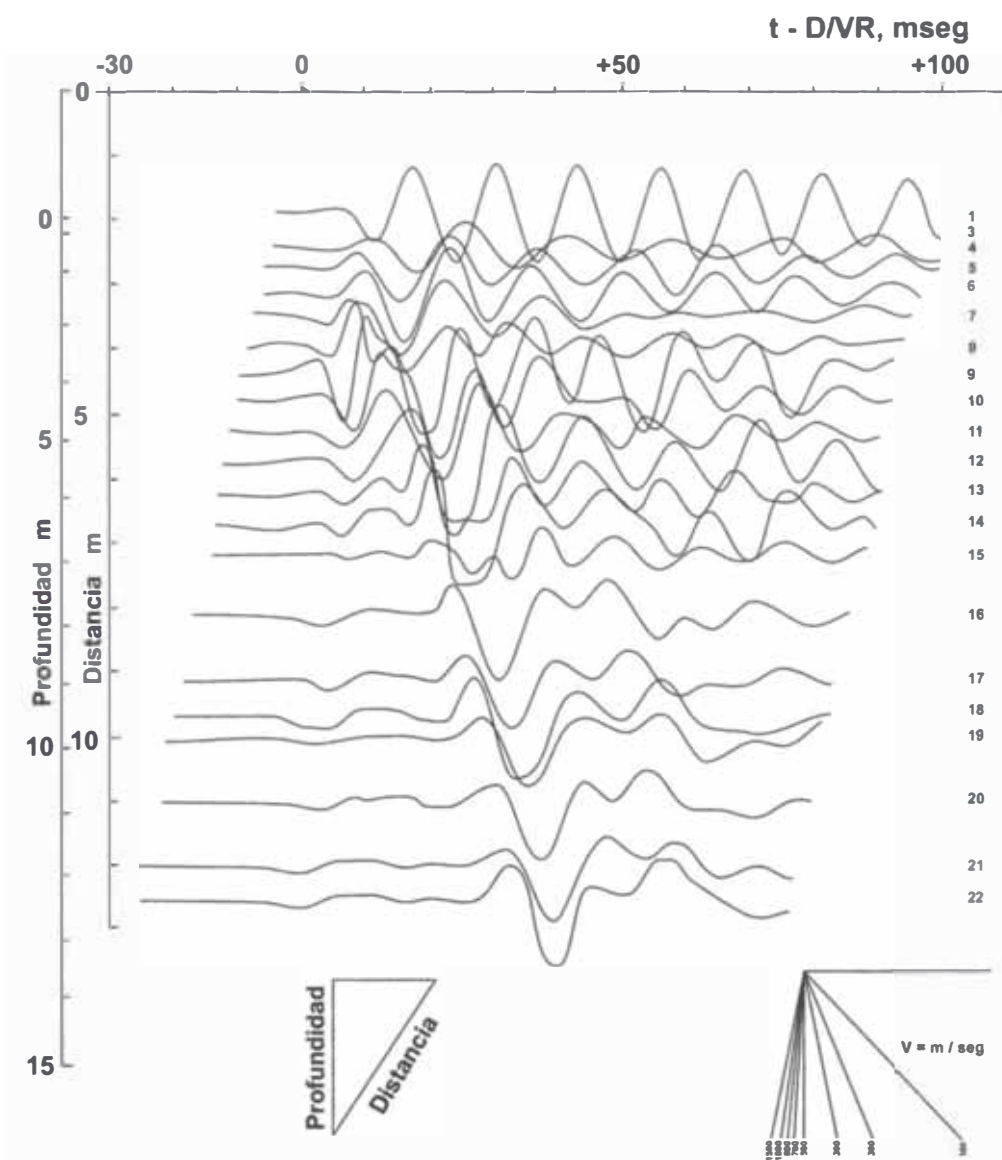
Una vez identificada la fase, las lecturas de arribos se hicieron en el sismograma original, con precisiones al décimo de milisegundo.

Las lecturas de las fases correlacionadas se presentan en gráficos tiempo vs. distancia vertical de recorrido. Los tiempos han sido corregidos previamente por el efecto del camino inclinado de propagación y la topografía. Los tiempos de arribo de las fases se reducen a una velocidad conveniente con el fin de obtener una indicación clara de los cambios de velocidad y agrupar aquellos arribos que pertenecen al mismo “Estrato Sísmico”, i.e., determinar el rango de profundidad, la unidad o unidades litológicas en las cuales las ondas sísmicas se propagan con una velocidad aproximadamente constante. Un ejemplo se presenta en la Fig. 43.

Es oportuno señalar que las interfases de los diferentes “estratos sísmicos” determinados en base a las ondas P y a las ondas S no necesariamente coinciden.

POZO: 3

COMPONENTE: Ts

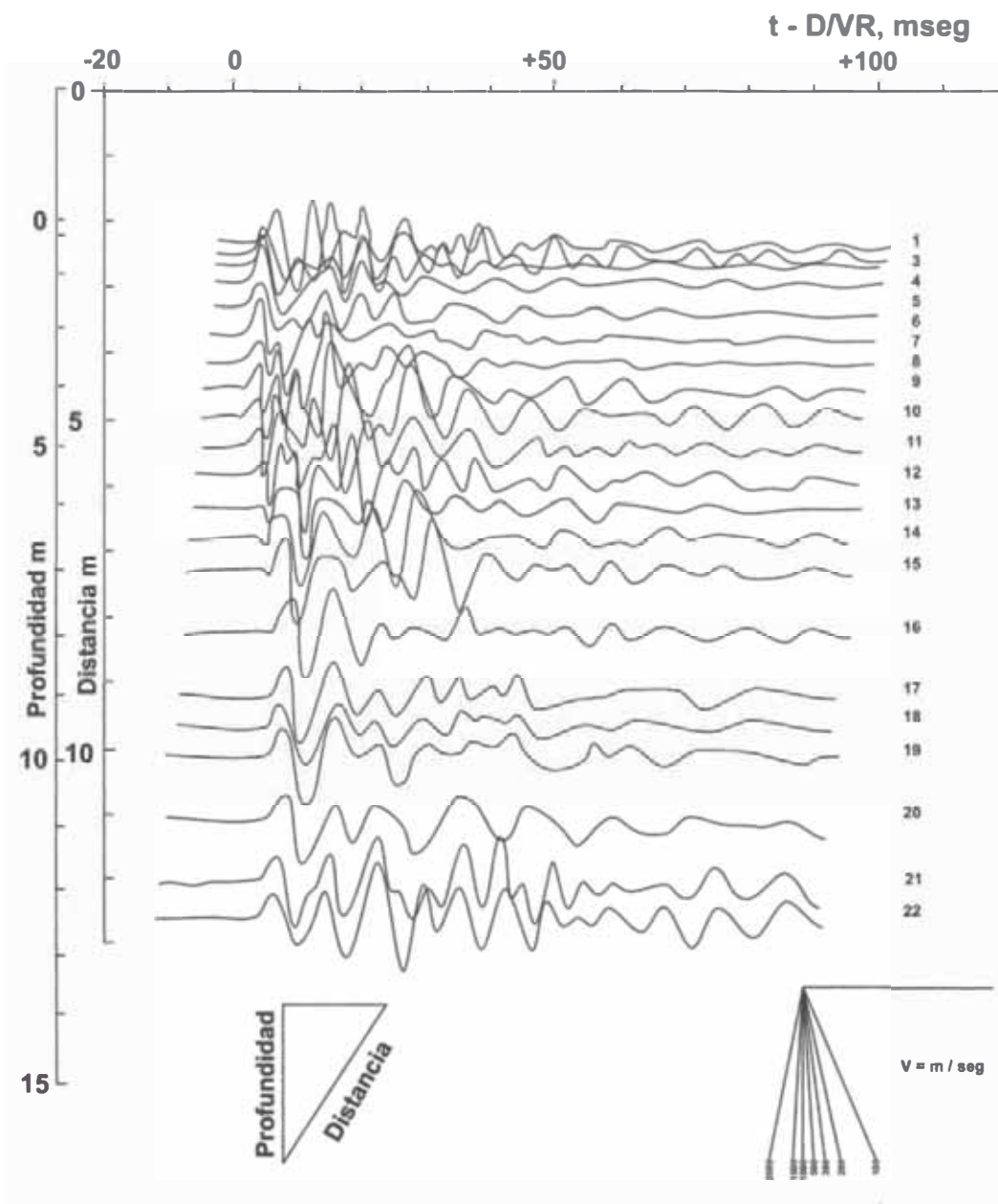


IGP-DICGA		MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA: AREA INDUSTRIAL - BAYOVAR		RUBRO: 2.3 GEOFÍSICA DE PROSPECCIÓN			
SENSOR: OYO	ACC. SEÑAL Y REG.: BISON - GULTON - IGP	FUENTES: GEN. HORIZ.	UBICACIÓN (m)				
			N 9'355,597.33	E 498,337.16	ALTITUD: 9.13		
SECCIÓN DE REGISTRO		ESCALAS: V = 1 : 50 H = 1.8655 mm/mseg		VEL. DE REDUCC. 500 m/seg			
ADQ. DATOS: A. FLORES R. BAUTISTA	FECHA: 4-12-79	CÁLCULOS: H. ALEMÁN	FECHA: 5-01-81	GRAFICACIÓN: FÉLIX MONGE	FECHA: 13-02-81	TOPOGRAFÍA: GUILLERMO LO	FECHA: 4-12-79

FIG. 41: Sección de registro con formato de tiempo reducido, para la componente horizontal transversal Ts. (Velocidad de Reducción VR = 500 m/seg. Cada registro está identificado por los números pequeños en el extremo derecho del sismograma. En la parte inferior se da la información técnica de campo y laboratorio correspondiente al procesamiento de la sección de registro. Notar la contaminación de los registros del 8 al 12. La sonda no estuvo bien orientada).

POZO: 3

COMPONENTE: Zp



IGP-DICGA		MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA: AREA INDUSTRIAL - BAYOVAR			RUBRO: 2.3 GEOFÍSICA DE PROSPECCIÓN		
SENSOR: OYO	ACC. SEÑAL Y REG.: BISON - GULTON - IGP	FUENTES: GEN. HORIZ.	UBICACIÓN (m)			ALTITUD: 9.13	
			N 9'355,597.33	E 498,337.16			
SECCIÓN DE REGISTRO			ESCALAS: V = 1 : 50 H = 1.8670 mm/mseg	VEL. DE REDUCC. 1,000 m/seg			
ADQ. DATOS: A. FLORES R. BAUTISTA	FECHA: 4-12-79	CÁLCULOS: H. ALEMÁN	FECHA: 7-01-81	GRAFICACIÓN: FÉLIX MONGE	FECHA: 13-02-81	TOPOGRAFÍA: GUILLERMO LO	
					FECHA: 4-12-79		

FIG. 42: Sección de registro con formato de tiempo reducido, para la componente vertical Zp. (Velocidad de Reducción VR = 1.0 Km/seg.; Z: componente vertical; P: generador vertical de ondas longitudinales o de compresión).

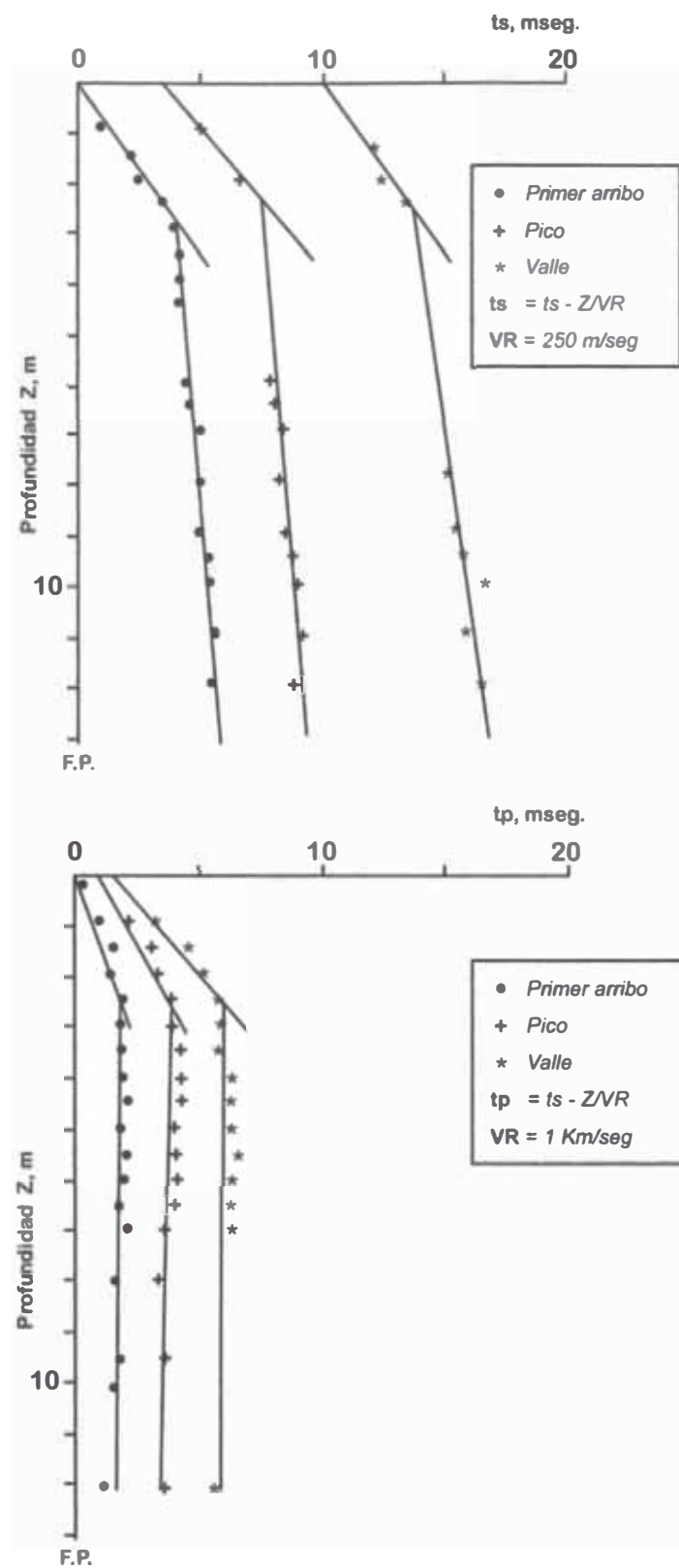


FIG. 43: Gráficos de profundidad vs. tiempo reducido, para los arribos de las ondas de compresión (Z_p) y de corte (T_s). (Z : componente vertical; P : generador de ondas de compresión; T : componente horizontal transversal; S : generador de ondas de corte).

5.1.4 Cálculo de Velocidades de Propagación Promedio

Una vez determinados los límites de profundidad de los diferentes estratos sísmicos, se proceden a calcular, por mínimos cuadrados, las velocidades promedio sobre la base de los tiempos de recorrido en función de la profundidad.

Cuando se realizaron los trabajos (1979-1980), los programas de cómputo digital para el cálculo de todo lo referido a estos estudios, fueron desarrollados bajo el “Programa de Desarrollo Científico y Tecnológico” de la OEA: Microzonificación Sísmica de ciudades importantes y núcleos industriales. Estos programas se prepararon para ser usados en computadoras del tipo “mainframe”.

La ecuación de regresión lineal utilizada para los n-pares de tiempo-profundidad (t_j, Z_j) es:

$$t(Z_j) = a + b (Z_j - \bar{Z}), \quad j = 1, \dots, N;$$

Donde:

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_j, \quad y \quad a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j,$$

El tiempo de “intercepción” esta dado por:

$$\sum_{j=1}^N t_j - b \bar{Z}$$

Y la pendiente por:

$$b = \sum_{j=1}^N w_j t_j,$$

Con:

$$w_j = (Z_j - \bar{Z})/R, \quad y \quad R = \sum_{j=1}^N (Z_j - \bar{Z})^2$$

La velocidad promedio está dada por:

$$\bar{V} = 1 b$$

La desviación estándar para la pendiente, está dada por:

$$S_b = \frac{1}{(N-2)R} \sum_{j=1}^N (t_j - t(Z_j))^2$$

Por lo tanto, el rango de confianza para una desviación estándar, está dado por:

$$(b - S_b), (b + S_b)$$

Los rangos de variación de velocidad a una desviación estándar corresponden a la inversa de los límites del coeficiente de regresión “b”:

$$\left(\frac{1}{b + S_b}, \frac{1}{b - S_b} \right)$$

5.2 Perfiles de Refracción Sísmica

Para explorar la **topografía de los estratos superficiales en la vecindad de cada pozo**, se ejecutaron cuatro perfiles de refracción sísmicos de 200 m cada uno para los pozos 3, 4, 5, 6, 7 y 8; y ocho perfiles en calicatas de Minero Perú.

La descripción de la metodología seguida en la ejecución de los trabajos de refracción sísmica sigue el mismo formato que la de los pozos.

Se consideran las siguientes partes:

- Adquisición y procesamiento de datos
- Análisis e interpretación
- Cálculo de velocidades y espesores.

5.2.1 *Adquisición de Datos*

Las actividades para la adquisición de datos comprendieron aquellas realizadas en el laboratorio y en el campo mismo.

Al planificar los trabajos no se contaba con documentación de experiencias previas en el área, por lo que se tuvo que dar gran importancia a los resultados preliminares de los pozos.

A. *Trabajo de Laboratorio*

En base a la interpretación preliminar de las secciones de registro para cada pozo, se determinó la función aproximada de velocidades de propagación de las ondas de corte y de compresión para los perfiles en la vecindad de cada pozo.

Esta función de velocidad permitió calcular las curvas de distancia versus tiempo aproximadas, y estimar los retardos o “delays” a utilizar posteriormente en el equipo de acumulación de señales sísmicas BISON. (Fig. 25)

La densidad de puntos a lo largo del perfil sísmico se calculó en base a dichas curvas preliminares de tiempo versus distancia.

B. *Trabajo de campo*

Al igual que en la adquisición de datos en los pozos, se puso gran cuidado en la instalación del generador y el tendido de los geófonos. Secuencialmente, se ejecutaron las siguientes labores:

a) *Topografía y emplazamiento de generadores*

- Ubicación de los generadores, incluyendo la orientación del eje del generador de ondas de corte.
- Señalización de los puntos de observación, determinación de la distancia de la fuente de ondas sísmicas y altitud de la posición.

- Colocación de las bases del generador para los perfiles.
 - Instalación de los generadores de las ondas de corte y de compresión, incluyendo la verificación de la orientación del eje del generador de ondas de corte y los interruptores inerciales.
- b) *Obtención de registros*
- Instalación de geófonos, determinación de la corrección de la altitud y alejamiento horizontal del eje del perfil, verificación de la orientación del eje horizontal del geófono.
 - Instalación, calibración y verificación del sistema de adquisición de datos.
 - Registro simultáneo de las señales de los 6 geófonos (puntos).

En la primera parte del proyecto (en total 24 perfiles correspondientes a los pozos 3 al 8), para cada tendida de geófonos se obtuvo dos grupos de registros: uno con barrido de 50 milisegundos y otro con barrido de 200 ó 100 milisegundos, según se trataba de registros de ondas de corte o de compresión.

Cuando la parte del registro correspondiente a los primeros arribos no fue clara, se realizó un tercer registro acumulando señales hasta saturar el sistema.

Se puso un cuidado especial en la tabulación del número de la tendida, ganancias de los amplificadores, número de golpes que se realizó por cada punto de observación, tiempo de barrido o “sweep time”, tiempo de retardo o “delay” y el tiempo de duración de los registros. (Fig. 44)

El emplazamiento de la base de los generadores, así como la plantada de los geófonos se realizó simultáneamente con otras actividades. Por lo

general, las bases de los generadores se dejaban instaladas al finalizar el día de trabajo, dejándolas listas para el siguiente día.

c) *Trabajo de Gabinete*

En el gabinete temporal de campo, en condiciones normales e inmediatamente después del trabajo de campo, se realizaron las siguientes labores:

- Registro de la producción de datos del día.
- Cálculo de la información para las secciones de registro.
- Elaboración de las secciones de registro preliminares correspondientes a cada perfil tanto de las ondas de corte como de compresión.

INGENIERIA GEOFISICA

PROYECTO : 12/11/80

3

S.B.

Ep

		PRUEBA						FASES				ARRIBO		
		Punto	Canal	Gain	Nº golpes	S.T. msec.	Delay msec.	Gain	Nº golpes	S.T. msec.	Delay msec.	Nº golpes	Prueb. msec.	Fases msec.
I	68.93	143	1	2	1	500	—	2	1	100	—			
	/	141	2	2.5	/	/	—	/	/	/	—			
	/	139	3	3	/	/	—	2.5	/	/	—			
	/	137	4	3.5	/	/	—	3	/	/	—			
	/	135	5	3.5	/	/	—	3.5	/	/	—			
	/	133	6	/	/	/	—	/	/	/	—			
II	68.51	131	1	3	1	500	—	3	1	100	—			
	/	120	2	/	/	/	—	/	/	/	—			
	/	129	3	/	/	/	—	/	/	/	—			
	/	128	4	4	/	/	—	4	/	/	—			
	/	127	5	5	/	/	—	/	/	/	—			
	/	126	6	6	/	/	—	6	/	/	—			
III	69.16	124	1	/	/	500	—	7	10	100	20			
	/	122	2	/	/	/	—	8	/	/	20			
	/	117	3	/	/	/	—	MAX	20	/	20			
	/	104	4	/	/	/	—	/	/	/	30			
	/	96	5	/	/	/	—	/	/	/	30			
	/	93	6	/	/	/	—	/	/	/	30			
IV	69.50	90	1	/	/	500	—	MAX	20	100	60			
	/	86	2	/	/	/	—	/	/	/	60			
	/	73	3	/	/	/	—	/	/	/	60			
	/	56	4	/	/	/	—	/	/	/	90			
	/	50	5	/	/	/	—	/	/	/	40			
	/	34	6	/	/	/	—	/	/	/	40			
V	18	1	/	/	/	500	—	/	/	100				
	01	2	/	/	/	/	—	/	/	/				

GENERADOR EQUIPOS :
 GENERADOR TENDIDO GEOFONOS :
 GENERADORES GENERADOR HORIZONTAL :

11 = 80ms. ABE:ms

FIG. 44: Parte de operación diaria de la adquisición de datos en los perfiles de refracción sísmicos. (Z: componente vertical, P: generador de ondas de compresión).

- Verificación de la calidad y consistencia de la información contenida en cada sismograma.
- Lecturas de arribos y de los gráficos de “tiempo vs. distancia”.
- Mantenimiento al día de los archivos de control y producción de datos y análisis preliminares.

En Lima, una vez concluidos los trabajos de campo, se elaboraron las secciones definitivas de registro para cada perfil. Se utilizó el formato de tiempos reducidos.

Un par de ejemplos se muestran en las Figs. 45 y 46, para las ondas P y S, respectivamente.

5.2.2. Análisis e Interpretación

Las secciones de registros obtenidos en el área de estudio, resultaron no del todo satisfactorias como para permitir una interpretación inequívoca de los arribos de las diferentes fases asociadas con determinados refractores, en particular, aquellas secciones correspondientes a las ondas refractadas.

Para resolver esta dificultad, se utilizó un procedimiento iterativo que consistió en términos generales, en lo siguiente:

- I. Se efectuó el cálculo de los tiempos de recorrido para las ondas reflejas y críticamente refractadas en base del modelo derivado para cada pozo.
- II. Se realizó la graficación de estos tiempos en las secciones de registro para todos aquellos perfiles que tienen un extremo ubicado en el pozo. Esto permitió identificar las diferentes “ramas” de la sección de registro asociadas con los refractores mayores.

- III. Después de concluido la graficación los tiempos de recorrido, se procedió a la interpretación de las secciones de registro por el método de “perfiles reversos”.
- IV. Como siguiente paso, se procedió a la lectura de los tiempos de arribo de las fases asociadas con cada “rama” refractada, cuando esta fue posible.
- V. Con las profundidades calculadas para el extremo alejado del perfil (con respecto al pozo), se procede a calcular las nuevas curvas de tiempo vs. distancia para el siguiente perfil y así sucesivamente se repiten los pasos del I al IV para todos los demás perfiles.

5.2.3 Cálculo de Velocidades y Espesores

Con las lecturas obtenidas en la sección 5.2.2 paso IV, para cada “rama refractada reversa” (i.e., tiempos de llegada de ondas sísmicas asociadas con el mismo refractor y provenientes de los generadores de ondas ubicados en los extremos opuestos del perfil), se ejecutaron los siguientes pasos:

- I. Cálculo de velocidades y espesores del perfil por medio del método de mínimos cuadrados. El programa digital de computación desarrollado por Steinhart (Steinhart & Meyer, 1960), fue modificado y adaptado para las facilidades de cómputo disponibles en el medio (1979-1980).
- II. Detallado de la topografía asociada con los arribos que no concuerdan con la tendencia general.

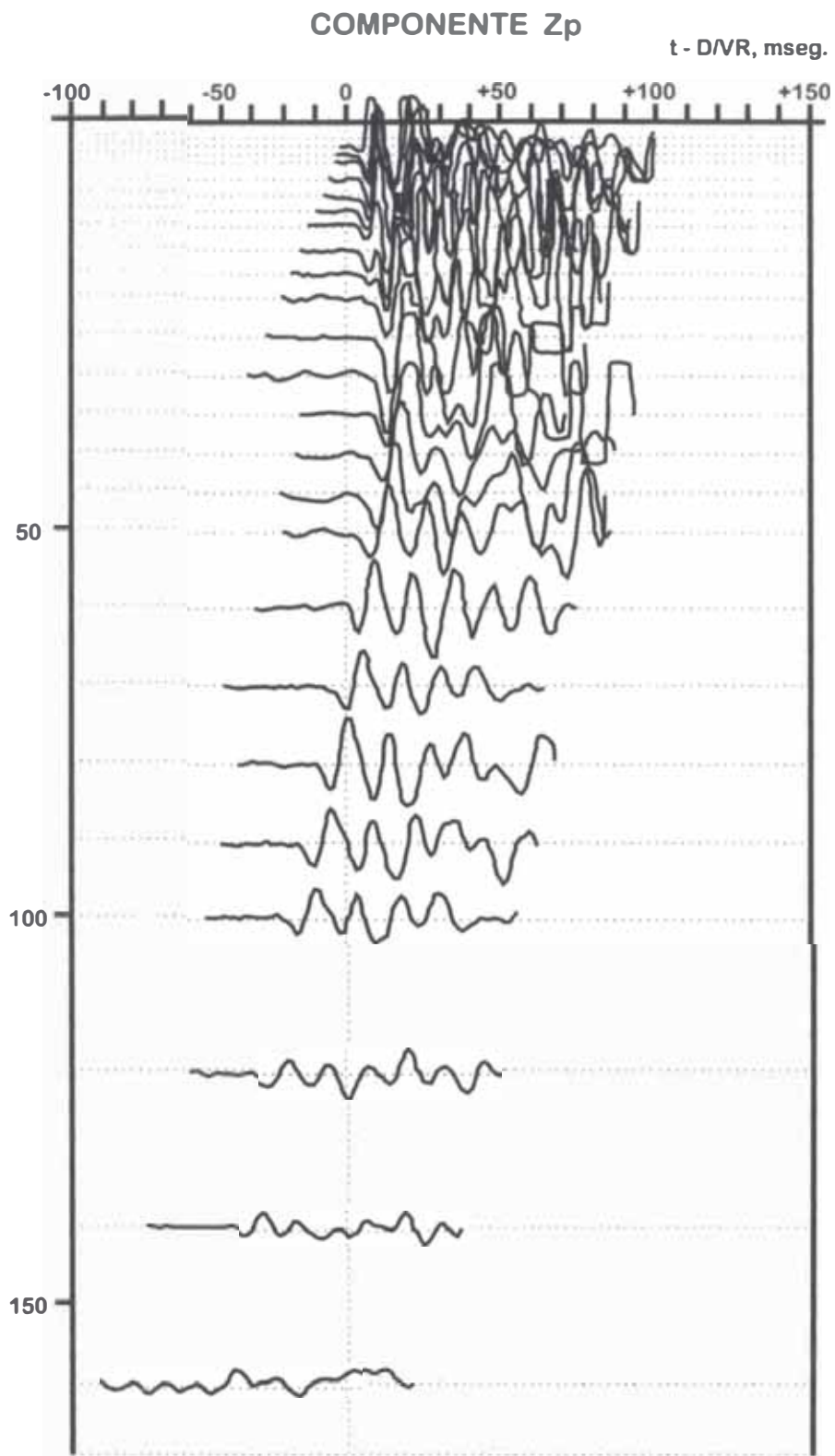
POZO: 5

FIG. 45: Sección de Registro (reducido del tamaño original), con formato de tiempo reducido. (Z: componente vertical, P: generador de ondas de compresión).

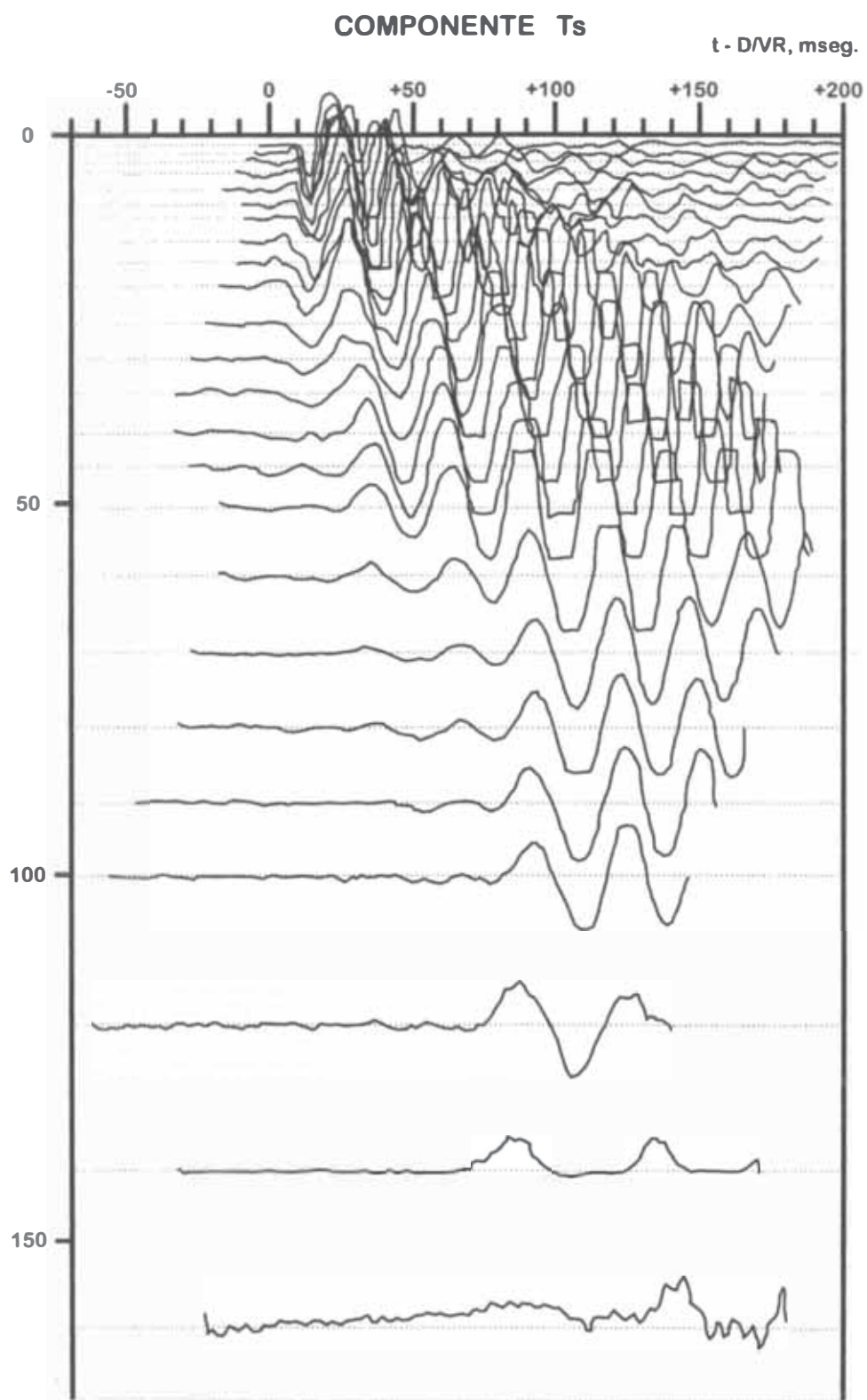
POZO: 5

Fig. 46: Sección de Registro (reducido del tamaño original), con formato de tiempo reducido. (T: componente horizontal transversal, S: generador de ondas de corte).

A pesar de la brevedad del método expuesto y debido a la dificultad en la identificación de los primeros arribos y a la no disponibilidad de medios de cómputo portátiles (el proyecto se realizó entre 1979-1980), que hubieran permitido un rápido procesamiento de la gran cantidad de datos recopilados, los resultados preliminares obtenidos, con cierto retraso, fueron satisfactorios.

Sin embargo el grueso del procesamiento, para la determinación de las velocidades y espesores (estratos) en los perfiles, quedó postergado para ser complementado con técnicas y equipos más potentes en el futuro.

Para el cálculo de la profundidad en el que se encuentra el medio refractor (profundidad en que se produce la refracción de la onda sísmica), se empleó el Método ABC (Shallow Refraction Seismics, páginas 95, 96 y 97). En el caso de dos estratos, cuya diferencia de densidades provocan la refracción de las ondas sísmicas, la profundidad está en función de las dos velocidades de propagación existentes en cada uno de los estratos:

$$h_1 = \frac{T_2 V_1 V_2}{2\sqrt{(V_2^2 - V_1^2)}}$$

Donde:

h_1 = profundidad del estrato.

T_2 = tiempo resultante de la suma de los tiempos asociados con las llegadas de las ondas.

V_1 = velocidad de propagación en el estrato 1.

V_2 = velocidad de propagación en el estrato 2.

Para el caso de “n” estratos la fórmula se transforma en:

$$h_{(n-1)} = \frac{T_n V_n V_{(n-1)}}{2(V_n^2 - V_{(n-1)}^2)} - \frac{V_n V_{(n-1)}}{(V_n^2 - V_{(n-1)}^2)} \sum_{v=1}^{v=n-2} h_v \cdot \left(\frac{1}{V_v^2} - \frac{1}{V_n^2} \right)$$

Finalmente, en el caso de que dos ondas críticamente refractadas desde dos puntos del medio refractor lleguen a un punto común en la superficie, es conveniente determinar la velocidad promedio de ambas. Para esta circunstancia, se emplea la siguiente fórmula (Shallow Refraction Seismics, página 141):

$$\bar{V}_2 = \frac{2V_B V_A}{V_B + V_A}$$

Donde: V_B y V_A son simplemente las velocidades directa e inversa sobre el perfil en cuestión.

5.2.4 Gráficas de Perfiles de Refracción Sísmica

Gracias a los adelantos tecnológicos con que se cuenta en la actualidad, (computadoras personales de alta capacidad de almacenamiento y gran velocidad de trabajo), es posible obtener resultados con mayor rapidez y precisión, permitiendo incluso la impresión de estos datos. Además, es posible tomar varias señales sísmicas en forma simultánea, debido a que en la actualidad se cuenta con equipos que permiten monitorear sus múltiples canales de entrada.

Perfil Sísmico : S-6 Samaca. Tiempo de recorrido del perfil sísmico S-6

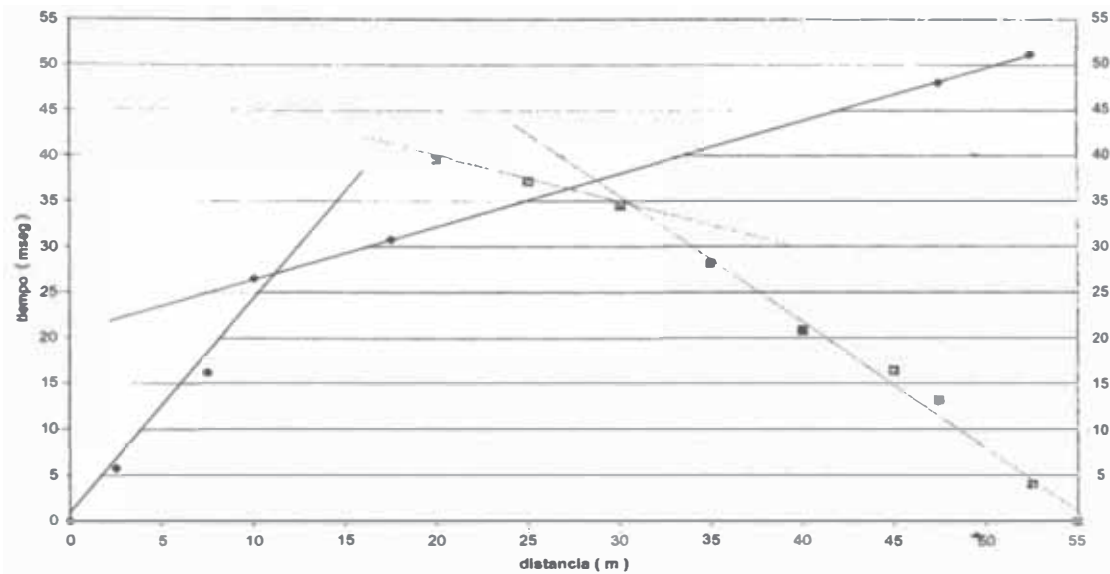


FIG. 47: Perfil de Refracción Sísmico típico

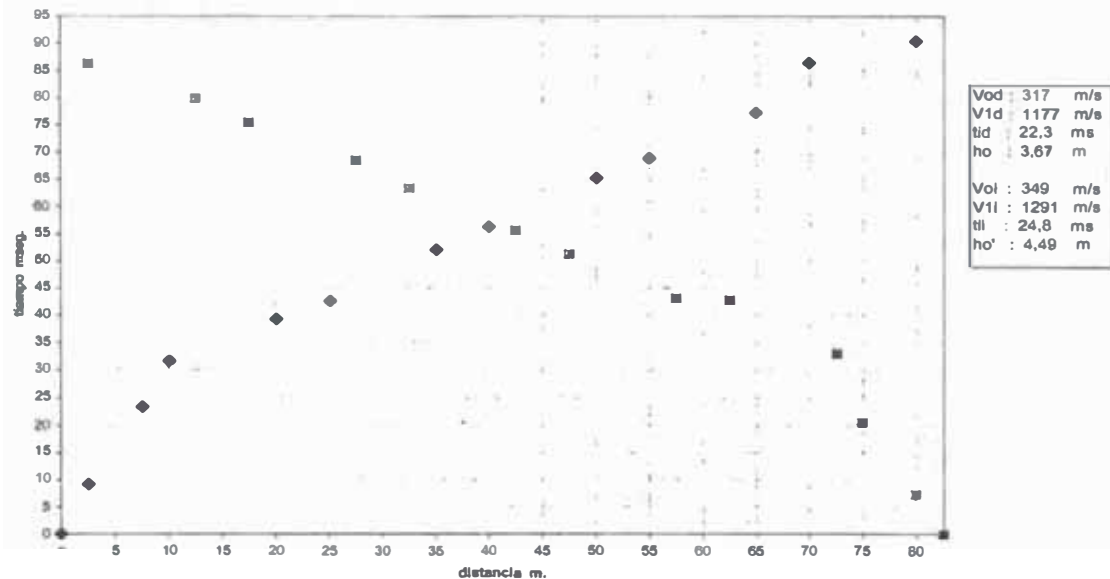
TIEMPO RECORRIDO
Perfil S-8

FIG. 48: Perfil de Refracción Sísmico típico

En ocasiones es necesario obtener perfiles de refracción sísmicos que permitan un gran detalle del subsuelo a poca profundidad (por ejemplo, para el caso de la construcción de una carretera).

En estos casos es conveniente aumentar el muestreo de dichos perfiles, distribuyendo los geófonos a distancias cortas tanto como sea necesario.

A continuación se indican distribuciones típicas de los geófonos para perfiles de diferentes longitudes.

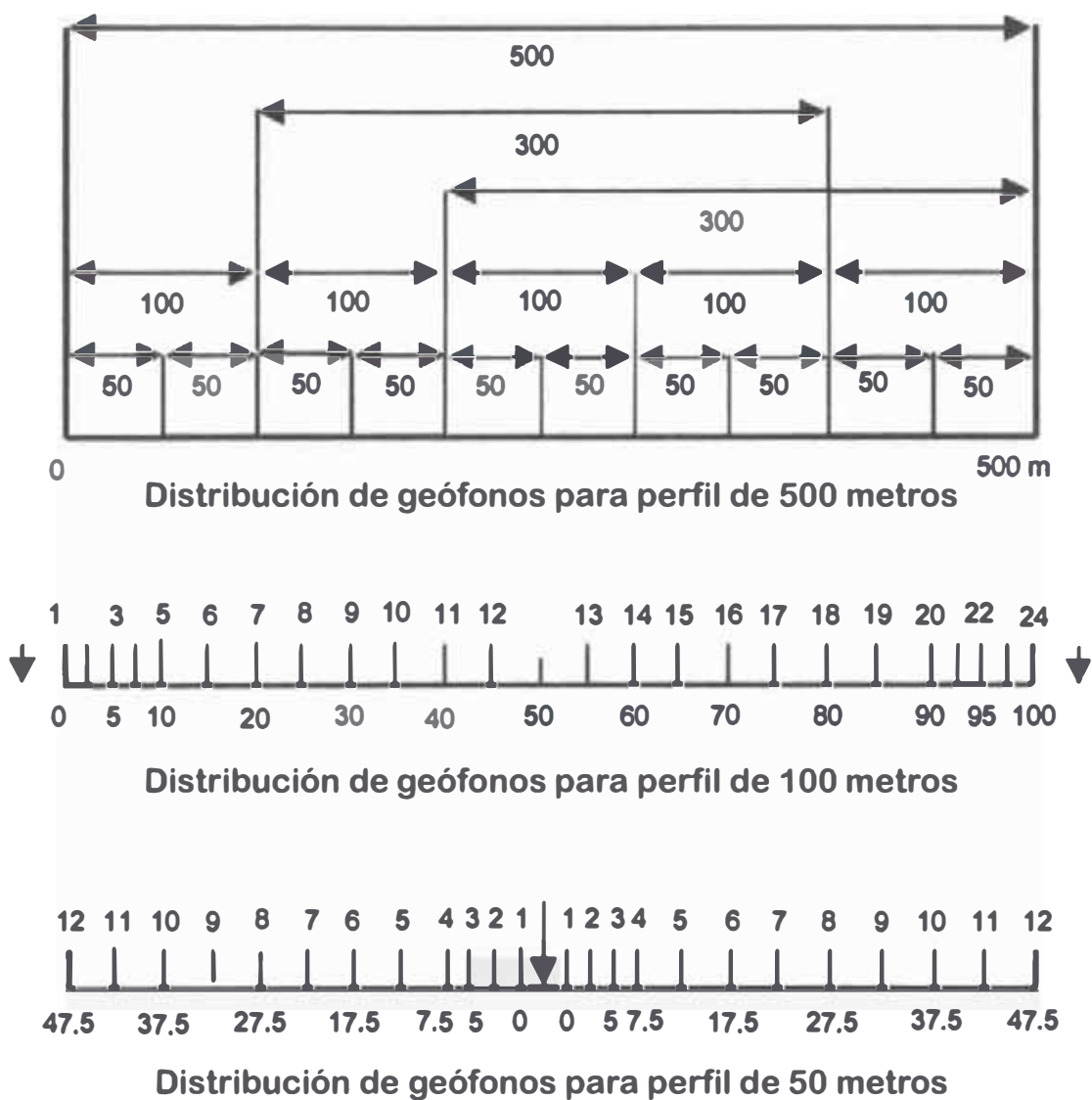


FIG. 49: Cuadro de distribución de perfiles sísmicos

5.3 Problemas Técnicos

Varios fueron los problemas que se presentaron en el trabajo de campo y en el de gabinete.

Entre los principales problemas obtenidos en el campo se tiene:

- I. Pobre acoplamiento generador-suelo y geófono-suelo. Debido al material suelto.
- II. Alta atenuación de las señales sísmicas, tanto de las ondas de corte como de compresión. Ambas causas motivaron un excesivo trabajo de los generadores de onda, que propiciaron finalmente, un retraso significativo en la adquisición de datos en los perfiles de refracción, especialmente en las últimas tendidas.
- III. Las condiciones meteorológicas de la zona que fueron inclementes, debido a la época de máximo calor en que se desarrollaron los trabajos. (La primera etapa del proyecto se efectuó entre fines de noviembre y mediados de diciembre. La segunda etapa del proyecto se realizó entre fines de febrero y mediados de abril).

Estos problemas redundaron, especialmente, en la baja de calidad de los registros obtenidos en la segunda parte del proyecto.

En cuanto a los problemas que se encontraron en el gabinete, durante el desarrollo del proyecto, se tiene:

- I: El mayor problema fue la disponibilidad y facilidades de los equipos de cómputo. En la época en que se desarrolló el proyecto (1979-1980) sólo se contaba con computadoras “mainframe”, cuyo uso requería de una gran inversión de tiempo y dinero para el procesamiento de los datos.

II: Otro de los grandes problemas que dificultaron y retardaron enormemente el progreso del proyecto fue la producción de las secciones de registro manualmente.

CAPÍTULO VI DETERMINACIÓN DE DENSIDADES

La densidad es una manera de indicar el grado de compactación de un suelo y se puede emplear tanto para suelos naturales como para rellenos compactados.

Conceptualmente la densidad indica el estado de compactación de cualquier tipo de suelo, y por ello, es importante la determinación de las densidades para la construcción de los modelos dinámicos.

Hay que hacer notar que los suelos granulares no permiten la obtención de muestras no perturbadas (a menos que ellas sean obtenidas por procedimientos tan especiales como el congelamiento) por lo que algunas propiedades de ingeniería de estos suelos resultan difíciles de obtener en forma directa.

Las perforaciones, ejecutadas bajo el Rubro: Propiedades Dinámicas de Suelos del Convenio de Cooperación Técnica ODECOB-IGP (Instituto Geofísico del Perú, 1979), no contaban con muestreo suficiente como para determinar, recuperar o reconstruir dichas densidades. En este sentido el experimento fue incompleto.

Para salvar esta dificultad se tuvo que recurrir a diferentes procedimientos para obtener la densidad del “estrato” sísmicamente identificado. Dependiendo del material e información disponible, se han utilizado cinco procedimientos.

6.1 Procedimientos

6.1.1 *Densidad de Campo*

Es la densidad obtenida en el “campo”, que se determina por el simple cociente del volumen entre el peso de la muestra. Operación que se hizo inmediatamente después de sacar las muestras.

Los valores fueron reportados por Romaní - Ingenieros Asociados, contratistas de las perforaciones para las “propiedades dinámicas de los suelos”.

Esta densidad, evidentemente, tiene asociado un error indeterminable debido al posible desconfinamiento en el eje vertical de la muestra.

El rango de la profundidad, en el cual se tomaron muestras de este tipo, es de 0 a 44 m. Se tomaron un total de 28 muestras en los 8 pozos. (Fig. 50)

6.1.2 *Densidades de Laboratorio*

Las densidades fueron calculadas en el laboratorio, utilizando las muestras que se obtuvo en los tubos Shelby.

Estas densidades fueron determinadas en los laboratorios de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Agraria. No se ha aplicado ninguna corrección.

Se ha contado con un total de 7 muestras para 6 pozos. No habiéndose tomado muestra alguna en los pozos 2 y 6.

6.1.3 *Densidad de Campo y Laboratorio*

Este tipo de densidad es la calculada sobre la base del número de golpes de la penetración estándar (datos de campo), contenido de humedad, y las densidades máximas y mínimas obtenidas en el laboratorio.

POZO N° 6 ZONA INDUSTRIAL COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

PROFUNDIDAD 25.08 m.

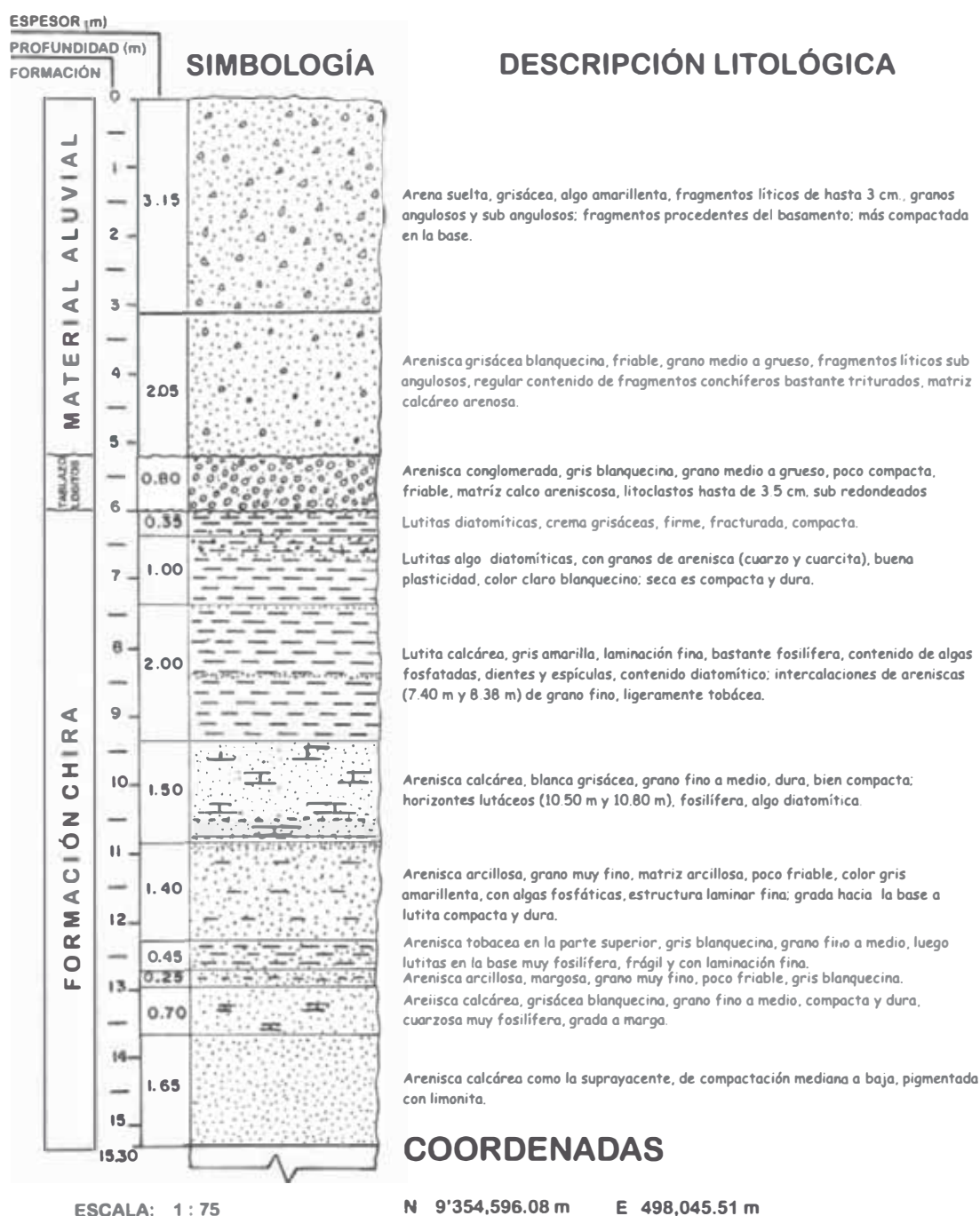


FIG. 50: Descripción Litológica del Pozo N° 6

Las densidades extremas se determinaron utilizando las muestras tomadas de los testigos recuperados en las perforaciones de los pozos (la perforación fue con broca diamantina).

El procedimiento utilizado es el siguiente:

- I. En base del número de golpes de los ensayos de penetración estándar (n) y la granulometría del horizonte, se obtiene la densidad relativa D_r de las Curvas de Lambe.
- II. Determinación en el Laboratorio de las densidades extremas: máxima ($D_{máx}$) y mínima ($D_{mín}$). Estas densidades fueron determinadas en el Laboratorio de Suelos y Rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- III. Con los valores obtenidos en I y II se calcula la densidad natural “ D_n ”, según la fórmula:

$$D_n = \frac{D_{mín} \times D_{máx}}{D_{máx} - D_r (D_{máx} - D_{mín})}$$

(Lambe & Whitman, 1969)

- IV. La densidad natural, finalmente, se obtiene corrigiendo D_n por la cantidad de humedad (W) en por ciento, mediante la fórmula:

$$D = D_n (1 + W/100)$$

6.1.4 Densidad por Correlación

Esta densidad se ha determinado en base de una correlación aproximada entre el número de golpes de los ensayos de penetración estándar (n), la granulometría de los horizontes, y la posición estratigráfica del horizonte en la columna de suelos.

Para algunos de estos horizontes se contó con pesos específicos.

Esta densidad aparece, por lo general, para el primer “estrato” en los modelos.

6.1.5 Densidad por Velocidad de Ondas de Compresión

El quinto tipo de densidad, que aparece en los modelos dinámicos es la determinada en base de la correlación entre las velocidades de propagación de las ondas compresionales y las densidades determinadas por los procedimientos anteriores.

Dicha correlación se presenta en la Fig. 51. En esta figura, el rango de velocidades, a una desviación estándar de confianza, se indica por medio de barras horizontales. Los valores promedios de dichas velocidades se indican por los puntos sólidos sobre la barra.

La solución por mínimos cuadrados se indica por la línea continua. La ecuación por regresión es:

$$D = 1.56 + 2.82 \times 10^{-4} \bar{V}_p$$

Donde D es la densidad, y \bar{V}_p las velocidades de propagación promedio de las ondas P en m/seg.

El uso de esta fórmula para el cálculo de densidades en base de las velocidades de las ondas de compresión, sólo se debe aplicar a la zona de estudio: Área Industrial de Bayóvar.

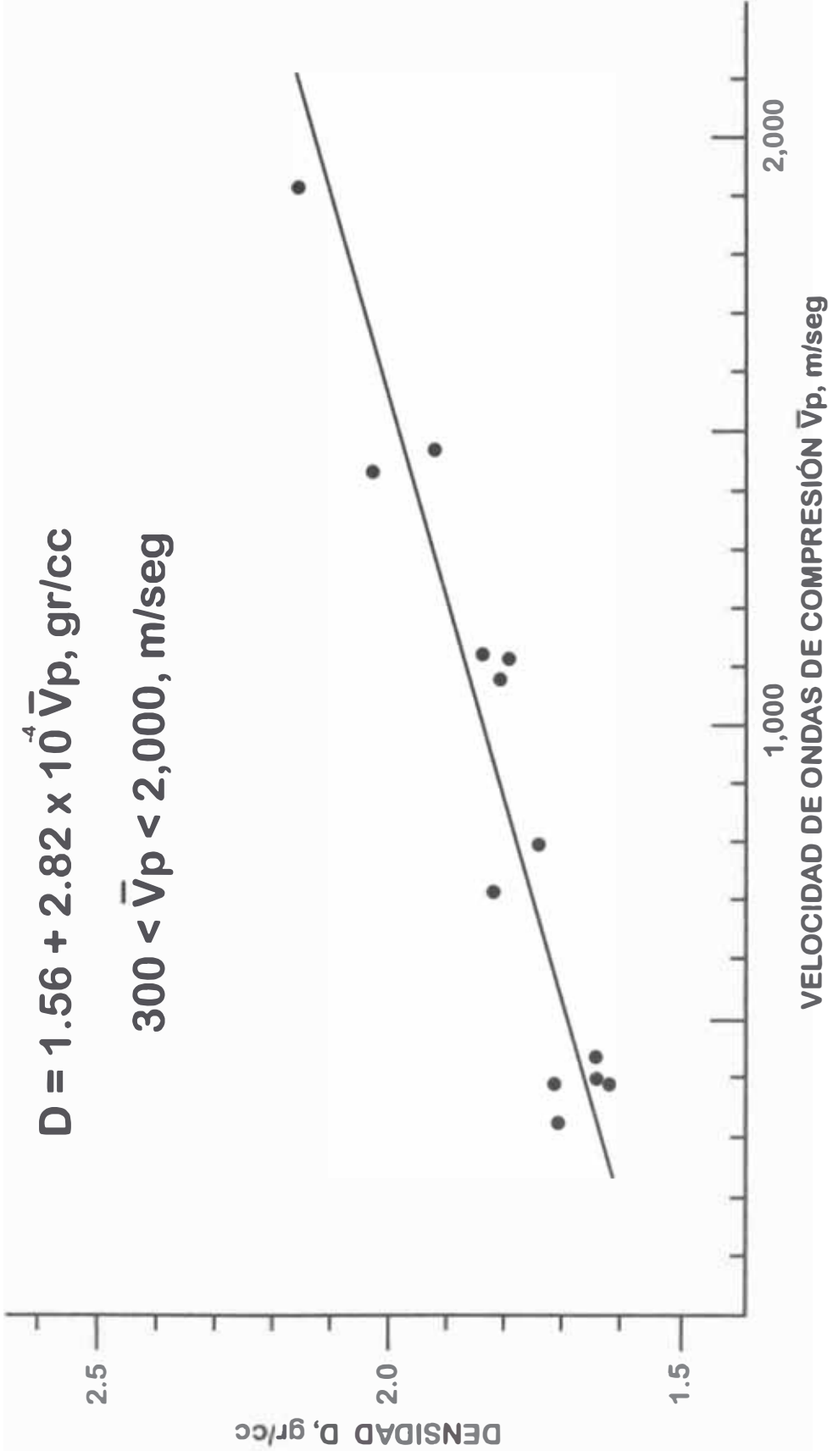


FIG. 51: Relación entre densidad y el promedio de la velocidad de propagación de las ondas de compresión para el Área Industrial de Bayóvar: material clástico, Cuaternario-Terciario. El rango de aplicación de los coeficientes de regresión es para velocidades entre 300 y 2000 m/seg.

6.2 Representatividad

A pesar de haber logrado obtener densidades para las muestras tomadas en un determinado estrato, la pregunta de la representatividad de los valores obtenidos de la unidad identificada sísmicamente, surge.

En los trabajos de perforación no se han tomado muestras sistemáticas en función de la profundidad. Los puntos muestreados en este proyecto fueron muy infrecuentes. Por lo tanto, las densidades derivadas totalmente de las muestras de sedimentos tomadas durante la perforación, y asumida como representativa para el “estrato sísmico”, debe tomárseles con reserva. Pero siendo éstos los únicos datos disponibles, no queda otra alternativa.

Es, sin embargo, interesante la correlación que existe entre la densidad y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de compresión (ondas P). Estas sí tienen representatividad para el “estrato sísmico” por cuanto la velocidad es la promedio para dicho estrato. Sin embargo, se tienen pocos puntos. Es de esperarse que en el futuro pueda mejorarse el grado de confianza de los parámetros de la función de regresión.

Otro punto que merece mencionarse, es el relacionado a las condiciones “in situ”. Las densidades determinadas en el laboratorio y las obtenidas en el “campo”, son densidades para muestras alteradas y a condiciones ambientales de superficie.

Este último aspecto parece ser particularmente importante en el material expansivo, por cuanto, al sacar la muestra, ésta sufre alteraciones y en forma drástica, sobre todo en lo concerniente a las condiciones de humedad.

CAPÍTULO VII

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL MODELAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO

7.1 Velocidades de las Ondas de Compresión

Los promedios de las velocidades de las ondas de compresión obtenidos para el Área Industrial de Bayóvar varían entre 300 m/seg y 2000 m/seg. Los promedios de las velocidades obtenidas, teniendo en cuenta los procedimientos señalados en el Capítulo 5, se muestran en la Tabla 7.1

7.2 Velocidades de las Ondas de Corte

Los promedios de las velocidades de las ondas de corte varían desde 119 m/seg hasta 1331 m/seg. Estos valores concuerdan bastante bien con los valores utilizados por LAGESA (1977) en el modelaje de la respuesta dinámica del suelo-subsuelo del puente Virrilá.

En algunos de los pozos, los límites de los “estratos sísmicos” identificados en base de las ondas de compresión no coinciden con los derivados utilizando la información de las ondas de corte. Este fenómeno es corriente ya que dichas velocidades “miden” diferentes propiedades físicas del material que atraviesan.

Los límites de las interfases de los modelos resultantes, usando las velocidades de las ondas de corte, no son definidos con igual confianza que los de las ondas de compresión. Esto se debe tanto por el contenido de frecuencia de las ondas de corte (más alto que las ondas de compresión), como por la calidad de señal de los arribos (más pobres para las ondas de corte). Los valores de las velocidades seleccionadas corresponden a las calculadas, de las lecturas de arribo de “valle” o “pico”, con menor desviación estándar en la regresión. (Tablas 7.2 y 7.3)

TABLA 7.1
VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS DE
COMPRESIÓN (Vp)

Pozo	Profundidad	Vp Promedio
Nro.	(m)	(m/seg)
1	0.00	709
	4.89	887
2	0.00	496
	3.15	993
	9.38	1667
3	0.00	319
	2.80	887
4	0.00	319
	4.22	922
	8.50	1348
5	0.00	248
	3.00	851
	12.25	1915
6	0.00	567
	4.20	674
	15.50	1844
7	0.00	532
	6.00	780
	31.50	1773
8	0.00	567
	2.00	780
	5.50	1028
	10.30	1312
	29.00	2695
	45.00	4680

TABLA 7.2
VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS DE CORTE (Vs)

Pozo Nro.	Profundidad (m)	Vs	
		Promedio (m/seg)	Rango (m/seg)
1	0.00	148	118 - 200
	4.89	392	384 - 401
2	0.00	199	181 - 221
	2.58	485	465 - 507
3	0.00	182	177-188
	2.60	245	240 - 250
4	0.00	153	148 - 158
	2.25	200	188 - 203
5	0.00	191	185 - 198
	2.60	217	214 - 220
	12.25	322	317 - 327
6	0.00	170	165 - 175
	4.75	371	347 - 399
	9.15	427	417 - 437
	14.95	891	802 - 1002
7	0.00	147	144 - 150
	2.60	456	447 - 466
	31.40	1331	1227 - 1454
8	0.00	119	119 - 120
	1.50	268	259 - 278
	5.20	584	576 - 593
	23.75	328	316 - 340
	33.30	811	791 - 832
	45.00	2630 (*)	

* Valor asignado. (Valor común para esquistos)

7.3 Densidades

La distribución de las densidades con la profundidad se presenta en la Tabla 7.3. Los criterios para la fijación de las interfases se han tenido en cuenta: la estratigrafía de suelo y geológica, las profundidades calculadas en base de la información sísmica.

Los valores obtenidos para el tipo de material encontrado en los pozos son razonables y concuerdan satisfactoriamente con los que LAGESA (1977) utilizó para las cimentaciones del Virrilá. Asimismo, son comparables con los reportados por G. Lotti y Asociados (1979) para los suelos del desierto en Virrilá y Sechura.

7.4 Módulo de Corte

El módulo de corte (G), en el rango elástico, se ha calculado en base de las densidades (D) y las velocidades de propagación de las ondas de corte (V_s), y está dado por:

$$G = D \times V_s^2$$

Los valores, expresados en bars, se presentan en la Tabla 7.4. Los únicos valores con los que se puede comparar son los de LAGESA (1977) para el puente Virrilá. Los valores concuerdan razonablemente.

7.5 Razón de Poisson

La razón de Poisson integra la información que, sobre las propiedades físicas “in situ”, contienen las velocidades de propagación de las ondas sísmicas. Esta constante se calculó en base de la razón (ν), velocidades de las ondas de compresión y de corte; y está dada por:

TABLA 7.3
DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES

Pozo Nro.	Profundidad (m)	Densidades	
		Promedio (gr/cc)	Rango (gr/cc)
1	0.00	1.76 (4)	1.750 - 1.760
	4.89	1.81 (2)	1.730 - 1.869
2	0.00	1.70 (4)	-----
	3.15	1.84 (2)	1.773 - 1.856
	9.38	2.03 (2)	-----
3	0.00	1.65 (4)	-----
	2.80	1.81 (2)	1.763 - 2.149
4	0.00	1.65 (4)	-----
	4.22	1.82 (1)	-----
	8.50	1.94 (1)	-----
5	0.00	1.63 (3)	-----
	3.00	1.80 (2)	1.765 - 1.823
	12.25	2.10 (5)	-----
6	0.00	1.72 (3)	1.712 - 1.727
	4.20	1.75 (3)	-----
	15.50	2.08 (5)	-----
7	0.00	1.71 (3)	-----
	6.00	1.78 (5)	-----
	31.50	2.06 (5)	-----
8	0.00	1.72 (3)	-----
	2.00	1.78 (3)	-----
	5.50	1.85 (3)	-----
	10.30	1.93 (2)	316 - 340
	29.00	2.32 (2)	791 - 832
	45.00	2.88 (6)	-----

(1) Densidades de laboratorio

(4) Densidad por correlación

(2) Densidad de campo

(5) Densidad por velocidad de ondas de compresión

(3) Densidad de campo y laboratorio

(6) Densidad asignada, valor común para esquistos

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{r^2 - 2}{r^2 - 1}$$

Donde:

$$r = V_p / V_s$$

La razón de Poisson varía desde 0.19 hasta 0.49 (Tabla 7.4)

Considerando el tipo de material, estos valores extremos no son irrazonables, como se puede ver en la Fig. 52.

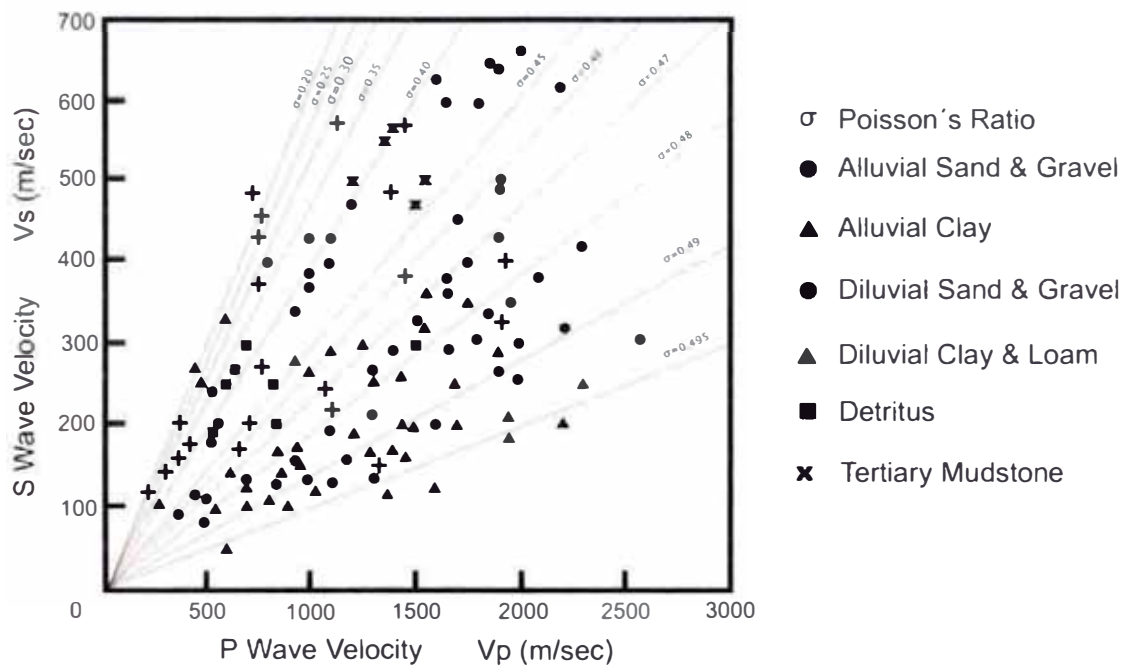


FIG. 52: Relación entre las velocidades de propagación de las ondas de compresión (V_p) y las ondas de corte (V_s) para el Japón (Imai and Masayoshi, 1975). Los “+” indican los valores obtenidos para los sedimentos clásticos en el Área Industrial de Bayóvar

7.6 Módulos de Elasticidad e Incompresibilidad

Además del módulo de corte y la razón de Poisson, se calculó los módulos de Young: elasticidad (E), y el de incompresibilidad (K) con el fin de hacer una interpretación integral, en una etapa posterior, del comportamiento mecánico de cada sitio en investigación.

El módulo de Young se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$E = 2 G (1 + \sigma),$$

Donde: G es el módulo de corte y σ es la razón de Poisson

El módulo de incompresibilidad (K), se calculó mediante la relación:

$$K = \frac{1}{3} \frac{E}{1 - 2\sigma}$$

Los valores de ambos módulos calculados para cada pozo se presentan en la Tabla 7.5, en bars.

TABLA 7.4
DISTRIBUCIÓN EN PROFUNDIDADES DE LOS MÓDULOS DE CORTE
Y RAZÓN DE POISSON

		Módulo de corte				Razón de Poisson
Pozo	Profundidad	Promedio	Rango	Pozo	Profundidad	Promedio
Nro.	(m)	(bar)	(bar)	Nro.	(m)	(bar)
1	0.00	384	244 - 702	1	0.00	0.49
	4.89	2781	2669 - 2910		2.85	0.49
2	0.00	672	556 - 829	2	0.00	0.3
	2.86	4335	3985 - 4737		2.46	0.12
	9.38	4773	4387 - 5215		9.55	0.44
3	0.00	546	517 - 583	3	0.00	0.4
	2.70	1087	1043 - 1132		2.65	0.47
4	0.00	386	361 - 412	4	0.00	0.42
	2.25	660	583 - 749		2.25	0.34
	4.22	728	643 - 826		3.70	0.4
	8.50	776	686 - 880			
5	0.00	595	558 - 639	5	0.00	0.34
	2.80	847	823 - 870		2.60	0.48
	12.25	2177	2110 - 2246		12.25	0.49
6	0.00	497	468 - 526	6	0.00	0.37
	4.47	2404	2103 - 2781		2.15	0.47
	9.15	3185	3038 - 3336		5.12	0.36
	15.22	16513	13379 - 20883		9.15	0.29
					15.35	0.35
7	0.00	370	355 - 385	7	0.00	0.37
	2.60	3558	3419 - 3715		2.70	0.24
	6.00	3701	3557 - 3865		31.55	
	31.45	36494	21014 - 43551			
8	0.00	246	244 - 248	8	0.00	0.29
	1.75	1276	1192 - 1373		1.50	0.43
	5.35	6292	6121 - 6488		5.35	0.31
	10.30	6569	6390 - 6773		10.20	0.42
	23.75	2072	1923 - 2226		23.25	0.32
	29.00	2500	2321 - 2687		27.50	0.47
	33.30	15285	14541 - 26087		33.30	0.26
	45.00	199207			37.10	0.39
			45.35	0.29		

Profundidad promedio de Vs y D para el módulo de corte y de Vs y Vp para la razón de Poisson.

TABLA 7.5
DISTRIBUCIÓN DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD
E INCOMPRESIBILIDAD CON LA PROFUNDIDAD

		Módulo de Elasticidad				Modulo de Incompresibilidad	
Pozo	Profund.	Promedio	Rango	Pozo	Profund.	Promedio	Rango
Nro.	(m)	(bar)	(bar)	Nro.	(m)	(bar)	(bar)
1	0.00	1144	728 - 2092	1	0.00	19066	12137 - 34850
	2.85	1150	731 - 2102		2.85	63888	40611 - 116778
	4.89	8232	7900 - 8615		4.89	68600	65833 - 71791
2	0.00	1747	1446 - 2156	2	0.00	1456	1205 - 1796
	2.75	9710	8526 - 10612		2.75	4258	3915 - 4654
	9.46	13746	12635 - 15021		9.46	38183	35097 - 41725
3	0.00	1529	1447 - 1633	3	0.00	2548	2412 - 2722
	2.70	3196	3066 - 3325		2.70	17756	17033 - 18472
4	0.00	1096	1025 - 1170	4	0.00	2283	2135 - 2438
	2.25	1769	1562 - 2007		2.25	1843	1627 - 2091
	3.96	2126	1878 - 2412		3.96	8858	7825 - 10050
	8.50	2266	2003 - 2570		8.50	9442	8346 - 10708
5	0.00	1595	1495 - 1715	5	0.00	1661	1557 - 1786
	2.80	2507	2436 - 2575		2.80	20892	20300 - 21458
	12.25	6487	6288 - 6693		12.25	108117	104800 - 111550
6	0.00	1362	1200 - 1441	6	0.00	1746	1538 - 1851
	2.15	1461	1376 - 1546		2.15	8117	7644 - 8589
	4.85	6539	5720 - 7564		4.85	7785	6810 - 9005
	9.15	8211	7832 - 8600		9.15	6517	6216 - 6825
	15.40	44519	36070 - 56301		15.40	49466	40078 - 62557
7	0.00	1014	973 - 1055	7	0.00	1300	1247 - 1353
	2.70	8824	8479 - 9213		2.70	5656	5435 - 5906
	6.00	9178	8821 - 9585		6.00	5883	5654 - 6144
8	0.00	635	628 - 640	8	0.00	504	498 - 508
	1.75	3649	3409 - 3927		1.75	8688	8117 - 9350
	5.35	16485	16031 - 16999		5.35	14461	14062 - 14911
	10.25	18656	18148 - 19235		10.25	38867	37808 - 40073
	23.25	5470	5076 - 5877		23.25	5065	4700 - 5442
	27.50	6092	5654 - 6544		27.50	33844	31411 - 36356
	29.00	7350	6821 - 7900		29.00	40833	37894 - 43889
	33.30	38518	36643 - 40539		33.30	26749	25447 - 28152
	37.10	42492	40424 - 44722		37.10	64382	61248 - 67761
45.35	513954		45.35	407900			

Profundidad promedio de Vs, Vp y D.

CAPÍTULO VIII MODELOS DINÁMICOS DEL SUELO

8.1 Modelo Dinámico

El promedio de los parámetros de los modelos dinámicos para los ocho pozos, se presentan en la Tabla 8.1

Se considera éste como el que describe más aproximadamente las propiedades físicas generalizadas de cada horizonte identificado (estratos).

Los horizontes se identifican por los siguientes parámetros básicos:

- Velocidades de las ondas de corte
- Densidad
- Módulo de corte.

El número posible de modelos, tomando en cuenta los rangos de variación, de por lo menos una desviación estándar, es muy grande. Se puede pretender resolver dicho problema por la técnica de Montecarlo o similares. Sin embargo, considerando lo poco que se conoce del parámetro de densidad y otros parámetros que entran en el modelaje, el modelo que se presenta se considera satisfactorio para obtener una simulación matemática, de la respuesta del sitio ante probables sollicitaciones sísmicas, representativa del área vecina a cada pozo.

Para completar la descripción del modelo dinámico para cada uno de los 8 pozos estudiados, en la Tabla 8.2 se presentan, en forma resumida, los correspondientes módulos de elasticidad, incompresibilidad y la razón de Poisson promedios, a diferentes profundidades.

Finalmente, como complemento de este capítulo, se indica secuencialmente el procedimiento para la obtención de la velocidad de propagación promedio (Tabla 8.3), así como de los modelos matemáticos usados para la obtención de los parámetros (constantes elásticas) que describen las características físicas del suelo (Tabla 8.4).

TABLA 8.1
PARÁMETROS BÁSICOS PROMEDIOS

POZO Nro.	PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (m/seg)	DENSIDAD (gr/cc)	MÓDULO DE CORTE (bar)
1	0.00	148	1.76 (4)	384
	4.89	392	1.81 (2)	2781
2	0.00	199	1.70 (4)	672
	2.86	485	-----	4335
	3.15	-----	1.84 (2)	-----
	9.38	-----	2.03 (2)	4773
3	0.00	182	1.65 (4)	546
	2.70	245	1.81 (2)	1087
4	0.00	153	1.65 (4)	386
	2.25	200	-----	660
	4.22	-----	1.82 (1)	728
	8.50	-----	1.94 (1)	776
5	0.00	191	1.63 (3)	595
	2.80	217	1.80 (2)	847
	12.25	322	2.10 (5)	2177
6	0.00	170	1.72 (3)	497
	4.47	371	1.75 (3)	2404
	9.15	427	-----	3185
	15.22	891	2.08 (5)	16513
7	0.00	147	1.71 (3)	370
	2.60	456	-----	3558
	6.00	-----	1.78 (5)	3701
	31.45	1331	2.06 (5)	36494
8	0.00	119	1.72 (3)	246
	1.75	268	1.78 (3)	1276
	5.35	584	1.85 (3)	6292
	10.30	-----	1.93 (2)	6569
	23.75	328	-----	2072
	29.00	-----	2.32 (2)	2500
	33.30	811	-----	15285
	45.00	2630 (*)	2.88 (6)	199207

* Valor asignado. (Valor común para esquistos)

TABLA 8.2
PARÁMETROS QUE COMPLETAN LA DESCRIPCIÓN

POZO Nro.	PROFUNDIDAD (m)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (bar)	MÓDULO DE INCOMPRESIBILIDAD (bar)	RAZÓN DE POISSON (bar)
1	0.00	1144	19066	0.49
	2.85	1150	63888	0.49
	4.89	8232	68600	0.48
2	0.00	1747	1456	0.30
	2.75	9710	4258	0.12
	9.46	13746	38183	0.44
3	0.00	1529	2548	0.40
	2.70	3196	17756	0.47
4	0.00	1096	2283	0.42
	2.25	1769	1843	0.34
	3.96	2126	8858	0.40
	8.50	2266	9442	-----
5	0.00	1595	1661	0.34
	2.80	2507	20892	0.48
	12.25	6487	108117	0.49
6	0.00	1362	1746	0.37
	2.15	1461	8117	0.48
	4.85	6539	7785	0.36
	9.15	8211	6517	0.29
	15.40	44519	49466	0.35
7	0.00	1014	1300	0.37
	2.70	8824	5656	0.24
	6.00	9178	5883	-----
8	0.00	635	504	0.29
	1.75	3649	8688	0.43
	5.35	16485	14461	0.31
	10.25	18656	38867	0.42
	23.25	5470	5065	0.32
	27.50	6092	33844	0.47
	29.00	7350	40833	-----
	33.30	38518	26749	0.26
	37.10	42492	64382	0.39
	45.35	513954	407900	0.29

TABLA 8.3

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN PROMEDIO

Ecuación de regresión lineal utilizada para los n-pares de tiempo-profundidad (t_j, Z_j) :	$t(Z_j) = a + b(Z_j - \bar{Z})$ $j = 1, \dots, N$
Donde:	$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_j, \quad y \quad a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j,$
El tiempo de "intercepción" está dado por:	$\sum_{j=1}^N t_j - b \bar{Z}$
La pendiente está dada por:	$b = \sum_{j=1}^N w_j t_j,$
Donde:	$w_j = (Z_j - \bar{Z})/R, \quad y \quad R = \sum_{j=1}^N (Z_j - \bar{Z})^2$
La Velocidad Promedio está dada por:	$\bar{V} = 1/b$
La Desviación Estándar para la pendiente está dada por:	$S_b = \frac{1}{(N-2)R} \sum_{j=1}^N (t_j - t(Z_j))^2$
El rango de confianza para una desviación estándar es:	$(b - S_b), (b + S_b)$
Los rangos de variación de velocidad a una desviación estándar corresponden a la inversa de los límites del coeficiente de regresión "b":	$\left(\frac{1}{b + S_b}, \frac{1}{b - S_b} \right)$

TABLA 8.4

**MODELOS MATEMÁTICOS USADOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS
PARÁMETROS DE LOS MODELOS DINÁMICOS DEL SUELO**

DENSIDAD NATURAL	$D_n = \frac{D_{min} \times D_{máx}}{D_{máx} - D_r (D_{máx} - D_{mín})}$
DENSIDAD NATURAL CORREGIDA	$D = D_n (1 + W/100)$
MÓDULO DE CORTE	$G = D \times V_s^2$
RAZÓN DE POISSON	$\sigma = \frac{1}{2} \frac{r^2 - 2}{r^2 - 1}$
RAZÓN DE VELOCIDADES	$r = V_p / V_s$
MÓDULO DE ELASTICIDAD	$E = 2 G (1 + \sigma),$
MÓDULO DE INCOMPRESIBILIDAD	$K = \frac{1}{3} \frac{E}{1 - 2 \sigma}$

CONCLUSIONES

La sistemática seguida para la obtención de los parámetros de los modelos dinámicos no es la convencional, por cuanto se aparta de procedimientos normales seguidos para estudios de este tipo. El esfuerzo ha sido dirigido hacia la obtención de dichos parámetros en base a observaciones en el lugar, o de muestras procedentes de los estratos que se han estudiado.

Han sido particularmente beneficiosas las experiencias previas en la determinación de velocidades de ondas de corte utilizando el método de superposición de los registros (uno de ellos invertido) de impactos horizontales a un durmiente acoplado al suelo.

De estas experiencias, se concluyó que las interpretaciones de las fases asociadas con los primeros arribos de las ondas SH, por la simetría de los arribos, no son confiables, por cuanto podría confundirse las SH-directas con fases convertidas en el camino de recorrido de las ondas o fases generadas en la vecindad del geófono.

El procedimiento empleado, i.e., inversión de la dirección de impacto e inversión de polaridad del sensor, observando la simetría tanto del generador como la del terreno, en lo posible, y sobre todo, manteniendo el eje del sensor transversal

paralelo a la dirección del generador, ha logrado resolver el problema de la contaminación.

Por esta razón, los registros de los arribos obtenidos para las ondas de corte, cuando el acoplamiento fue razonable y la atenuación no muy alta, son claros. La presencia de ondas convertidas se puede apreciar en aquellos registros en que el eje del sensor no estuvo bien orientado.

Desafortunadamente, debido a la fatiga por el prolongado trabajo y a la vejez de los neumáticos utilizados para acoplar la sonda a los tubos de PVC, se tuvo que cambiar a un sistema de acoplamiento del tipo mecánico. Los resultados de este cambio fueron desfavorables; por cuanto aumentó el nivel de ruido sísmico y desmejoró el acoplamiento.

Además, el acoplamiento de tipo mecánico que se usó en reemplazo del neumático, propició que el grado de dificultad para orientar el geófono en el pozo sea mayor. Esto resultó en un desmejoramiento de la calidad de registros obtenidos y obligó a disminuir la razón de muestreo en los pozos con profundidades mayores a los 30 m.

Evaluando el rendimiento general de los generadores de ondas sísmicas, se encuentra que el generador vertical (generador de ondas de compresión), produce ondas de frecuencias suficientemente altas como para poder resolver estratos delgados. En cambio el generador de ondas horizontales (generador de ondas de corte), requiere de mejoramiento en este sentido. A pesar de esta desventaja, la señal resultante es satisfactoria para obtener los resultados que demandan este tipo de estudio.

La metodología empleada en el procesamiento y análisis de datos se considera efectiva. El presente proyecto se ha beneficiado de la metodología, programas de cómputo digital y experiencia acumulada a través de los años de trabajos en el Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico de la OEA y en particular, de lo concerniente al diseño, desarrollo, construcción e implementación del Sistema de Prospección Sísmica - DICGA.

Sin este sistema el trabajo hubiera sido imposible de realizar. La aplicación de procedimientos de tratamiento a la presentación de datos utilizados en los trabajos de exploración de la corteza terrestre, han beneficiado el desarrollo de la metodología aquí adquirida.

Es importante mencionar que las secciones de registro, que resultan ser de vital importancia para la interpretación y análisis, se han hecho a mano en base a los registros analógicos en papel. Las secciones de registro han sido satisfactorias para los fines requeridos, aunque han consumido muchas horas-hombre en su elaboración.

En conclusión, el equipamiento y procedimiento de campo utilizados en este proyecto se consideran satisfactorios.

La interpretación integrada de la información de mecánica de suelos, la observación geológica, y los resultados de la geofísica, han permitido obtener modelos del suelo-subsuelo para cada pozo que describe razonablemente sus propiedades físicas y permitirán simular matemáticamente, con mucha aproximación, su comportamiento dinámico a diferentes niveles de deformación causados por los sismos.

BIBLIOGRAFÍA

- Bengt Sjögren, Shallow Refraction Seismics, 1984.
- Cantos Figueroa, Tratado de Geofísica Aplicada, 1974.
- Imai, T., and M. Yoshimura, The relation of mechanical properties of soils to P and S waves velocities for soils ground in Japan, OYO Technical note, 1975.
- Instituto Geofísico del Perú, Estudio de Riesgo Sísmico y Microzonificación de la Zona de Bayóvar, 1976.
- Instituto Geofísico del Perú, Informe propiedades mecánicas de los suelos, Informe presentado a ODECOB, 1979.
- Instituto Geofísico del Perú, Informe propiedades mecánicas de los suelos, Anexo I-B: Registro de mecánica de suelos en perforaciones, 1979.
- Instituto Geofísico del Perú, Informe Técnico de la Operación y Desarrollo de Sistemas Digitales de Datos, para el Proyecto de Microzonificación Sísmica del Área de Bayóvar, 1979.
- Instituto Geofísico del Perú, Informe Técnico Final de la Operación y Desarrollo de Sistemas Digitales de Datos, para el Proyecto de Microzonificación Sísmica del Área de Bayóvar, 1980.
- Lagesa (Laboratorio Geotécnico, S.A.), Estudio de la cimentación del puente Virrilá: A.- Estudio de mecánica de suelos, B.- Estudio sísmico, Informe Técnico N° 009-77 del Organismo de Desarrollo del Complejo Bayóvar (ODECOB), 1977.
- Lambe y Whitman, Soil mechanics, J. Wiley and Sons, Inc., 1969.

- Lotti, C., E. Ass., Estudio de factibilidad del sistema general de abastecimiento de agua dulce a Bayóvar, Vol. I: Memoria Resumen, Conclusiones y Estudios Básicos - Informe Definitivo, 1979.
- Lotti, C., E. Ass., Estudio de factibilidad del sistema general de abastecimiento de agua dulce a Bayóvar, Vol. VI: Anexos, Los estudios geotécnicos, Informe Definitivo, 1979.
- Steinhart, J., and R. P. Meyer, Explosion Seismology, CIW, 1960.
- <http://plata.uda.cl/minas/apuntes/geologia/geologiageneral/ggcap01c.htm>, Métodos Geofísicos, W. Griem & S. Griem-Klee, 1999, Universidad de Atacama.
- <http://www.prodigyweb.net.mx/pcacapulco/sismos.htm>, Dónde nacen los Sismos.
- <http://www.ua.es/ursua/ondas.htm>, Ondas Sísmicas, David López Ibarra, 1997.
- <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch2.html>, Segunda versión de Terremotos y Ondas Sísmicas.
- <http://www.lafacu.com/apuntes/geologia/sismologia/>, Sismología, Ciencia que estudia los terremotos.
- <http://www.geofisica.cl/visit.htm>, Geophysics Web Page.
- <http://www.monografias.com/trabajos3/sismo/sismo.shtml>, Monografias.com – Sismología.