

INFORME CIENTIFICO DE INVESTIGACION

I. TITULO

Estudio de microzonificación sísmica: experiencias en Aiquile, Bolivia

II. AUTORES

Ing. Daniel Verástegui F.

Estudiante de postgrado en ingeniería geotécnica, Universidad de Gante, Bélgica

M.Sc. Ing. Mauricio Salinas P.

Director Centro de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Bolivia

Prof. Dr. Ing. William Van Impe

Director Laboratorio de Mecánica de Suelos, Universidad de Gante, Bélgica

III. UNIDAD DE INVESTIGACION

Centro de Geotecnia

Facultad de Ciencias y Tecnología

Universidad Mayor de San Simón

IV. ANTECEDENTES

Los sismos son eventos producidos por fuerzas naturales generadas en el interior del planeta Tierra, han ocurrido en el pasado y, a medida que la población mundial se incrementa, muchos más serán reportados en el futuro.

Por lo tanto, es muy importante determinar las características de propagación de las ondas y la influencia que tienen en el suelo y estructuras. La ingeniería sísmica en geotecnia tiene como objetivo analizar tal comportamiento.

La posición geográfica de Bolivia hace que se constituya en una zona de sismicidad considerable. A pesar de ello, el conocimiento respecto al comportamiento de los depósitos de suelo bajo la acción dinámica de los sismos es aun reducido en el país.

IV.1 Descripción del área de estudio

La población de Aiquile se encuentra ubicada en la parte sur del departamento de Cochabamba y pertenece a la provincia General Narciso Campero, como capital de la misma.

El área urbana no presenta grandes diferencias en su topografía, ya que se encuentra en un valle, limitado por montañas por el norte y hacia el oeste, de la misma manera está limitada por dos ríos tanto al norte como al este. La altitud promedio de la zona de estudio es de 2242 m.s.n.m.. La figura 1 muestra el área urbana y la topografía de la zona.



Figura 1. Plano urbano y topográfico de Aiquile.

IV.II Características sismológicas del área de estudio

Según una publicación del Observatorio de San Calixto (Cabr  y Vega, 1989), durante el año 1983 se registraron 206 sismos de magnitud mayor a 3 en la escala de Richter, en el territorio boliviano. De estos, 181 con magnitud en el rango de 3 a 4, 19 de magnitud 4 a 4.5 y 6 de magnitud entre 4.5 y 5.

Esto indica que el peligro de que ocurran terremotos no es despreciable. Si bien Bolivia no ha sufrido graves catástrofes como Chile, Perú o México, ha tenido una gran actividad sísmica.

Los datos registrados como producto de tal actividad, fueron analizados y llevados a mapas sísmicos provisionales, elaborados por el Observatorio de San Calixto. La figura 2a muestra la magnitud máxima esperada según datos de diez años, asimismo la figura 2b muestra la intensidad máxima probable para un período de cien años, dentro del territorio boliviano.

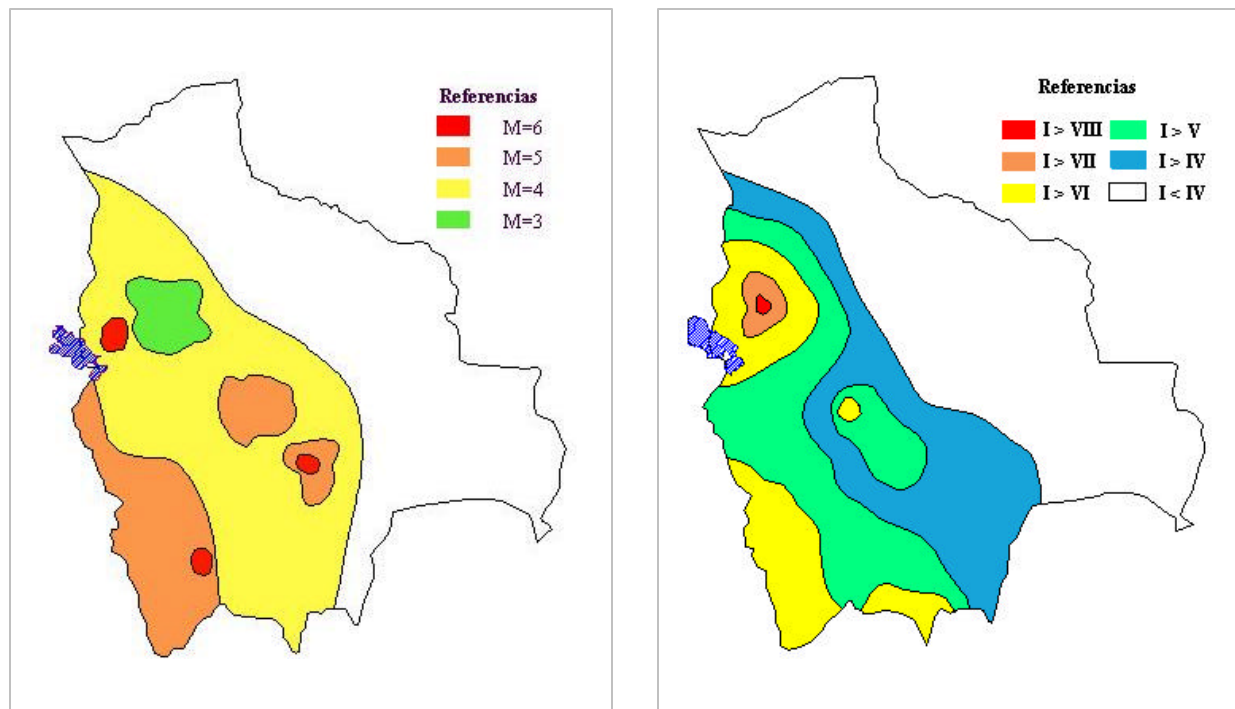


Figura 2. (a) Magnitud máxima esperada (M). (b) Intensidad máxima probable (I).

(Cabré, 1983)

De las figuras 2a y 2b se puede concluir que la zona de mayor riesgo corresponde al valle de Cochabamba, alrededor de 17° de latitud sur y 65° de longitud oeste, donde se debe esperar un sismo de magnitud 5.2 cada diez años. Se puede observar también que la mayor intensidad probable en el valle de Cochabamba alcanza el grado VI, en la escala de Mercalli Modificada.

La localidad de Aiquile pertenece al valle de Cochabamba y se constituye en una región sísmica, por tanto, sufrió varios eventos sísmicos en este siglo. La tabla 1 muestra algunos de ellos.

Tabla N°1

Eventos sísmicos en Aiquile.

Fecha	Magnitud (M)
25 de octubre, 1925	5.2
1 de septiembre, 1958	5.9
22 de febrero, 1976	5.2
22 de mayo, 1998	6.8

Fuente: Observatorio de San Calixto (1999).

El sismo de Mayo de 1998 se produjo alrededor de las 00:40 horas. La ubicación del foco no es precisa debido a la susceptibilidad del método de localización, pero se presume que la distancia al epicentro fue de 60 km y la profundidad al foco de 13 km.

IV.III Daño estructural el 22 de mayo de 1998

La localidad de Aiquile presentaba, en general, construcciones de 1 a 3 niveles, de las cuales, un gran número fueron construidas de adobe, principalmente en los sectores norte y sur.

Las construcciones destinadas al comercio (que predominan sobre la avenida central) fueron construidas con ladrillo y muchas de ellas, con refuerzo de hormigón armado.

Según datos del Ministerio de Vivienda, Aiquile contaba con 1130 viviendas de las cuales 520 quedaron totalmente destruidas o tuvieron que ser demolidas, 332 sufrieron daños reparables y 278 quedaron intactas, definiéndose zonas bien diferenciadas.

Días después del terremoto, la Universidad Mayor de San Simón y la Dirección de Interacción Social Universitaria (D.I.S.U) llevaron a cabo un sondeo en toda el área afectada, con el objeto de evaluar los destrozos ocasionados. Los resultados de este trabajo se muestran en la figura 3. La zona más oscura representa el área más afectada (casas totalmente destruidas), la cual está rodeada por el sector donde se registraron daños parciales. La zona más clara comprende las edificaciones donde el daño fue casi inapreciable.

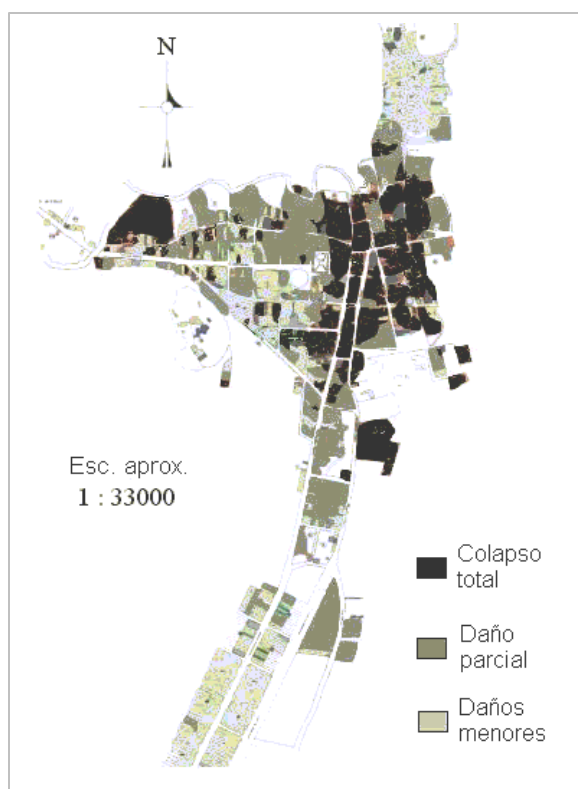


Figura 3. Distribución observada de daños sísmicos (DISU, UMSS).

V. OBJETIVOS

El objetivo general de la investigación es iniciar la planificación del desarrollo urbano y uso de terreno, en cuanto a riesgo sísmico se refiere. El trabajo fue desarrollado en la población de Aiquile, con los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un estudio de microzonificación sísmica para Aiquile.
- Evaluar la aplicabilidad de la prueba del análisis espectral de ondas superficiales (SASW) para la determinación de parámetros dinámicos del suelo.
- Determinar la correlación entre parámetros dinámicos (velocidad de propagación de ondas de corte) y el número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT) para los suelos de Aiquile.

VI. HIPOTESIS

El trabajo de microzonificación sísmica se constituye en una actividad multidisciplinaria, que incluye la participación de distintas ramas de la ciencia como ser, la ingeniería geológica, ingeniería geotécnica y la ingeniería sísmica.

El presente trabajo de investigación ha sido realizado únicamente sobre la base de los principios geotécnicos, debido a la carencia de datos geológicos y sismológicos adecuados para un estudio de esta naturaleza. En este sentido, se adoptó como hipótesis que la localidad de Aiquile se ubica en una zona sísmicamente activa y que el último sismo ocurrido se constituye en un evento característico de la zona.

VII. MARCO TEORICO

VII.I Ondas sísmicas

Cuando ocurre un sismo, una cantidad enorme de energía es liberada en forma de ondas de deformación que se propagan desde el foco. Debido a que la magnitud de tales deformaciones es pequeña, se asume que las mismas son elásticas y de este modo las

velocidades de propagación de ondas están relacionadas al módulo elástico y a la densidad de los materiales a través de los que la onda viaja.

Las ondas sísmicas se clasifican según su naturaleza en ondas de cuerpo, ya que pueden viajar a través del cuerpo del material, y ondas de superficie, ya que su campo de acción se restringe a la superficie.

Las ondas de cuerpo se clasifican a su vez en ondas P (ondas de compresión) y ondas S (ondas de corte). Las ondas P producen un desplazamiento de partículas en la dirección de propagación del tren de ondas, mientras que las ondas S producen un desplazamiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación.

Las ondas de superficie se subdividen a su vez en ondas Love y ondas Rayleigh. Las ondas Love producen un desplazamiento de lado a lado sobre un plano horizontal y en sentido perpendicular a la dirección de propagación, mientras que las ondas Rayleigh producen un desplazamiento similar al de las olas del mar.

El método del análisis espectral de ondas superficiales utiliza los registros de ondas Rayleigh, para la determinación de los parámetros dinámicos.

VII. II Exploración geotécnica

La exploración geotécnica es el proceso en el que se recopila datos geológicos y/o geotécnicos de importancia para el desarrollo del proyecto. Esta incluye la realización de pruebas en campo y laboratorio.

Para el desarrollo del presente proyecto, se realizaron ensayos de campo tales como la prueba de penetración estándar (SPT), resistividad eléctrica (SEV) y análisis espectral de ondas superficiales (SASW). Los ensayos de laboratorio incluyen, la determinación de contenido de humedad, límites de consistencia y granulometría.

El ensayo SPT se constituye en un método convencional de exploración geotécnica. La prueba consiste básicamente en medir el número de golpes de un martillo (con características especificadas) necesarios para hincar una cuchara en el suelo. Las dimensiones de la cuchara, especificaciones del martillo y el procedimiento a seguir se encuentran estandarizados en la norma de ensayos ASTM 1586-84.

El ensayo de resistividad eléctrica es un método geofísico no destructivo, el cual identifica materiales a partir de sus propiedades eléctricas. Mediante este ensayo es posible obtener perfiles aproximados de suelo, en un menor tiempo de ejecución y por supuesto a menor costo.

El procedimiento común de ejecución hace uso de 2 pares de electrodos hincados en el suelo sobre una línea recta. Un par de electrodos está conectado a una fuente de energía eléctrica y el otro par está conectado a un voltímetro que mide la diferencia de potencial entre los puntos. El análisis de datos es realizado con ayuda de un ordenador.

El análisis espectral de ondas superficiales es un método geofísico no destructivo mucho más sofisticado, la prueba hace uso de los registros de propagación de ondas Rayleigh en el suelo y permite obtener un perfil de parámetros dinámicos tales como la velocidad de propagación de la onda S (V_s) y el módulo de corte máximo o dinámico (G_{max}).

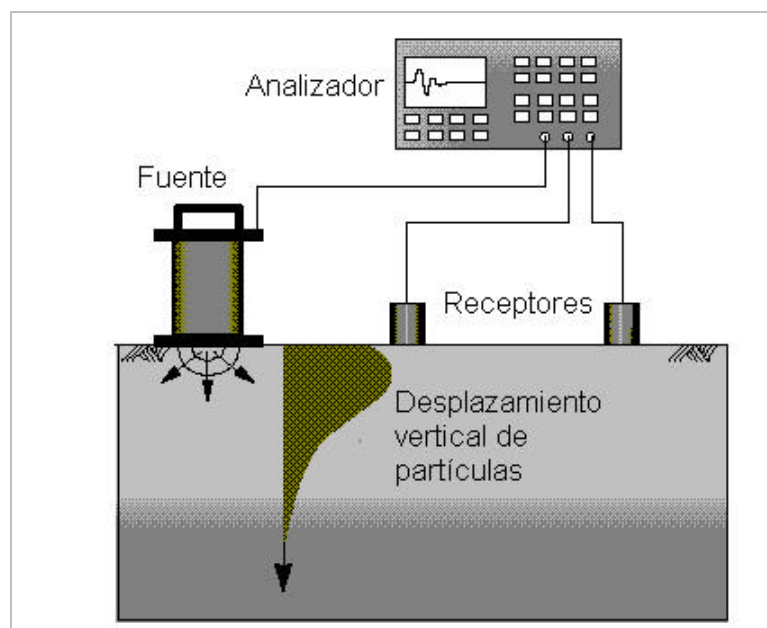


Figura 4. Esquema del método SASW.

La figura 4 muestra un esquema de la configuración del ensayo. Se puede apreciar que el equipo está conformado por una fuente de generación de ondas sísmicas, un par de receptores o geófonos y un analizador espectral que registra y procesa las señales emitidas por los receptores. El método requiere de un programa de ordenador (WinSASW) para evaluar los datos obtenidos en campo.

Finalmente, los ensayos de laboratorio son pruebas sencillas descritas y estandarizadas en la norma ASTM bajo los códigos D-4318 y D-2487.

VII.III Concepto de microzonificación

La microzonificación puede ser definida como el proceso de identificación de características geológicas, sismológicas y geotécnicas similares dentro un área específica. A partir de este proceso, se determina, en forma relativa o absoluta, la susceptibilidad de una zona a sufrir daños sísmicos.

Los resultados son expresados en forma de mapas, los cuales son útiles para distintos propósitos como ser, la planificación del uso del terreno y desarrollo urbano, identificación y refuerzo de estructuras ubicadas en zonas de alto riesgo o propósitos de emergencia.

El manual de microzonificación sísmica propuesto por el Comité Técnico TC4 de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica distingue 3 niveles o grados de Zonificación: Grado-1, Grado-2 y Grado-3.

La zonificación de Grado-1 utiliza la compilación e interpretación de datos históricos, publicaciones o cualquier fuente de información. Este es el nivel menos preciso y de menor costo. La escala de mapeo en este nivel varía de 1:1 000 000 a 1:50 000.

La zonificación de Grado–2 utiliza la información del nivel anterior y además requiere datos adicionales sobre la base de pruebas de campo, lo que permite estimar de forma cuantitativa la amplificación del sitio. Este nivel goza de considerable precisión a un costo de ejecución moderado. La escala de mapeo en este nivel varía de 1:100 000 a 1:10 000.

La zonificación de Grado–3 es mucho más rigurosa en cuanto a información. Asimismo, requiere de un análisis de respuesta sísmica y de información sismológica precisa. Este nivel de zonificación es muy costoso, técnica y económicamente, pero si el potencial de riesgo en un área es considerado muy alto, entonces la inversión se justifica plenamente.

El presente trabajo de investigación ha sido elaborado considerando los requerimientos estipulados por el Grado–2 de microzonificación. Dentro de este contexto, el manual de microzonificación (TC4, 1999) provee correlaciones de uso sencillo que permiten estimar los parámetros dinámicos del suelo y los factores de amplificación, los cuales se constituyen en el criterio de identificación de áreas con potencial de daño sísmico.

Existen muchas correlaciones entre la velocidad de propagación de ondas S y el número de penetración estándar (N_{SPT}). La ecuación 1 presenta la forma general de tales relaciones y la tabla 2 indica las constantes A y B de acuerdo a sus autores.

$$V_S = A \cdot N_{SPT}^B \quad (Ec-1)$$

Tabla N°2

Coeficientes de correlación V_S vs. N_{SPT}

Autor	A	B
Ohba & Trauma (1970)	84.0	0.31
Ohsaki & Iwasaki (1973)	81.4	0.34
Imai & Tonouchi (1982)	97.0	0.314

Asimismo, el factor de amplificación del suelo (A) es estimado según la ecuación 2 propuesta por Midorikawa (1987).

$$A = 68 \cdot V_s^{-0.6} \quad (\text{Ec-2})$$

VIII. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En esta sección se describen los trabajos efectuados tanto en campo como en laboratorio, se describen además los resultados de las pruebas y los parámetros dinámicos del suelo.

VIII.I Descripción general

El trabajo de campo fue realizado en dos etapas. La primera corresponde a los sondeos eléctricos verticales (SEV) ejecutados entre el 26 y 27 de Octubre de 1998 y la segunda corresponde a las pruebas de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) y ensayos de penetración estándar (SPT) ejecutados entre el 24 y 28 de Marzo de 1999.

Durante la primera etapa, se registraron lluvias intensas y temperaturas bajas. La superficie del terreno presentaba bastante humedad. Por el contrario, durante la segunda etapa de pruebas, se contó con un cielo despejado y clima variable de templado a cálido, típico de la zona y la estación.

El estudio fue dirigido a la determinación del perfil del terreno, la obtención de muestras para la clasificación, la determinación del número N_{SPT} del ensayo de penetración estándar y la estimación de la rigidez del suelo en términos de velocidad de propagación de la onda de corte (V_s).

Todas las muestras de suelo extraídas de las perforaciones fueron clasificadas visualmente en campo y a continuación transportadas al laboratorio. Se efectuaron

ensayos complementarios, consistentes de: contenido de humedad natural, granulometría y límites de consistencia, necesarios para la clasificación por el sistema unificado.

VIII.II Sondeo eléctrico vertical (SEV)

Con el objeto de conocer de manera preliminar la estratigrafía del terreno, se llevaron a cabo doce ensayos de resistividad eléctrica con un equipo SYSCAL JUNIOR de Iris Instruments.

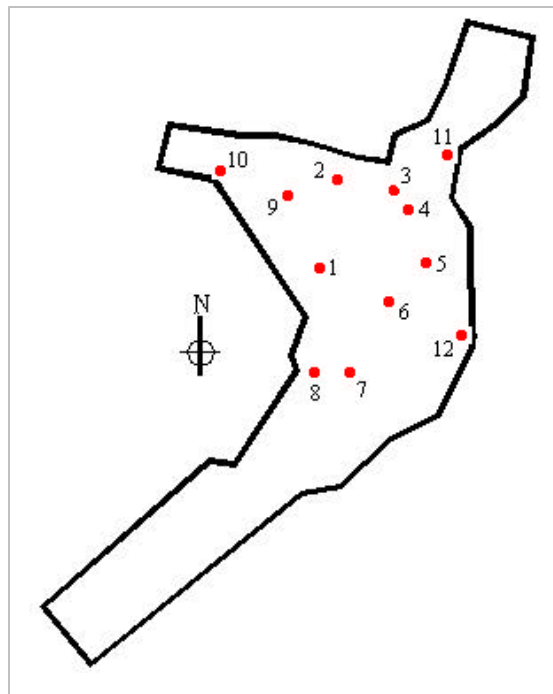


Figura 5. Ubicación de sondeos eléctricos verticales.

Los ensayos fueron realizados según el arreglo de Schlumberger, cuya ubicación puede apreciarse en la figura 5. La tabla 3 presenta un detalle de la ejecución de las pruebas.

Los ensayos muestran que el terreno está conformado por suelos arcillosos, cambiando en algunas zonas a arcilla arenosa o arena arcillosa con algunos lentes de grava. No fue posible detectar la presencia de roca en ninguna de las pruebas.

VIII.III Ensayo de penetración estándar (SPT)

Se ejecutaron diez pruebas cuya ubicación puede apreciarse en la figura 6.

Tabla N°3

Detalle de ensayos de resistividad.

Sondeo	Longitud en la superficie, m	Profundidad alcanzada, m
SEV-1	240	80
SEV-2	240	80
SEV-3	90	30
SEV-4	200	60
SEV-5	240	80
SEV-6	180	60
SEV-7	220	80
SEV-8	280	90
SEV-9	320	100
SEV-10	320	100
SEV-11	280	90
SEV-12	200	60

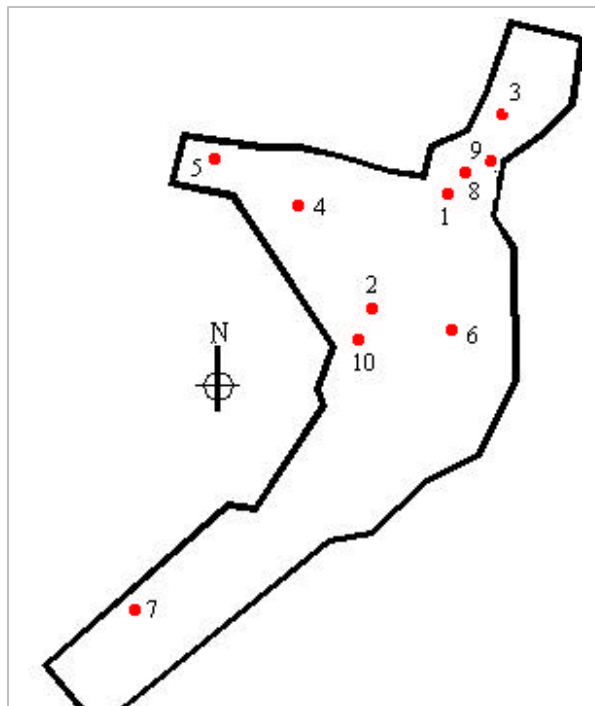


Figura 6. Ubicación de los ensayos de penetración estándar.

La profundidad alcanzada en cada uno de los sondeos respecto al nivel natural del terreno es expuesta en la tabla 4.

Tabla N°4

Profundidad de los sondeos SPT.

Sondeo	Profundidad, m
S-1	6.5
S-2	5.8
S-3	1.4
S-4	3.5
S-5	0.6
S-6	5.4
S-7	1.2
S-8	1.3
S-9	4.4
S-10	3.5

La extracción de muestras alteradas fue realizada cada metro de profundidad. Cada muestra de suelo fue identificada con el número de perforación y la profundidad de extracción, para su posterior traslado al laboratorio en bolsas plásticas con el fin de preservar la humedad.

Los suelos encontrados en los sondeos han sido clasificados como CL, SC – SM, SM y SP – SM, que corresponden a arcilla magra, arena limo arcillosa, arena limosa y arena pobremente gradada con limo y grava respectivamente.

La tabla 5 resume los índices de los materiales, obtenidos de las pruebas en laboratorio.

Se encontraron también algunos suelos no plásticos.

Tabla N°5

Resumen de índices de los suelos finos.

Índices del suelo	Rango de valores
Contenido de humedad, %	3.3 – 19.5
Límite líquido, %	22.9 – 48.0
Límite plástico, %	14.5 – 23.3
Índice de plasticidad, %	6.0 – 27.7

VIII.IV Análisis espectral de ondas superficiales (SASW)

Con el objeto de determinar los parámetros dinámicos de los estratos superficiales, se realizaron pruebas de análisis espectral de ondas superficiales con un equipo conformado por un analizador de ondas HP35670 A y un par de geófonos Mark L-4 A con frecuencia natural de vibración de 1 Hz.

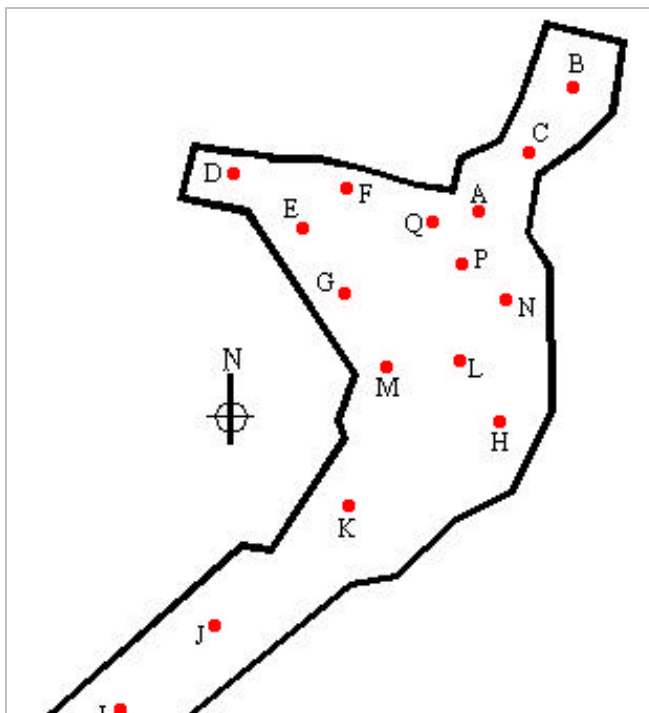


Figura 7. Ubicación de las pruebas de análisis espectral de ondas superficiales.

Las pruebas fueron realizadas a través de 16 líneas de sondeo cuya ubicación puede apreciarse en la figura 7. En todos los sondeos se utilizó un arreglo de geófonos simétrico, alcanzando separaciones de hasta 8 metros.

El análisis de inversión fue llevado a cabo con ayuda del programa de computadora WinSASW, desarrollado en la Universidad de Austin Texas y siguiendo un proceso iterativo. Los resultados obtenidos en cada uno de los sondeos son presentados en la tabla 6.

Tabla N°6

Velocidad de la onda de corte promedio.

Sondeo	Módulo dinámico de corte, Gmax, MPa	Velocidad de la onda de corte (Vs), m/s
SASW – A	71.4	200.7
SASW – B	2864.5	1210.5
SASW – C	1683.2	942.1
SASW – D	140.4	267.7
SASW – E	119.1	248.7
SASW – F	232.1	349.5
SASW – G	171.2	298.9
SASW – H	335.9	413.3
SASW – I	1874.6	992.4

SASW – J	515.9	528.1
SASW – K	232.5	348.8
SASW – L	308.5	404.2
SASW – M	234.4	345.4
SASW – N	144.6	279.8
SASW – P	48.4	160.8
SASW – Q	45.3	157.2

Es muy difícil evaluar un promedio para las propiedades dinámicas. Para este caso se utilizó la ecuación 3, presentada por Gibson.

$$Geq = \frac{2}{h} \cdot \int_0^h G(z) \cdot \sin^2 \left(\frac{P}{2} \cdot \frac{z}{h} \right) \cdot dz \quad (\text{Ec-3})$$

Donde:

- z Profundidad al punto analizado.
- h Altura del depósito de suelo.
- G(z) Módulo de corte a una profundidad z.

La ecuación 3 reduce la influencia de los estratos muy cercanos a la superficie donde la dispersión de los datos es considerable.

IX. DISCUSION DE RESULTADOS

IX.I Caracterización geotécnica

Como resultado del análisis y evaluación de todas las pruebas realizadas, se concluye que el subsuelo del área urbana de Aiquile, sufre grandes cambios, siendo necesaria su clasificación en tres zonas, como se puede observar en la figura 8.

La zona A1 corresponde a un afloramiento de roca intemperizada. El sondeo S-3 fue el único realizado dentro de ésta área debido a que resultó imposible introducir la cuchara normal de la prueba de penetración estándar.

La zona A2 corresponde a un depósito de suelo con profundidad variable, alcanzando un máximo hacia el centro. La profundidad máxima no pudo ser determinada. La mayoría de las perforaciones fueron realizadas dentro de esta zona debido a que sí fue posible hincar la cuchara normal.

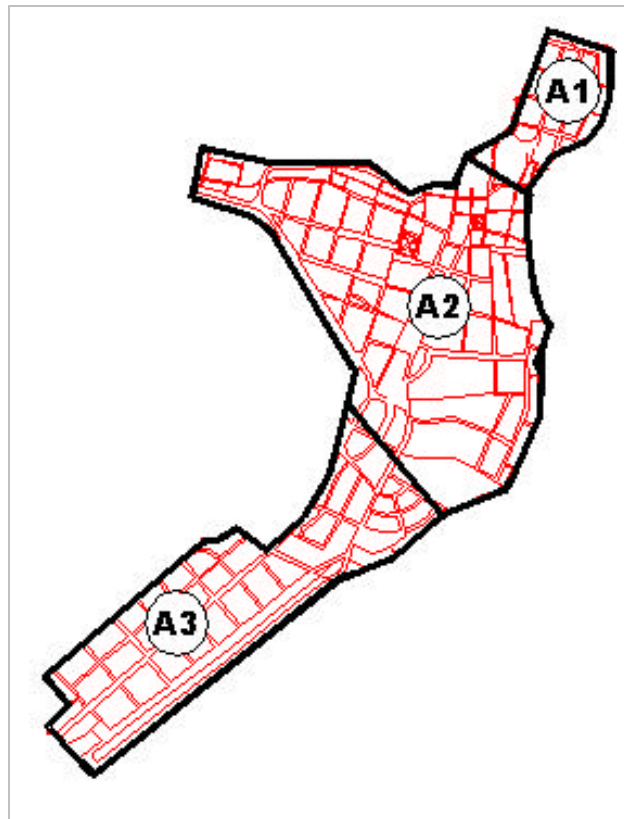


Figura 8. Plano de caracterización geotécnica de Aiquile.

El perfil de suelo en la zona, presenta de forma general, arcilla magra de consistencia media en la superficie, incrementándose el contenido de arena con la profundidad. Este estrato yace sobre otro conformado por arena limosa medianamente densa para finalmente cambiar a arcilla magra arenosa.

La figura 9 muestra un perfil típico de la estratigrafía en la zona A2.

La zona A3 corresponde a un terreno duro conformado principalmente por pedrones, grava y arcilla. Esta formación puede tratarse de un depósito glacial denominado arcilla de acarreo (boulder clay). El sondeo S-7 fue el único realizado en esta área, debido a la dificultad de penetración de la cuchara en este tipo de suelos.

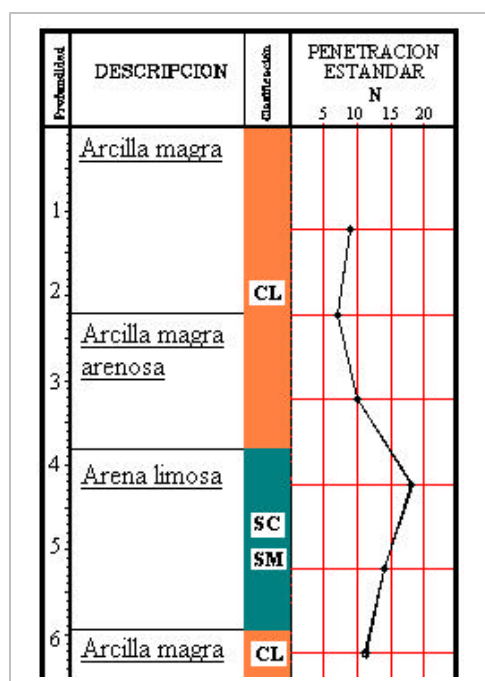


Figura 9. Perfil de suelo típico de la zona A2.

La figura 10 muestra el material extraído de la perforación S-7 a 1 metro de profundidad.



Figura 10. Material típico en la zona A3.

A partir de los datos obtenidos, se tienen muchos indicios para suponer que la estratigrafía del área urbana de Aiquile, se asemeja bastante al perfil mostrado en la figura 11.

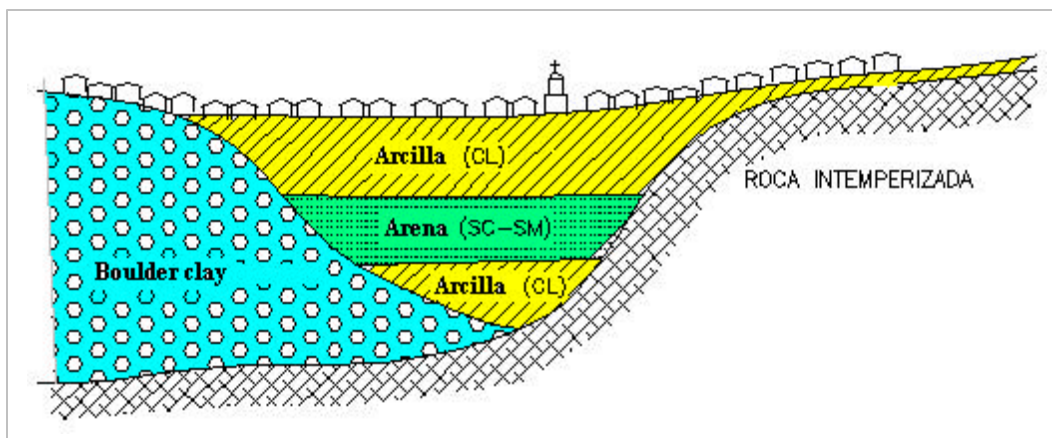


Figura 11. Perfil norte-sur en el área de estudio.

Como se puede observar, se trata de un depósito de suelo conformado por arcilla magra y arena, limitado por roca intemperizada y arcilla de acarreo (boulder clay) muy rígida.

IX.II Amplificación del suelo

La influencia del suelo sobre las ondas sísmicas que se propagan a través de este se denomina amplificación del suelo (A). Este factor depende no solamente del tipo de suelo sino también de la rigidez, la geometría y la impedancia con la base rocosa. Sin embargo, el manual de microzonificación (TC4) proporciona una relación sencilla (ecuación 2) para su estimación.

Haciendo uso de dicha relación y los datos obtenidos en campo, los factores de amplificación para distintos puntos fueron evaluados. La tabla 7 presenta un resumen.

Tabla N°7

Estimación del factor de amplificación.

Sondeo	Velocidad de la onda de corte (Vs), m/s	Factor de amplificación (A)
SASW – A	200.7	2.82
SASW – B	1210.5	1.00
SASW – C	942.1	1.11
SASW – D	267.7	2.37
SASW – E	248.7	2.48
SASW – F	349.5	2.02
SASW – G	298.9	2.22
SASW – H	413.3	1.83
SASW – I	992.4	1.08
SASW – J	528.1	1.58
SASW – K	348.8	2.02
SASW – L	404.2	1.85
SASW – M	345.4	2.03

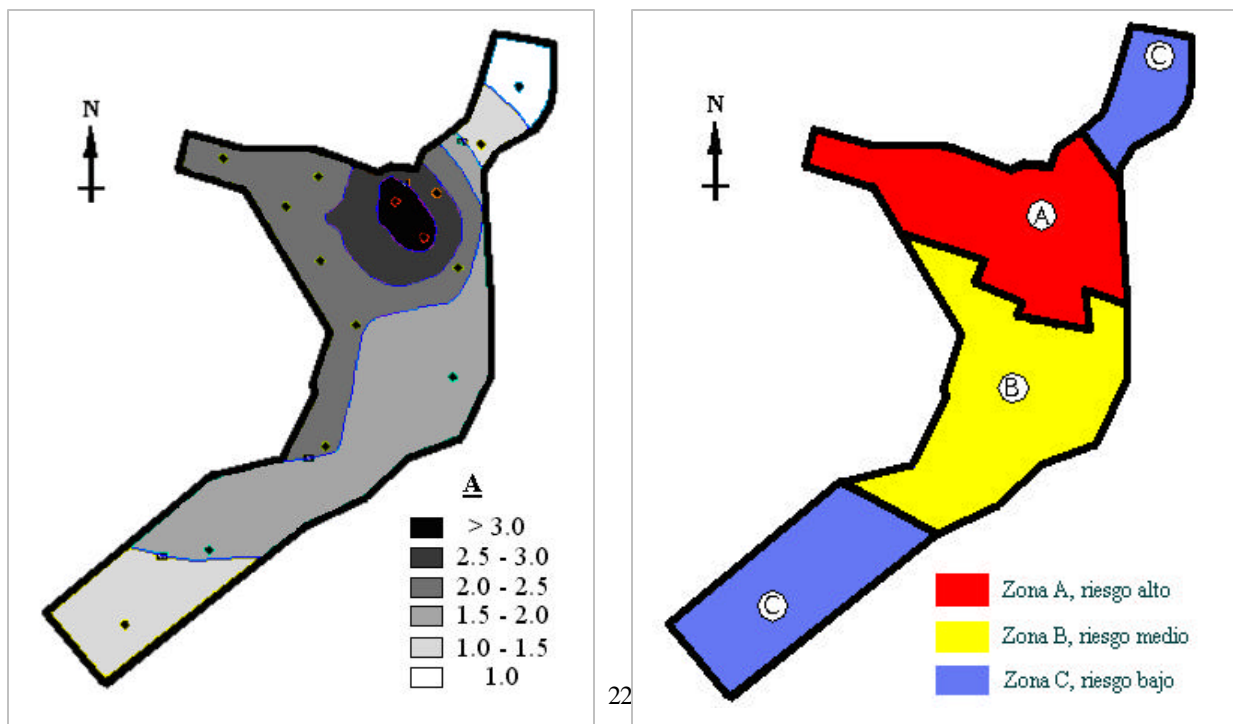
SASW – N	279.8	2.31
SASW – P	160.8	3.22
SASW – Q	157.2	3.27

Los factores de amplificación estimados varían de 1.0 a 3.3. Estos valores deben ser utilizados como referencia únicamente ya que Midorikawa (1987) recomienda la evaluación de la correlación (ecuación 2), sobre la base de una exploración geotécnica con un alcance de al menos 30 metros de profundidad.

IX.III Microzonificación

Finalmente, utilizando el factor de amplificación del suelo como indicador de susceptibilidad o potencial de daño sísmico, se procedió al mapeo de su variación espacial. El resultado es presentado en la figura 12a.

La distribución real de daños (figura 3) y la distribución del factor de amplificación (figura 12a) estimada a partir de ensayos de campo muestran una estrecha relación. Sin embargo debe notarse claramente que el mapa de la figura 12a refleja información relacionada únicamente a las condiciones del suelo mientras que el mapa de la figura 3 implementa ambas, vulnerabilidad de las estructuras y condiciones de suelo.



(a)

(b)

Figura 12. (a) Distribución del factor de amplificación. (b) Mapa de microzonificación.

La figura 12b muestra el mapa de microzonificación sísmica propuesto, mismo que fue dividido en tres zonas (A: riesgo alto, B: riesgo moderado y C: riesgo bajo), de acuerdo a las condiciones del subsuelo y al potencial de daño sísmico.

IX.IV Correlaciones V_s versus N_{SPT}

Sobre la base de los datos obtenidos durante la exploración geotécnica, las funciones de correlación presentadas en la ecuación 1 y tabla 2 fueron evaluadas con el objeto de identificar la que más se ajusta a las características de los suelos en Bolivia.

Las figuras 13, 14, 15 y 16 resumen el análisis. La línea segmentada, en las figuras 13, 14 y 15, representa la relación entre V_s , medida en campo (SASW), y la calculada según las correlaciones presentadas por Imai & Tonouchi, 1982; Ohsaki & Iwasaki, 1973; Ohba & Trauma, 1970. La mejor correlación es aquella donde la línea segmentada está muy próxima a la línea llena; así, los datos calculados son similares a los medidos en campo.

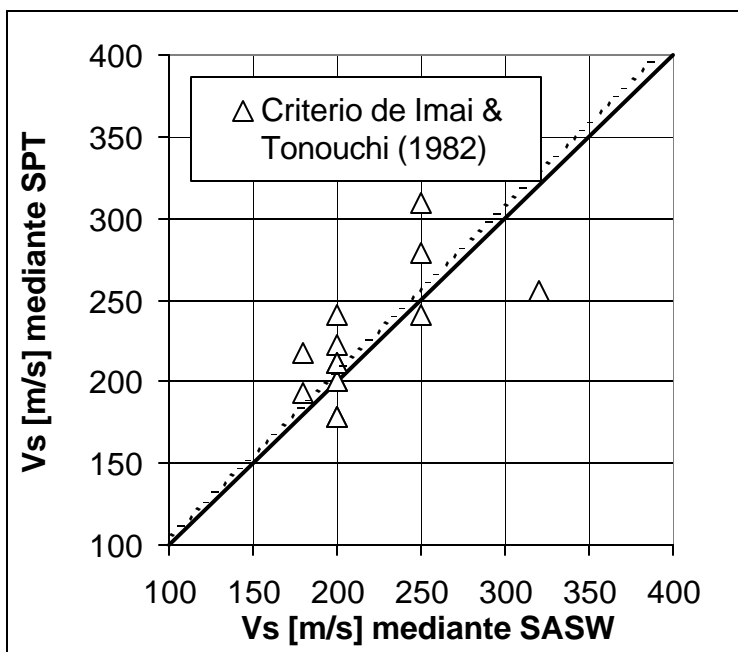


Figura 13. Datos procesados a partir de SASW y SPT – Criterio de Imai & Tonouchi (1982).

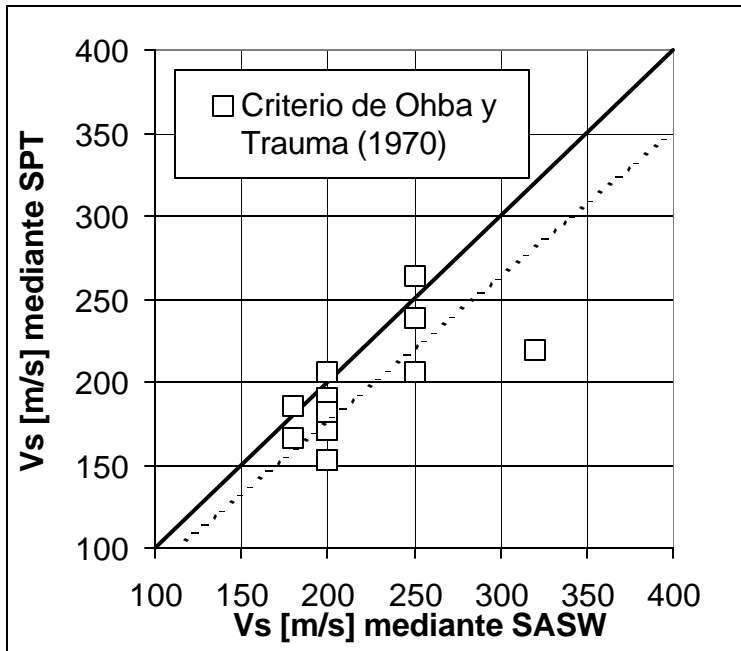


Figura 14. Datos procesados a partir de SASW y SPT – Criterio de Ohba y Trauma (1970).

Se puede apreciar que la correlación propuesta por Imai & Tonouchi (1982) se constituye en la más apropiada para utilizar en suelos de Aiquile (figura 13).

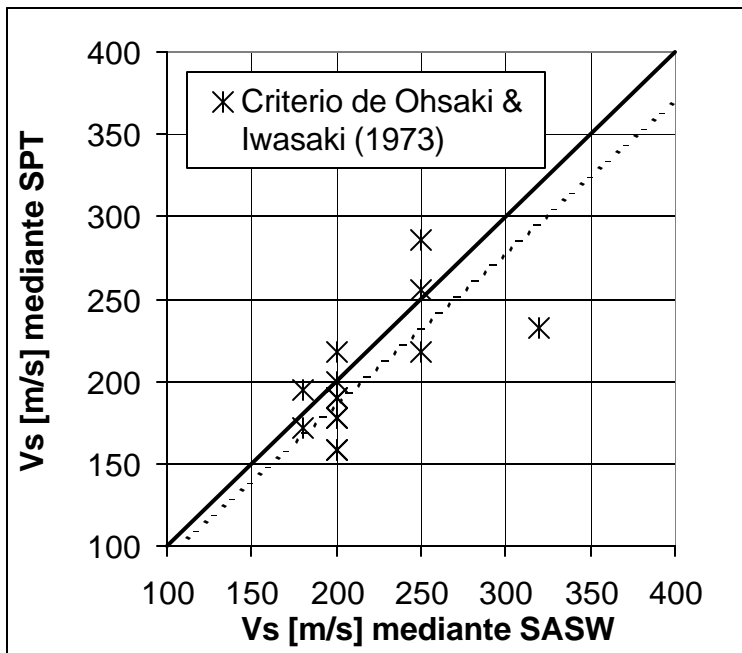


Figura 15. Datos procesados a partir de SASW y SPT – Criterio de Ohsaki & Iwasaki (1973).

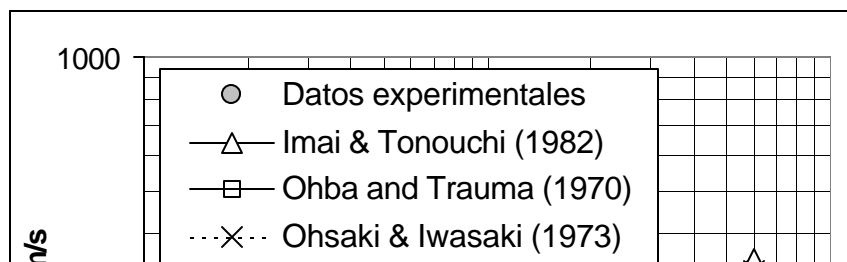


Figura 16. Velocidad de propagación de onda S, V_s versus N_{SPT}

La figura 16 muestra el rango de valores estimados mediante las distintas correlaciones y los datos experimentales obtenidos en el presente proyecto. Se observa una estrecha correlación entre ambos.

X. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un mapa de microzonificación sísmica para Aiquile (figura 12), elaborado sobre la base de la información adquirida durante el estudio geotécnico.

Se puede observar una relación entre el comportamiento real y daños observados después del sismo en mayo de 1998 (figura 3), con las zonas presentadas en el mapa propuesto (figura 12). Asimismo, a partir de la misma comparación, se ha constatado la gran influencia de las condiciones locales del subsuelo en los daños ocasionados.

A pesar de que las profundidades alcanzadas en el análisis son menores a las recomendadas para estudios de este tipo, el mapa obtenido es muy útil para propósitos preliminares de planificación urbana y reconstrucción de Aiquile.

La correlación entre la velocidad de propagación de ondas S (V_s) y el número de penetración (N_{SPT}) del ensayo de penetración estándar, haciendo uso de la relación propuesta por Imai & Tonouchi (1992), resultó ser la más apropiada para los depósitos de

suelo estudiados en Aiquile. Sin embargo se recomienda su uso únicamente dentro del rango de valores N_{SPT} especificado en el presente informe.

Finalmente, se ha observado que el ensayo de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) es una excelente herramienta para la evaluación de la propagación de ondas de corte en el subsuelo.

XI. BIBLIOGRAFIA

1. American Society for Testing and Materials (1995). Annual book of ASTM standards. Vol. 04,08. Philadelphia, printed in USA.
2. Bermúdez, Hernán (1998). Análisis espectral de ondas superficiales: aplicación a la ingeniería civil. Proyecto de Grado, FCyT, Centro de Geotecnia, UMSS.
3. Bolt, Bruce A. (1993). Earthquakes. 3rd Edition. W.H. Freeman and Company. USA.
4. Cabré, Ramón & Vega, Angel (1989). Sismicidad en Bolivia. Observatorio de San Calixto, Publicación No. 40, La Paz – Bolivia.
5. Clayton, Matthews, Simons (1995). Site investigation. 2nd Edition. Blackwell Science, printed in UK.
6. Crespellani, Ghinelly, Vannucchi (1989). An evaluation of the dynamic shear modulus of a cohesive deposit near Florence, Italy. Proceedings of the XII Int. Conf. on SMFE, Rio de Janeiro.
7. Das, Braja M. (1993). Principles of soil dynamics, PWS – KENT Publishing Company, printed in USA.
8. Hsai – Yang, Fang (1991). Foundation Engineering Handbook. 2nd edition. Chapman and Hall, printed in USA.
9. Haegeman, W & Van Impe, W. F. (1995). Developments in SASW testing. 11th European Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1. Copenhagen.
10. Imai, T. & Tonouchi, K. (1982). Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus. Proceedings of the 2nd European symposium on penetration testing. Amsterdam. May, 1982.

11. Kramer, Steven (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, USA.
Lanzo G., D'Elia B. (1997). Shear wave velocity of natural Italian soils. 3rd Int. Geotechnical Eng. Conf. Cairo University, Egypt.
12. Sêco e Pinto (ed.) (1997). Seismic behaviour of ground and geotechnical structures. A. Balkema, Rotterdam.
13. Technical Committee for earthquake geotechnical engineering TC4 (1999). Manual for zonation on Seismic Geotechnical Hazards. ISSMGE, JSSMFE.
14. Verástegui, Daniel (1999). Microzonificación sísmica de Aiquile sobre la base de estudios geotécnicos. Proyecto de Grado, FCyT, Centro de Geotecnia, UMSS.