

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE LA TERRAZA ALUVIAL
DE BARQUISIMETO, ESTADO LARA:
Integración de Sísmica de Refracción, Ruido Sísmico Ambiental y Gravimetría**

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Michael Schmitz
TUTOR INDUSTRIAL: Dr. Franck Audemard

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
Ingeniero Geofísico
Por el Br. Ricardo De Marco Centeno

Caracas, 02 de junio de 2004

Caracas, 02 de junio de 2004

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Geofísica y Minas, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Ricardo De Marco Centeno, titulado:

**“CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE LA TERRAZA
ALUVIAL DE BARQUISIMETO, ESTADO LARA:
Integración de Sísmica de Refracción, Ruido Sísmico Ambiental y Gravimetría”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Jurado

Jurado

Dr. Michael Schmitz
Tutor Académico

Dr. Franck Audemard
Tutor Industrial

A mis padres...

Gracias...

A mis viejos en primer lugar porque lo han dado todo por mi, porque hasta por esta tesis han trabajado, por ser una guía, un apoyo, por ser mis viejos...

A mi tutor Dr. Michael Schmitz por sus enseñanzas y su disposición. Porque con su técnica germano-venezolana me hizo especialista en modelado sísmico...

A mi tutor Dr. Franck Audemard por hacerme dar cuenta de que no sé leer...

A Roberto, por ser un apoyo incondicional en el desenvolvimiento de mi carrera y personal, por ser mi amigo...

A los ingenieros Javier Sánchez y Víctor Rocabado, por todo su apoyo técnico, y sobretodo, por su paciencia...

Al profesor Dr. Reinaldo González por toda su colaboración profesional en la parte estadística y geoestadística, por estar siempre dispuesto a ayudarme.

A mi tío Pietro por haberme acompañado durante mi carrera, por su apoyo profesional y personal...

A mi Nonna, a mi Nonno (†), a Mamaicha, a Papaneno (†)... mis abuelitos...

Al profesor Franco Urbani, a Ramón González, a Michel Bechtold, a Reinaldo Ollarves, y a todo el personal de FUNVISIS que prestaron desinteresadamente su apoyo y disponibilidad para que saliera con éxito de mi trabajo final...

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron con el desarrollo de mi proyecto...

A Héctor, Rubén, Arístides, Carlitos y Aníbal, porque recuerdo que ayer regresábamos mugrientos a nuestras casas, hoy llegamos todavía y siempre juntos... gracias a Dios...

A mis hermanas Paty y Caro, por tenerme paciencia en mis momentos de angustia, de felicidad, de desfachatez, de locura...

A Charles y a Joanna por haber compartido desde el kinder conmigo...

A Paúl, Fidel, Luis Cabrera, Ignacio, Daniel, Maxy y demás panas que iré recordando y que por supuesto me arrepentiré de no haber puesto aquí su nombre... por ser parte de mi vida.

A Kerly... por ser quien eres...

"En la parte mas alta del mundo, en la tierra llamada Svithjod, se erige una roca.

Tiene cien millas de altura y cien millas de ancho.

Una vez cada cien años un pajarito viene hasta esa roca para afinar su pico.

Cuando la roca se haya gastado, habrá transcurrido un solo día de la eternidad"

Hendrik Van Loon, 1951

De Marco C., Ricardo

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE LA TERRAZA ALUVIAL DE
BARQUISIMETO, ESTADO LARA:**

Integración de Ruido Sísmico Ambiental, Sísmica de Refracción y Gravimetría

**Tutor académico: Dr. Michael Schmitz Tutor Industrial: Dr. Franck Audemard
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.
Año 2004, 200p.**

Palabras claves: terraza aluvial, microzonificación sísmica.

Resumen.

Debido a la cercanía de la Falla de Boconó, la región centro-occidental del país se encuentra expuesta a una considerable amenaza de movimientos telúricos, al ser ésta una falla de gran actividad producto de la colisión entre la placa Caribe y la placa suramericana. Por estos motivos ha surgido la necesidad de estudiar las ciudades y poblados cercanos a esta zona de fallas mediante proyectos de microzonificación sísmica, a fin de mitigar el riesgo sísmico al cual están sometidos.

Este proyecto constituye la integración de las técnicas geofísicas: Sísmica de Refracción, Ruido Sísmico Ambiental y Gravimetría, con el apoyo de herramientas geoestadísticas, así como de perforaciones geotécnicas. De la interpretación global de los resultados se obtuvo que:

- El espesor de la terraza se estimó en 40 metros en la base aérea militar, 60 metros en el extremo oeste del aeropuerto y 80 metros en el extremo este. Las velocidades de onda P y S halladas para los sedimentos de la terraza se encuentran en los rangos 1250-1400 m/s y 750-950 m/s respectivamente. Las velocidades Vs30 se aproximan a 800 m/s en la zona del aeropuerto, y hacia la zona centro-este de la ciudad éstos valores superan los 1000 m/s. Las perforaciones geotécnicas en esta última zona reportan el contacto de la terraza con la Formación Barquisimeto a profundidades cercanas a 13 m.
- La zona de mayor espesor sedimentario se ubica en la región centro-sur de la ciudad (al norte del aeropuerto), según los máximos valores de período (0,7-1 segundos), en concordancia con los resultados de Rocabado (2000), el cual asigna un espesor de sedimentos cercano a 80 metros a este rango de valores. Se observan también en correlación inversa con los valores mínimos gravimétricos en esta región (-29 a -23 mgals).
- En el análisis geoestadístico, el acimut de mayor correlación espacial de los atributos Anomalía de Bouguer y Período, corresponde a la dirección 40°.

ÍNDICE

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	vi
	Pág.
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABLAS	xiv
LISTA DE MAPAS	xv
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 UBICACIÓN	4
1.3 ANTECEDENTES	6
1.4 OBJETIVOS	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.5 JUSTIFICACIÓN	8
CAPÍTULO II	
CONTEXTO GEOLÓGICO	9
2.1 MARCO GLOBAL	9
2.2 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.2.1 Surco de Barquisimeto	11
2.2.2 Tectonismo y Sedimentación	12
2.2.3 El Complejo Tectono-Sedimentario de Lara	13

2.2.4 Organización del Complejo Tectono-Sedimentario de Lara	14
2.2.4.1 La unidad para autóctona Areniscas de Botucal.	17
2.2.4.2 Las Napas de la Cordillera de la Costa	17
2.2.5 La Falla de Boconó	17
2.2.5.1 Un modelo geotectónico para el sector norte de la Falla de Boconó	18
2.2.6 La Cuenca de Tracción de Cabudare	20
2.2.7 Estratigrafía asociada	21
2.2.8 Descripción litológica de las formaciones geológicas presentes en la región	23
2.2.8.1 Grupo Los Cristales	23
2.2.8.2 Formación Carorita	24
2.2.8.3 Calizas de Río Turbio	24
2.2.8.4 Formación Bobare	24
2.2.8.5 Formación Barquisimeto	25
2.2.8.6 Formación Morán	25
2.2.8.7 Formación Guamacire	26
2.2.8.8 Formación El Pegón	26
CAPÍTULO III	
SÍSMICA DE REFRACCIÓN	33
3.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DEL MÉTODO	33
3.1.1 Ondas sísmicas	33
3.1.2 Ley de Snell	34
3.1.3 Métodos de adquisición aplicados en sísmica de refracción	36
3.2 MARCO METODOLÓGICO	37
3.2.1 Metodología de adquisición	37
3.2.2 Metodología de procesamiento	39
3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS	41

CAPÍTULO IV	
ESTUDIOS GEOTÉCNICOS	58
4.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS	58
4.1.1 Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	58
4.1.2 Procedimiento internacional de referencia del ensayo SPT	60
4.1.3 Contenido de humedad	61
4.1.4 Peso unitario	61
4.1.5 Límites de consistencia	61
4.2 INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOTÉCNICA	63
CAPÍTULO V	
RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL	74
5.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DEL MÉTODO	74
5.1.1 Efecto por suelos no consolidados	74
5.1.2 El uso de la técnica de Ruido Sísmico Ambiental	75
5.1.3 Relación entre el espectro H/V de microtemores y H/V de ondas Rayleigh	75
5.1.4 Explicación de la relación H/V	76
5.2 MARCO METODOLÓGICO	78
5.2.1 Metodología de adquisición	78
5.2.2 Metodología de procesamiento	79
5.3 RESULTADOS	81
5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
CAPÍTULO VI	
GRAVIMETRÍA	86
6.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DEL MÉTODO	86
6.1.1 Gravedad observada	86
6.1.2 Deriva gravimétrica	87
6.1.3 Corrección por altitud	87

6.1.4 Gravedad teórica	88
6.1.5 Corrección por mareas	88
6.1.6 Corrección de Bouguer	89
6.1.7 Cálculo y generación de mapas de Anomalías de Bouguer	89
6.1.8 Modelado Gravimétrico	90
6.2 MARCO METODOLÓGICO	91
6.2.1 Metodología de adquisición	91
6.2.2 Metodología de procesamiento	92
6.3 RESULTADOS	94
6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	101

CAPÍTULO VII

ESTUDIO ESTADÍSTICO Y GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS	104
7.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DE LAS HERRAMIENTAS	104
7.1.1 Definiciones de Estadística Clásica	105
7.1.2 Población y Muestra	105
7.1.3 Medidas de Tendencia Central y de Dispersión	105
7.1.4 Distribuciones Muestrales	106
7.1.5 Elementos de Geoestadística	108
7.1.6 Variogramas	109
7.1.7 Kriging	111
7.2 MARCO METODOLÓGICO	112
7.3 RESULTADOS	114
7.3.1 Análisis estadístico de los atributos	114
7.3.1.1 Resultados estadísticos de los datos gravimétricos	114
7.3.1.2 Resultados estadísticos de los datos de ruido	117
7.3.2 Análisis geoestadístico de los datos	120
7.3.2.1 Resultados de la evaluación geoestadística de los datos gravimétricos	120
7.3.2.2 Resultados de la evaluación geoestadística de los datos de Período	124

7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	128
CAPÍTULO VIII	
INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS	131
8.1 ANÁLISIS INTEGRADO DE RESULTADOS	131
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFÍA	138
Apéndice A. Tablas de datos de los modelos sísmicos 2D y velocidades Vs30	144
Apéndice B. Tabla de datos gravimétricos	152
Apéndice C. Tabla de datos de Ruido Sísmico Ambiental	161
Apéndice D. Planillas de datos geotécnicos	166
Apéndice E. Variogramas direccionales de los atributos Anomalía de Bouguer y Período	190
Apéndice F. Secciones geológicas de la región	192
Apéndice G. Mapa de zonificación sísmica de Venezuela según la Norma COVENIN 1756-98 para edificaciones sismorresistentes	194
Apéndice H. Compensación y correcciones del gravímetro “SCINTREX Autograv CG-3 (Automated Gravity Meter)”	196
Apéndice I. Fotos de la región	199

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1.1 Representación de las zonas sísmicas de Venezuela según la Norma COVENIN 1756-98 para edificaciones sismorresistentes	3
2.1 Marco geodinámico de la región. Corte geológico “C”	16
2.2 Sección geológica de la ciudad de Barquisimeto y sus alrededores	29
2.3 Ampliación de la sección geológica generalizada N35W en el tramo Qda. La Ruezga – Río Turbio	30
2.4 Modelo topográfico 3D del mapa geológico digital de Barquisimeto y alrededores: con énfasis cuaternario	32
3.1 Representación de los tiempos de arribo de las ondas sísmicas que se refractan en una interface buzando hacia la izquierda	35
3.2 Geometrías de adquisición en sísmica de refracción, a) tipo “in line b) tipo “split spread”	36
3.3 Resumen esquemático del análisis de los datos sísmicos de refracción mediante el programa REFLEX	39
3.4 Modelo sísmico 2D generado mediante el programa RAYINVR	40
3.5 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 0 metros del perfil sísmico de ondas P en la Base Aérea Militar	42
3.6 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la Base Aérea Militar	43
3.7 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 0 metros del perfil sísmico de ondas S en la Base Aérea Militar	44
3.8 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la Base Aérea Militar	45
3.9 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 0 metros del perfil sísmico N-S de ondas P del Aeropuerto de Barquisimeto	47
3.10 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la línea N-S del Aeropuerto de Barquisimeto	48
3.11 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 0 metros del perfil sísmico N-S de ondas S del Aeropuerto de Barquisimeto	49
3.12 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la línea N-S del Aeropuerto de Barquisimeto	50

3.13 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 960 metros del perfil sísmico E -W de ondas P del Aeropuerto de Barquisimeto	51
3.14 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la línea principal del Aeropuerto de Barquisimeto	52
3.15 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 960 metros del perfil sísmico E-W de ondas S del Aeropuerto de Barquisimeto	53
3.16 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la línea principal del Aeropuerto de Barquisimeto	54
4.1 Equipos para estudios geotécnicos en roca descompuesta o suelo: a) Equipo de avance, b) Equipo para ejecución del ensayo SPT	58
4.2 Equipos de rotación para perforaciones geotécnicas en roca	59
4.3 Representación gráfica de los límites de consistencia	62
4.4 Planilla diseñada para la representación de los datos geotécnicos	64
4.5 Leyenda de simbologías y descripción litológica de los perfiles geotécnicos construidos a partir de las perforaciones seleccionadas	65
4.6 Perfil geotécnico N35E en la región centro-oriental de la ciudad de Barquisimeto	66
4.7 Perfil geotécnico N65W en la región centro-oriental de la ciudad de Barquisimeto	68
4.8 Perfil geotécnico E -W en la región central de la ciudad de Barquisimeto	70
4.9 Perforación geotécnica P-26 en la región oeste de la ciudad de Barquisimeto	72
5.1 Modelo asumido por Nakamura (1989) para interpretar la mediciones de microtemores	76
5.2 Secuencia de comandos para la conversión de los datos a formato ASCII	79
5.3 Secuencia de programas para la obtención de valores de Período.	80
5.4 Representación gráfica de las componentes N-S, E-W y vertical en orden descendente de la señal de ruido sísmico grabada por el equipo ORION	81
5.5 Representación gráfica de la relación H/V del punto de medición A1150	82
6.1 Secuencia de correcciones y cálculos realizados para obtener los valores de Anomalía de Bouguer	92
6.2 Bondad de ajuste de lo datos de la componente residual de la respuesta gravimétrica con los datos de Anomalía de Bouguer	96
6.3 Modelo gravimétrico N-S de la ciudad de Barquisimeto	99

6.4 Modelo N60W de la ciudad de Barquisimeto	100
7.1 Ejemplo de histograma de frecuencias y su curva de probabilidades	107
7.2 Ejemplo de gráfico de cuartiles reales y teóricos de una población de datos de ruido	108
7.3 Resumen diagramático de la metodología empleada para el tratamiento estadístico de los datos gravimétricos y de Ruido Sísmico Ambiental	112
7.4 Resumen diagramático de la metodología empleada para el tratamiento geoestadístico de los datos gravimétricos y de Ruido Sísmico Ambiental	113
7.5 Diagrama de caja o “Box Plot” de los datos gravimétricos	114
7.6 Histograma de frecuencias de los datos de Anomalía de Bouguer	115
7.7 Gráfico “Q-Q plot” de los datos de Anomalía de Bouguer	116
7.8 Diagrama de caja o “Box Plot” de los datos de Períodos	117
7.9 Histograma de frecuencias de los datos de Período	118
7.10 Gráfico “Q-Q plot” de los datos de Ruido Sísmico Ambiental	119
7.11 Variograma direccional (45°) de máximo rango de Anomalías de Bouguer	121
7.12 Variograma direccional (135°) de mínimo rango de Anomalías de Bouguer	121
7.13 Variograma direccional (35°) de máximo rango de Ruido Sísmico	124
7.14 Variograma direccional (130°) de mínimo rango de Ruido Sísmico	125

LISTA DE TABLAS

	pág.
7.1 Tabla descriptiva de los datos obtenidos del diagrama de caja o “box plot”	114
7.2 Tabla descriptiva de los datos del Histograma de Frecuencias de AB	115
7.3 Resumen estadístico de los datos de Anomalía de Bouguer	116
7.4 Tabla descriptiva de los datos obtenidos del diagrama de caja o “box plot”	117
7.5 Tabla descriptiva de los datos del Histograma de Frecuencias de Ruido	118
7.6 Resumen estadístico de los datos de Período	119
7.7 Parámetros introducidos al programa GsLIB para la generación de los modelos teóricos de los variogramas direccionales máximo y mínimo	122
7.8 Parámetros introducidos al programa GsLIB para la generación de los modelos teóricos de los variogramas direccionales máximo y mínimo	125

LISTA DE MAPAS

	pág.
1.1 División político-territorial del Estado Lara	5
2.1 Mapa esquemático estructural del complejo tectono-sedimentario de Lara y de las napas asociadas al contacto con los Andes de Mérida	16
2.2 Fallas asociadas a la Falla de Boconó en la región de Barquisimeto	19
2.3 Representación de los cuatro niveles de sedimentación (Q ₁ , Q ₂ , Q ₃ y Q ₄) presentes en el área	23
2.4 Mapa geológico digital de Barquisimeto y alrededores: con énfasis cuaternario	28
3.1 Ubicación de los puntos de disparo de las líneas sísmicas en el área del Aeropuerto de Barquisimeto, la Base Aérea Militar y en el resto de la ciudad	38
3.2 Distribución de velocidades Vs30 en el Aeropuerto, Base Aérea y zona central de la ciudad de Barquisimeto	56
4.1 Ubicación de las perforaciones para la construcción de perfiles	63
5.1 Distribución de los valores de período en la Ciudad de Barquisimeto	83
6.1 Mapa de Anomalías de Bouguer de las mediciones gravimétricas	95
6.2 Componente regional con grado polinómico 3 de los datos de Anomalía de Bouguer	97
6.3 Componente residual con grado polinómico 3 de los datos de Anomalía de Bouguer	97
6.4 Disposición de los perfiles gravimétricos escogidos	98
7.1 Localización de los puntos de mediciones gravimétricas	120
7.2 Mapa de variograma de Anomalías de Bouguer	122
7.3 Mapa de Anomalías de Bouguer estimadas por “Kriging ordinario” a través de los datos de los variogramas direccionales	123
7.4 Localización de los puntos de mediciones de Ruido y sus valores en segundos	124
7.5 Mapa de variograma de Períodos fundamentales	126
7.6 Mapa de Períodos fundamentales estimados por “Kriging ordinario” a través de los datos de los variogramas direccionales	127

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Barquisimeto se ubica en el Estado Lara en la región centro-occidental del país, y se encuentra construida sobre una terraza aluvial del Valle del Río Turbio al norte de la falla de Boconó. Esta última forma parte del sistema de fallas que define el desplazamiento entre las placas Caribe y Suramérica, conformado por los accidentes tectónicos principales Boconó-San Sebastián-El Pilar. La falla de Boconó es clasificada como de tipo rumbo-deslizante y tiene su inicio en la región andina (Casas-Sainz, 1992), con un desplazamiento de tipo dextral. En la región de estudio, dicha falla presenta una zona de relevo cuya traza homóloga se ubica al sur de la localidad de Cabudare, formando, como es característico de este tipo de fallas, la estructura descrita por Giraldo y Audemard (1997) la Cuenca de Tracción o “Pull-Appart” de Cabudare.

Como consecuencia de la actividad cuaternaria de la zona de fallas de Boconó, se ha generado una serie de abanicos aluviales cuya nomenclatura sugerida para diferenciarlos según sus edades de depósito es Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4 (Giraldo, 1985). Los sedimentos Q_3 componen la terraza de Barquisimeto y los sedimentos Q_1 , son asignados a los encontrados en las trazas del Río Turbio y la Quebrada La Ruezga por ser estos últimos los más jóvenes. Según Giraldo (1985), los sedimentos Q_3 de la terraza de Barquisimeto se componen esencialmente de materiales conglomeráticos con horizontes arenosos y arcillosos de profundidades máximas cercanas a 80 metros.

Por la actividad actual de la falla, aunado al hecho de que las ondas sísmicas sufren amplificaciones al pasar por medios litológicos no consolidados, se ha considerado a la ciudad de Barquisimeto y a sus zonas aledañas, como una región de potencial riesgo de desastres ante movimientos sísmicos provenientes del grupo de fallas que la circundan.

Una alternativa en la toma de medidas para la mitigación de dichos riesgos, la constituye la microzonificación sísmica, con la cual se busca establecer parámetros

de planificación urbanística y regional vinculados con las condiciones sísmicas de la región de estudio.

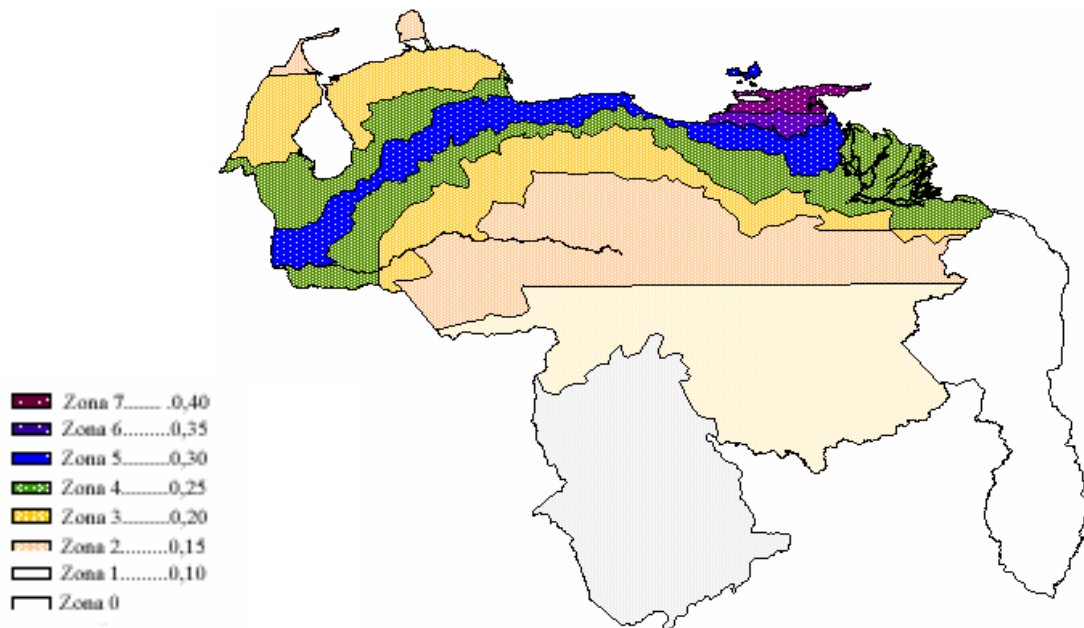
De esta manera, el estudio presentado constituye un aporte para el proyecto de microzonificación sísmica que tuvo su inicio en el año 1998, y llevado a cabo con la participación de FUNVISIS y las autoridades locales, para indicar las zonas de riesgo potencial, con la finalidad de elaborar un moderno y adecuado reglamento de construcción de obras civiles que incluya el comportamiento dinámico de los diferentes tipos de suelo presentes en la región.

Para cumplir con dicho objetivo, en este proyecto se integró la información de tres perfiles sísmicos adquiridos por FUNVISIS en noviembre de 2002 en el área del Aeropuerto “Gral. Jacinto Lara” y la Base Aérea Militar de Barquisimeto “Tte. Vicente Landaeta Gil”. Además de un conjunto de perfiles sísmicos obtenidos en períodos anteriores al inicio de este proyecto por FUNVISIS en la zona central de la ciudad. Se creó igualmente un mallado de estaciones gravimétricas y de ruido sísmico ambiental que cubrió toda la ciudad, con un espaciamiento entre estaciones de 500 metros. Se recopiló la información geotécnica disponible en el área como apoyo en la estimación de las densidades de los sedimentos, así como la composición litológica de los mismos.

Se aplicaron herramientas geoestadísticas a los datos gravimétricos y de ruido sísmico ambiental para estimar la variabilidad espacial de las mediciones, además de procurar establecer una correlación inversa entre los resultados de ambas técnicas, bajo el conocimiento de que las zonas de mayor espesor sedimentario producen aumentos en los valores de período, contrariamente al comportamiento de los resultados gravimétricos.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este proyecto de investigación se basó en la integración de una serie de datos adquiridos en la ciudad de Barquisimeto, que comprenden estudios de sismica de refracción, gravimetría y mediciones de ruido sísmico ambiental, además del apoyo con perforaciones geotécnicas y herramientas geoestadísticas. Esto con el objeto de caracterizar la capa aluvional del subsuelo de la región, estimando así el espesor de dicha capa de sedimentos y de esta manera, reconocer las zonas de mayor riesgo sísmico de la ciudad, bajo el conocimiento de la proximidad a la zona de fallas de Boconó como el accidente tectónico principal de la región.



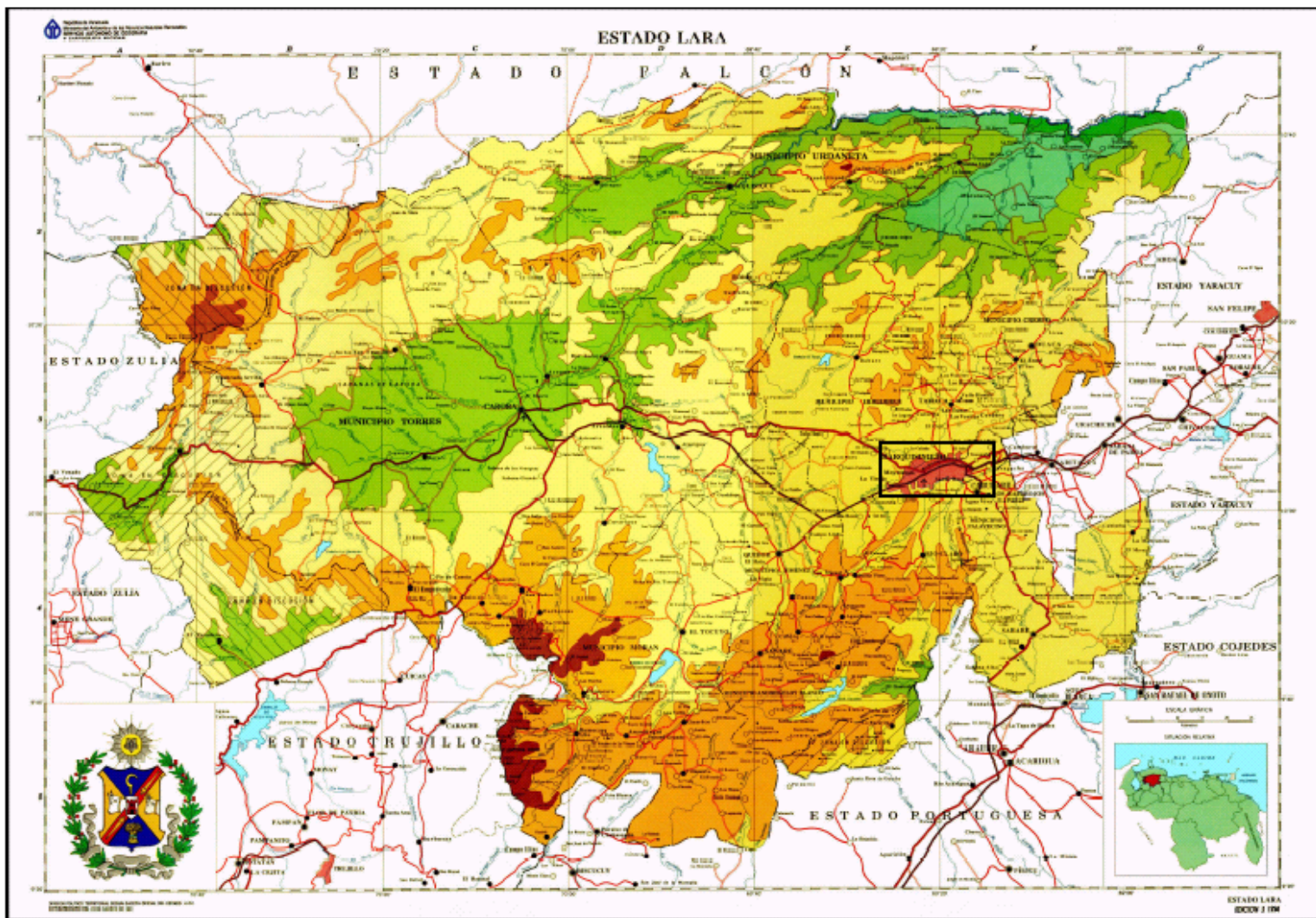
Mapa 1.1. Representación de las zonas sísmicas de Venezuela según la Norma COVENIN 1756-98 para edificaciones sismorresistentes (COVENIN 1756-98)

La Norma COVENIN 1756-98 para edificaciones sismorresistentes clasifica a la región de Barquisimeto como Zona 5 en sus criterios de zonificación sísmica para el país con un valor de aceleración máxima de 0,30 g.

1.2 UBICACIÓN

El estudio de caracterización geofísica aquí planteado se limita prácticamente a toda el área de Barquisimeto, en el Estado Lara. Dicha ciudad se ubica a 345 kilómetros al oeste de la ciudad de Caracas y se dispone justamente sobre una antigua terraza aluvial del Valle del Río Turbio en las cercanías de la falla de Boconó.

Las mediciones de sísmica de refracción, ruido sísmico ambiental y gravimetría realizadas previamente, así como otros estudios geotécnicos que constituyen la base de datos de este proyecto, se llevaron a cabo en diversas zonas de la ciudad. Asimismo, los levantamientos sísmicos de refracción utilizados para el modelado sísmico 2D se ubicaron en el área del Aeropuerto de Barquisimeto; específicamente, una de las líneas cortas se adquirió con dirección norte-sur en el área de la Base Aérea Militar de la ciudad, y tanto la línea principal, dispuesta en dirección este-oeste, como la otra línea corta (perpendicular a la principal) se adquirieron en la zona de seguridad del aeropuerto. Este proyecto tuvo una fase de adquisición llevada a cabo entre el 27 y el 30 de mayo del año 2003, con el objeto de realizar mediciones de ruido sísmico y gravimetría siguiendo los lineamientos de los perfiles sísmicos ubicados en el aeropuerto y la base aérea militar de la ciudad de Barquisimeto.



Mapa 1.1. División Política Territorial del Estado Lara. El recuadro negro representa la ciudad de Barquisimeto (Tomado de Atlas de Venezuela en Línea (1999))

1.3 ANTECEDENTES

Entre la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y el Departamento de Geofísica de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, se han desarrollado varios proyectos de investigación de manera conjunta, en particular, orientados algunos de ellos como temas de tesis para los estudiantes que les corresponde cumplir con dicho requisito académico. De igual manera, se han realizado proyectos de pasantías orientados al procesamiento e integración a sistemas de información geográfica de mediciones de ruido ambiental y gravimetría tal como es el caso de Lozano y Yépez (2003), quienes realizaron en su proyecto, integraciones y digitalizaciones de mediciones de gravimetría y ruido sísmico, así como de topografía en la ciudad de Barquisimeto en el sistema de información geográfica “Map Info”.

Este estudio forma parte de un proyecto que tuvo su inicio en el año 1998, el cual implicó la participación de las autoridades locales, tales como la Municipalidad y la Administración del Estado Lara, con la finalidad de realizar una caracterización de los parámetros físicos del subsuelo de la ciudad. Los datos de este proyecto de tesis pertenecen a unos estudios recientes de refracción sísmica (Rocabado *et al*, 2002a), mediciones de ruido ambiental y gravimétricas (Rocabado *et al*, 2001, 2002b y 2003), además del análisis de perforaciones geotécnicas utilizadas en los proyectos de tesis de grado de Pacheco y Terán (1999), Urbina y Villalobos (2000) y Rojas y Rojas (2003).

Rocabado (2000) realizó un estudio de ruido sísmico ambiental en la ciudad de Caracas. Dicho autor, mediante el mapa de espesor de sedimentos de Weston Geophysical (1970, mapa 5) de la ciudad de Caracas, pudo realizar una correlación entre los resultados de períodos obtenidos por él y los espesores correspondientes a las localizaciones de sus puntos de medición, asignando rangos de períodos para diversos niveles de profundidad al basamento rocoso.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

- Modelar a través de programas computacionales utilizados en sismica de refracción y gravimetría para tal fin, la capa aluvional del subsuelo de la ciudad de Barquisimeto en el Estado Lara, con el apoyo de los datos de ruido sísmico ambiental, así como de perforaciones geotécnicas y herramientas geoestadísticas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Procesar e interpretar los datos de sismica de refracción previamente adquiridos en el área del aeropuerto y la base aérea militar de la ciudad de Barquisimeto. Generar un mapa de distribución de velocidades Vs hasta 30 metros de profundidad a partir de los datos sísmicos disponibles.

- Recopilar los datos gravimétricos previamente adquiridos en el área (Rocabado *et al.*, 2002b). Adquirir en campo nuevos datos para aumentar la densidad de mediciones en el área del aeropuerto y la base aérea militar. Generar el mapa de anomalías de Bouguer correspondiente a los datos disponibles. Interpretar y evaluar las disposiciones óptimas para el modelado del subsuelo de la región mediante perfiles gravimétricos.

- Recopilar los datos de ruido sísmico ambiental obtenidos previamente durante el proyecto de microzonificación mencionado (Rocabado *et al.*, 2002b). Adquirir datos de ruido en campo y aplicar el método de Nakamura para determinar los valores de Período de las nuevas mediciones.

-Aplicar herramientas estadísticas y geoestadísticas a los datos gravimétricos y de Ruido Sísmico Ambiental, a fin de conocer la variabilidad espacial de los datos en la región, así como la correspondencia entre ambas técnicas.

1.5 JUSTIFICACIÓN

En muchos países han ocurrido sismos de grandes magnitudes que, por lo general, han dejado innumerables pérdidas humanas y materiales. De aquí surge la necesidad de tomar medidas preventivas para minimizar los efectos negativos que causan estos fenómenos naturales. Una manera de tomar estas medidas preventivas, es realizando estudios de microzonificación sísmica en las zonas urbanas para conocer su comportamiento dinámico y delimitar las zonas más vulnerables a través de mapas de zonificación de riesgos.

Con la microzonificación sísmica se busca evaluar los riesgos sísmicos minuciosamente a efectos de la planificación regional y urbanística, así como los niveles de las fuerzas o movimientos para la concepción de estructuras antisísmicas.

Es por esto que se hace oportuno caracterizar el espesor de los sedimentos de la ciudad de Barquisimeto, basándose en el hecho de que las ondas sísmicas sufren atenuación de sus frecuencias altas al atravesar medios no consolidados y, en consecuencia, aumentan en alto grado su amplitud las bajas frecuencias, lo que ocasiona fuertes movimientos y sacudidas en las estructuras y edificaciones de las ciudades causando en algunos casos, la destrucción de las mismas.

Asimismo, podrá contarse en la ciudad de Barquisimeto con un nuevo aporte al estudio de microzonificación sísmica y caracterización del suelo que se ha venido desarrollando, el cual indicará las zonas de riesgo potencial. Todo esto orientado a la prevención de desastres mayores y a la elaboración de un moderno y adecuado reglamento de construcción que incluya el comportamiento dinámico de los diferentes tipos de suelo presentes en el área (efectos de sitio).

CAPÍTULO II

CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 MARCO GLOBAL

La ciudad de Barquisimeto se encuentra sobre una terraza aluvial de edad cuaternaria, producto de una compleja historia geológica que involucra a la Falla de Boconó como el accidente tectónico principal, a partir del cual se ha generado una serie cuencas de tracción y abanicos aluviales propios de un sistema de fallas rumbo-deslizante.

De manera general, las fallas rumbo-deslizantes (o “strike-slip faults”) son caracterizadas por poseer valles rectos y alineados, y como su nombre lo señala, el desplazamiento es principalmente paralelo al rumbo de la falla, siendo el rasgo más característico de este tipo de fallas, su extrema linealidad a lo largo de cientos de kilómetros (Schubert, 1980).

La zona de fallas de Boconó es considerada como uno de los rasgos geotectónicos más importantes en el extremo noroccidental de la placa suramericana, por ser ésta uno de los contactos entre las placas Caribe y Suramérica. Gracias a este contacto entre placas, y a su régimen compresivo asociado, se dio lugar al sistema de napas que domina la región, cuyo cuerpo principal se sitúa al norte de Barquisimeto y ha sido denominado por Stephan (1982) como las Napas Caribe, con sus propias subdivisiones según su ubicación y características geomorfológicas (consultar Stephan, 1982).

Las unidades cretáceas de la región se encuentran caóticamente relacionadas con las formaciones del Paleoceno-Eoceno. Dicha relación era integrada por la mayoría de los autores en el llamado “Surco de Barquisimeto”, bajo la teoría de deslizamientos submarinos causados por desplazamientos verticales en los bordes del surco, trasladándose las masas y bloques por gravedad hacia el centro del mismo (Bellizzia y Rodríguez, 1966). Mientras que Stephan (1982), amplía estos conceptos renombrando la región como “Complejo Tectono-Sedimentario de Lara”,

definiéndolo como el conjunto de afloramientos del Paleoceno-Eoceno y olistolitos asociados sedimentaria y tectónicamente al deslizamiento SSE de los estratos Caribe, y lo divide en tres grandes subconjuntos de la formación Matatere. Entonces, el Complejo de Lara y las unidades cretáceas están entrelazados por sobrecorrer en conjunto sobre el autóctono andino (Stephan, 1982).

La ciudad de Barquisimeto se encuentra prácticamente limitada al sur por el tramo Sanare-Barquisimeto de la Falla de Boconó, encontrándose afloramientos cuaternarios deformados en la vía que conduce hacia la población de Río Claro (Giraldo, 1985). Justamente, Giraldo y Audemard (1997) describen una zona de relevo de esta falla donde su traza homóloga se localiza al sur de Cabudare, trayendo como consecuencia, la formación de una cuenca de tracción o “Pull-apart basin” similar a la formada en el Valle de Yaracuy entre las fallas Boconó y Morón, descrita por Casas-Sainz y Diederix (1992).

La disposición general de los distintos niveles de abanicos aluviales a lo largo de la falla de Boconó entre Yaritagua y San Felipe, se adapta al carácter dextral de la falla de Boconó, por lo que se puede suponer que cada una de las grandes quebradas que desciende de la Sierra de Aroa han podido dar lugar a varios niveles de abanicos aluviales (Casas-Sainz y Diederix, 1992). Atribuyéndose entonces, estas características a los niveles cuaternarios que conforman la región de Barquisimeto y Cabudare, donde los agentes principales de transporte de sedimentos han sido el Río Turbio al sur de la ciudad, y la Quebrada La Ruezga en el límite norte de Barquisimeto. Esto último bajo el criterio de Casas-Sainz y Diederix (1992), quienes mencionan que el movimiento secuencial de las fallas que limitan la Depresión de Yaracuy puede relacionarse a su vez, con el movimiento dextral de tres trazas del sistema de fallas de San Sebastián, de modo que el movimiento de aquellas está condicionado por el de estas últimas, ya que, puesto que las tres presentan orientaciones similares y afectan al mismo tipo de material, no deberían existir factores mecánicos que favorezcan el movimiento de una u otra (Casas-Sainz y Diederix, 1992).

Casas-Sainz y Diederix (1992) concluyen a partir de criterios geomorfológicos y estudios de afloramientos cuaternarios del Valle de Yaracuy, que la falla de Boconó se ha mantenido activa durante el cuaternario, dando lugar a cuatro niveles de abanicos aluviales. Dichos niveles sedimentarios son descritos por Giraldo (1985) y han sido distinguidos por la nomenclatura Q₁, Q₂, Q₃, y Q₄ según su antigüedad, además de una secuencia Pliocena correspondiente a la formación Guamasire. En línea general, estos niveles de abanico se componen de conglomerados mal consolidados con horizontes arenosos y arcillosos y con presencia de carbonatos. La terraza de Barquisimeto se compone principalmente de los sedimentos Q₃, y en las cercanías o bordes del río Turbio y la quebrada La Ruezga aparecen los sedimentos Q₁ por ser éstos los más jóvenes (Giraldo, 1985).

2.2. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.2.1 Surco de Barquisimeto

El Surco de Barquisimeto fue definido por Renz *et al.* (1955) como el sitio de sedimentación “flysch” y deslizamientos submarinos caóticos extendida desde algún lugar al norte del Alto de Siquisique, bordeando la llamada hoy “Plataforma de Barbacoas” hasta alcanzar el Estado Portuguesa, donde le ha asignado el nombre de “Surco de Portuguesa”.

Los sedimentos más comunes del Surco de Barquisimeto pertenecen a la Formación Matatere, que Bellizzia y Rodríguez (1966) definen como una gruesa sección de turbiditas, principalmente areniscas impuras líticas o feldespáticas, areniscas conglomeráticas, conglomerados líticos, etc. Las areniscas están gradadas y muestran marcas típicamente turbidíticas; las lutitas que las acompañan son limolíticas.

2.2.2 Tectonismo y Sedimentación

Sin entrar en mucho detalle, Bellizzia y Rodríguez (1967) resumen los diferentes puntos de vista sobre la tectónica y sedimentación del Surco de Barquisimeto en tres hipótesis:

a) Autoctonía: algunos autores como Rod y Maync (1954), interpretando algunas zonas como la del cerro Sabana en los alrededores de Carora, consideran a las lutitas del Terciario como de edad cretácea y a los bloques como parte de la secuencia interestratificada normalmente en la sección.

b) Aloctonía según modelo de napas: por napas se entiende un manto rocoso que avanza como una sola unidad, siendo el traslado tectónico por gravedad o por compresión cortical. Von Der Osten y Zozaya (1957) informan sobre la presencia de grandes mantos de corrimientos de rocas cretáceas sobre rocas del cretáceo inferior, en la zona comprendida entre Barquisimeto y Quibor, que se presentan hoy en día fragmentados a causa de la erosión; algunos de estos remanentes alcanzan varios kilómetros de longitud. Tales corrimientos se debieron a compresión cortical desde el noroeste.

c) Aloctonía según el modelo de deslizamientos de bloques y mantos de gravedad: esta última teoría es la que cuenta con el apoyo de la mayoría de los geólogos para explicar las relaciones caóticas de las unidades del Cretáceo y Paleoceno-Eoceno en el Surco de Barquisimeto. Renz *et al.* (1955), en su trabajo sobre deslizamientos submarinos durante el Terciario inferior en los alrededores de Carora, demarca el llamado “Surco de Barquisimeto” e informa sobre la presencia de grandes deslizamientos submarinos, algunos de más de 1 kilómetro de longitud y que fueron separadas por la ruptura de escarpados submarinos causados por movimientos verticales en los bordes del surco. Las masas y bloques fueron trasladados por gravedad hacia el centro del mismo, habiendo viajado algunos de ellos más de 30 kilómetros. Hacia el noroeste de Carora, además de los bloques de rocas del Cretáceo inferior y superior, menciona la presencia de olistostromos de rocas graníticas y gnéisicas.

2.2.3 El Complejo Tectono-Sedimentario de Lara

Este conjunto corresponde a una espesa sucesión terrígena de edad Paleoceno inferior al Eoceno medio-superior, en la cual se intercalan las unidades alóctonas (Napas de la Cordillera de la Costa y de Tinaco-Tinaquillo) y su séquito de olistolitos de diversos tamaños. El Complejo de Lara cubre (al norte de la falla de Boconó) una superficie superior a 5000 km². Su límite occidental es una línea curva que une a Carora con El Tocuyo (frente del deslizamiento a finales del Eoceno). Su límite oriental es también curvilíneo entre Barquisimeto, la Quebrada Matatere y Santa Inés. Hacia el norte, siguen sus afloramientos desde los confines occidentales de la Sierra de Baragua hasta la ribera izquierda del río Tocuyo, entre Siquisique y el frente El Limón sobre el río. Más hacia el Norte, el Oligo-mioceno de Falcón sella la parte superior del complejo, el cual sólo reaparece debido a las depresiones desprendidas en los anticlinales neogénicos. En fin, hacia el sur se encuentra truncado por la falla de Boconó. Sin embargo, no hay duda de que al sur de esta, una parte de la Sierra de Portuguesa le pertenece tomando en cuenta un desprendimiento de 40 a 75 Km. de la Falla de Boconó (Stephan, 1982).

Los estudios estratigráficos y estructurales realizados por Stephan (1982) en diversos puntos de la región modifican un poco las hipótesis realizadas anteriormente. Los primeros estudios han descuidado en general el aspecto tectónico o han subestimado la importancia de las deformaciones que afectan el terrígeno en bloques. Así, la línea Carora-El Tocuyo no corresponde a la zona de discordancia del Paleoceno o borde del Surco de Barquisimeto; en efecto, se trata de la traza de un deslizamiento de orientación SSE sobre el autóctono andino, lo cual compromete simultáneamente al terrígeno Paleoceno-Eoceno y al alóctono Cretáceo (Stephan, 1977 y sus memorias).

Por otro lado, el aspecto caótico de los afloramientos del Cretáceo, si bien se debe fundamentalmente a la fragmentación de las masas alóctonas en extensos olistostromos, no es menos cierto, que en algunos casos haya sido creado por los efectos de deformaciones superpuestas.

Tomando en cuenta estas deformaciones post-depósito, detrás del caos aparente del Surco de Barquisimeto se desprende un dispositivo bien estructurado, el cual presenta desde el sur hasta el norte un entrelazamiento de unidades cretáceas alóctonas y de conjuntos terrígenos en bloques. Las unidades cretáceas se unen al este por la línea Bobare-Barquisimeto al cuerpo principal de las Napas de la Cordillera de la Costa, hacia el Oeste, se disgregan hacia el seno del terrígeno.

Stephan (1982) propone designar con el nombre de “Complejo Tectono-Sedimentario de Lara” al conjunto de afloramientos del Paleoceno-Eoceno y olistolitos asociados sedimentaria y tectónicamente al deslizamiento SSE de los estratos Caribe. Entonces, el Complejo de Lara y las unidades cretáceas están entrelazados por sobrecorrer en conjunto sobre el autóctono andino. La región en cuestión se extiende desde Falcón meridional (Sierras de Baragua y Siquisique) hasta el sector de El Tocuyo y ocupa más del 50 por ciento del estado Lara.

2.2.4 Organización del Complejo Tectono-Sedimentario de Lara

El Complejo Tectono-Sedimentario de Lara, según la definición propuesta por Stephan (1982), comprende de base a tope un conjunto terrígeno de edad Paleoceno inferior al Eoceno medio que corresponde a la Formación Matatere de Bellizzia y Rodríguez (1966, 1967, 1968). Tomando en cuenta la naturaleza de las relaciones con el Cretáceo alóctono, las facies y la edad, Stephan (1982) diferencia tres subconjuntos para la Formación Matatere:

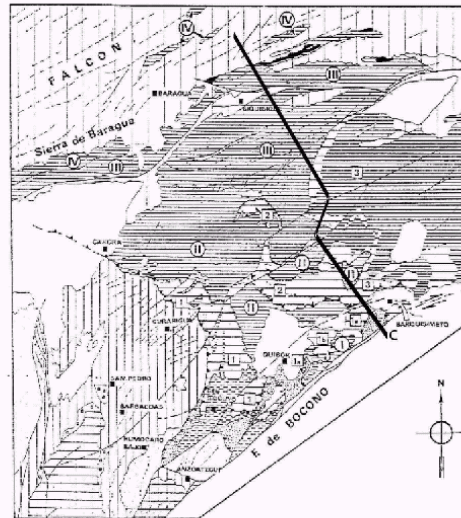
a) Matatere I: se trata de una secuencia esencialmente pelítica, concordante con el Cretáceo superior y en cuyo tope se intercalan los olistolitos cretáceos. Su edad probable es Paleoceno inferior.

b) Matatere II: la secuencia sedimentaria está dominada por sedimentos pelíticos con escasas intercalaciones de areniscas finas casi siempre en paquetes de varios metros; los olistolitos se encuentran en todos los niveles, pero particularmente con mayor abundancia hacia la base, es decir, cercanos a las unidades alóctonas cretáceas. Este conjunto, de edad Paleoceno superior al Eoceno inferior, es

discordante sobre el Cretáceo alóctono subyacente (unidades de la Cordillera de la Costa).

c) Matatere III: Esta sucesión se caracteriza por alternancias de areniscas y conglomerados generalmente turbios que dan al conjunto una característica de facies flysch. Las capas detríticas se reagrupan en barras prominentes continuas de 10 a 15 km particularmente en la Serranía de Matatere. Los olistolitos son relativamente menos abundantes que en Matatere II, asimismo, más bien concentrados en el tope de la secuencia sedimentaria. Matatere III es de edad Eoceno inferior al Eoceno medio y descansa en concordancia sobre el alóctono cretáceo (napas de la Cordillera de La Costa).

El Complejo de Lara definido de esta manera y las unidades alóctonas asociadas, sobrecorren sobre una unidad de arenisca y sedimentos pelíticos con escasos olistolitos de edad Paleoceno-Eoceno inferior que corresponde a la unidad de las Areniscas de Botucal. Por lo tanto, en la región de Lara, en el extremo NE de los Andes de Mérida, la transversal de Barquisimeto se expresa en el curso de las diferentes fases tectónicas comprendidas entre el Paleoceno inferior y el Eoceno medio, y esto a su vez, de dos maneras: 1) mediante la diagénesis del Complejo de Lara, lateralmente, sobre el ala de los estratos en curso de progresión SSE (y no hacia su frente) en una cuenca terrígena invadida por los olistolitos. 2) Por el corrimiento hacia el SSE del llamado Complejo de Lara y de sus estratos sobre el autóctono andino a lo largo de una superficie de cizallamiento que emerge axialmente a nivel de los Andes de Mérida según su rama orientada NO-SE (Stephan, 1982).



Mapa 2.1 Mapa esquemático estructural del complejo tectono-sedimentario de Lara y de las napas asociadas al contacto con los Andes de Mérida (STEPHAN, 1982)

NW

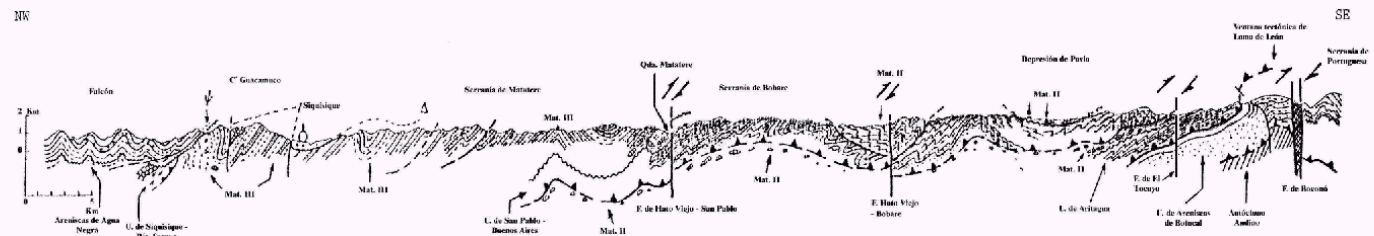
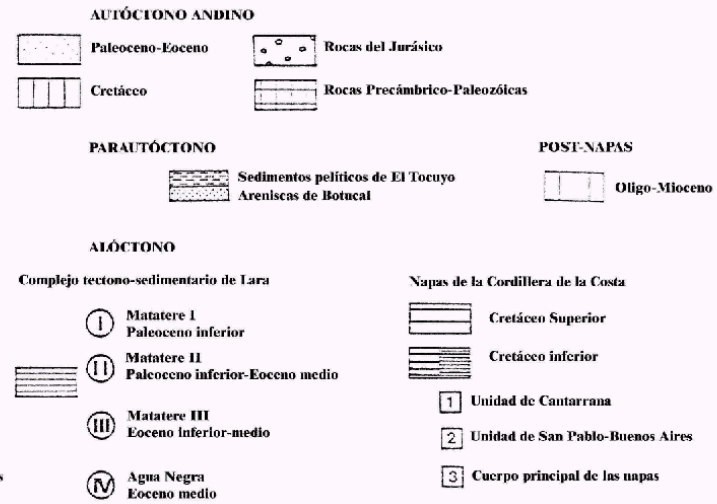


Figura 2.1 Marco geodinámico de la región. Corte geológico "C" STEPHAN (1982), p 351

Marco Geodinámico de la región según STEPHAN (1982)



2.2.4.1 La unidad para autóctona Areniscas de Botucal.

Esta comprende una unidad de edad Paleoceno-Eoceno, se desprende hacia el sur por una parte en el sector de El Tocuyo, entre el autóctono andino y el alóctono cretáceo de la unidad de Aritagua. Por otra parte, a lo largo de la Falla de Boconó, entre el Tocuyo y Barquisimeto. En esta última situación, el para autóctono aparece en medias ventanas o ventanas tectónicas dispuestas en escalón (N-S) en relación a la falla. Al sur inmediato de Barquisimeto, esta unidad aparece en la Ventana de la Loma de León (Stephan, 1977).

Las deformaciones más visibles en esta unidad, son las debidas al estrechamiento y a los colapsos unidos a la elevación andina en el oeste inmediato de El Tocuyo. No obstante, Stephan (1982) detectó la existencia de cizalladuras planas con orientación sur, en las areniscas del río Sanare, al este del Tocuyo y en las areniscas de Quebrada Seca (al este de Quibor).

2.2.4.2 Las Napas de la Cordillera de la Costa

Estas unidades se caracterizan por una fase sinquistosa de edad Paleoceno inferior asociada a pliegues inclinados en capas hacia el SSE. Sin embargo, se observa un gradiente en la intensidad de la deformación que decrece de este a oeste, es decir, del cuerpo principal hacia las unidades de Aritagua y de San Pablo-Buenos Aires. Así, los pliegues sinquistosos abundantes al norte de Barquisimeto (cuerpo principal) y asociados aquí, a un metamorfismo prehnita-pumpellita, son menos numerosos hacia el oeste donde el metamorfismo es de muy bajo grado (Stephan, 1982).

2.2.5 La Falla de Boconó

Para Soulas *et al.* (1985), la zona de falla de Boconó constituye uno de los rasgos geotectónicos más importantes de la parte noroccidental de América del Sur. Esta falla se caracteriza morfológicamente por una alineación de valles y depresiones (cuencas en tracción), orientados en dirección N45°E aproximadamente y se extiende por más de 500 kilómetros, entre la Depresión Táchira (al sur de Cordero) y el Mar

Caribe (área de Morón, Edo. Carabobo), atravesando oblicuamente los Andes de merideños y cortando el extremo occidental de las montañas del Caribe (Cordillera de la Costa y Serranía del Interior). A lo largo de toda su extensión, se observan una o varias trazas activas denominadas Falla de Boconó, la cual se caracteriza por escarpas de falla, canales fluviales desplazados, lagunas de falla, cuencas de tracción y otros rasgos geomorfológicos típicos de fallas rumbo-deslizantes.

De manera general, la característica más resaltante de las fallas rumbo-deslizantes es su extensa linealidad a través de cientos de kilómetros. En esto se diferencian de otros tipos de fallas, con desplazamiento paralelo al buzamiento del plano de falla (fallas normales o de corrimiento), las cuales generalmente tienen trazas sinuosas (Schubert, 1980).

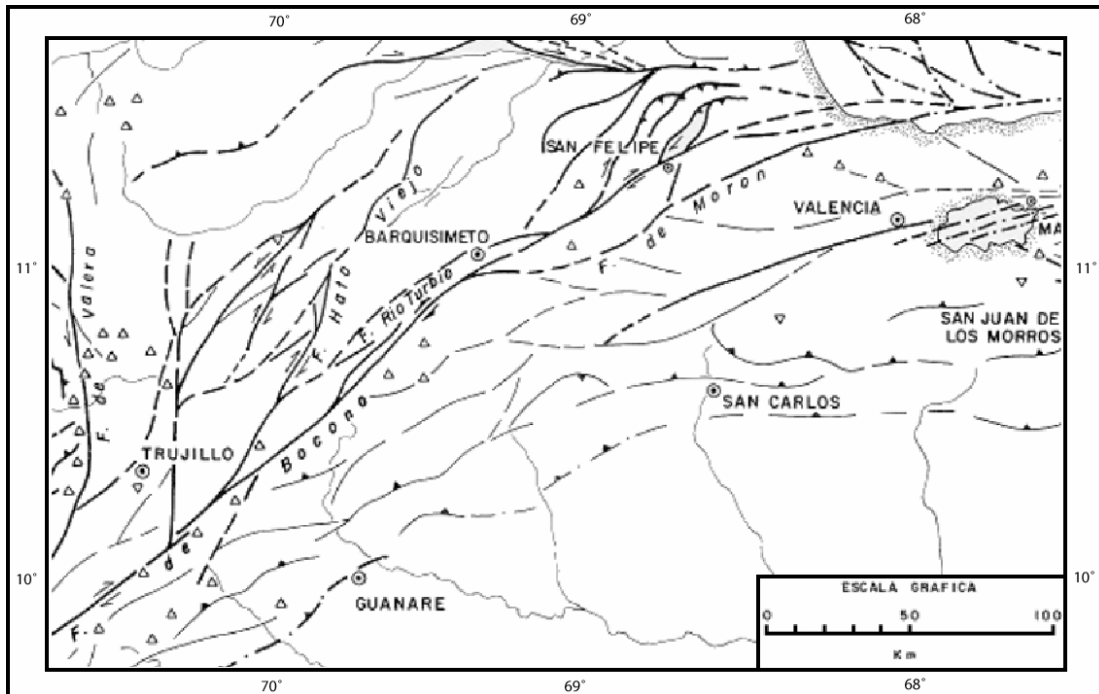
2.2.5.1 Un modelo geotectónico para el sector norte de la Falla de Boconó

Según Casas-Sainz (1992), el sector norte de la Falla de Boconó (margen sur de la Placa Caribe) presenta una curvatura de unos 30° , y pasa de tener dirección NE-SW a E-W al unirse con el sistema de Morón-San Sebastián-El Pilar. Este sector de la falla forma el margen oeste activo durante el cuaternario de la Cuenca de Yaracuy. A partir de estudios fotogeológicos y de campo de este sector de la falla de Boconó, se han observado dos segmentos con diferentes características: a) el segmento Yaritagua-San Felipe (45 Km de longitud) se ha comportado durante el Cuaternario como una falla inversa dextral, produciendo la sedimentación de cuatro niveles de abanicos aluviales; durante este período la actividad tectónica vertical disminuyó en relación a la tasa de sedimentación. b) En el segmento San Felipe-Golfo Triste (55 Km), donde movimiento de la falla se aproxima progresivamente a la dirección E-W, es principalmente lateral derecho.

La característica más resaltante del segmento Yaritagua-San Felipe de la Falla de Boconó es la existencia de una conspicua serie de abanicos aluviales, distribuidos a lo largo de 50 kilómetros de la línea de falla. Allí existen cuatro niveles de depósitos de abanicos, compuestos principalmente de gravas con cantos rodados de

rocas metamórficas y matriz arenosa. Las estructuras sedimentarias presentes denotan un origen acuático de ríos al menos en sus partes media y distal (Casas-Sainz, 1992).

La dirección de transporte de la Falla de Boconó en su sector norte es aproximadamente E-W, lo cual resulta compatible con el movimiento relativo entre las placas Caribe y Sur América (Casas-Sainz, 1992).



Mapa 2.2. Fallas asociadas a la Falla de Boconó en la región de Barquisimeto (tomado de Beltran, 1993)

Por lo tanto, esta parte norte de la Falla de Boconó se comporta de manera distinta a la parte principal (la sección que corta completamente a los Andes venezolanos) que se ubica hacia el sur. Esto puede ser debido al comportamiento de las fallas en el sector sur del límite entre las placas Caribe y Sur América, donde en los Andes venezolanos, la Falla de Boconó actúa como una falla rumbo-deslizante y las fallas de Piedemonte actúan como inversas. (Soulas, 1985).

Entre Sanare y San Felipe, Giraldo (1985) describe sucesivamente a la Falla de Boconó en los tres sectores siguientes:

a) La región de Sanare-Barquisimeto: La falla sigue en esta región en forma muy rectilínea en más de 60 Km siguiendo una dirección N45 E. Se detectan varios ríos en su trayecto: las quebradas Corozal (Versalles), Acarigua (Sanare) y el Río Turbio entre San Miguel y Buena Vista. La falla de Boconó atraviesa la región sur de Barquisimeto, más precisamente en la localidad de El Manzano. Se visualizan buenos afloramientos de cuaternario deformado en la vía que conduce hacia la población de Río Claro. La traza de esta falla proveniente de Loma El León continúa siguiendo la misma dirección para desaparecer en el sector de Las Cuibitas; no obstante, al norte de ésta (1km) hay una segunda traza, la cual comienza al este del Río Turbio para seguir a lo largo de la quebrada Zanjón Agua Viva.

b) El sector de Cabudare: Este corresponde a una depresión considerada como “pull-apart” de edad plio-cuaternaria desarrollada entre dos ramas de la falla de Boconó. Su amplitud máxima es de 12 km, mientras que su longitud puede alcanzar los 20 km. Sus límites norte y sur están definidos por fallas más o menos este-oeste (Giraldo, 1985).

c) El sector de Yaracuy: Este también es considerado como un “Pull-Appart” pliocuaternario, desarrollado entre las fallas activas dextrales de Boconó y de Morón (Schubert, 1982). La serie sedimentaria cuaternaria aflora al pie de la sierra de Aroa, es decir, en la proximidad de la falla de Boconó. El buzamiento general de los sedimentos se inclina hacia el SE, orientando el drenaje que desciende de esta sierra (Giraldo, 1985).

2.2.6 La Cuenca de tracción de Cabudare

Las cuencas de tracción, también conocidas como “Pull-Appart Basins”, se forman en zonas de relevo o de solape entre dos ramales pertenecientes a un sistema de fallas transcurrentes o rumbodeslizantes (“strike-slip faults”); por lo tanto, dichas cuencas pueden estar asociadas tanto a sistemas dextrales como sinestrales. Igualmente, las cuencas de tracción se pueden originar en zonas de curvatura o de alivio (“releasing bends”) de una falla transcurrente (Giraldo y Audemard, 1997).

En Venezuela las cuencas de tracción han sido en su mayoría asociadas al sistema de fallas transcurrente destral de Boconó-San Sebastián-El Pilar. Para Giraldo y Audemard (1997), en la región de Cabudare y alrededores, la sedimentación neógena está representada por los conglomerados y arcillas de la Formación Guamasire, de edad pliocena, y depositada en ambiente continental (abanicos aluviales y canales fluviales). Hacia la base de esta secuencia, se han reconocido por primera vez, intervalos lacustres (varvas) que podrían corresponder al inicio de la apertura de la cuenca de tracción durante el plioceno.

En discordancia angular sobre los sedimentos pliocenos, descansan los conglomerados del pleistoceno inferior (Q_2 - Q_3), sobre los cuales ha sido construida parcialmente la ciudad de Barquisimeto. Estos sedimentos se encuentran bien expuestos a lo largo de la avenida La Ribereña, y de la carretera nueva que va desde Barquisimeto hacia Cabudare, correspondiendo a rampas detríticas de pendientes muy suaves hacia el norte.

La cuenca de tracción de Cabudare, se define como el área situada entre dos ramales subparalelos de la falla de Boconó de orientación aproximada NE-SW; las mejores evidencias tectónicas cuaternarias se encuentran a lo largo de las carreteras que van de Barquisimeto a Río Claro y de Cabudare a Fila El Palito. A nivel regional, el régimen imperante de esfuerzos es de carácter compresivo con una dirección aproximada NW-SE. Sin embargo, a nivel de detalle, se pueden diferenciar un estilo transcurrente compresivo (afuera de la cuenca), y un estilo extensional dentro de la cuenca de tracción (Giraldo y Audemard, 1997).

2.2.7 Estratigrafía asociada

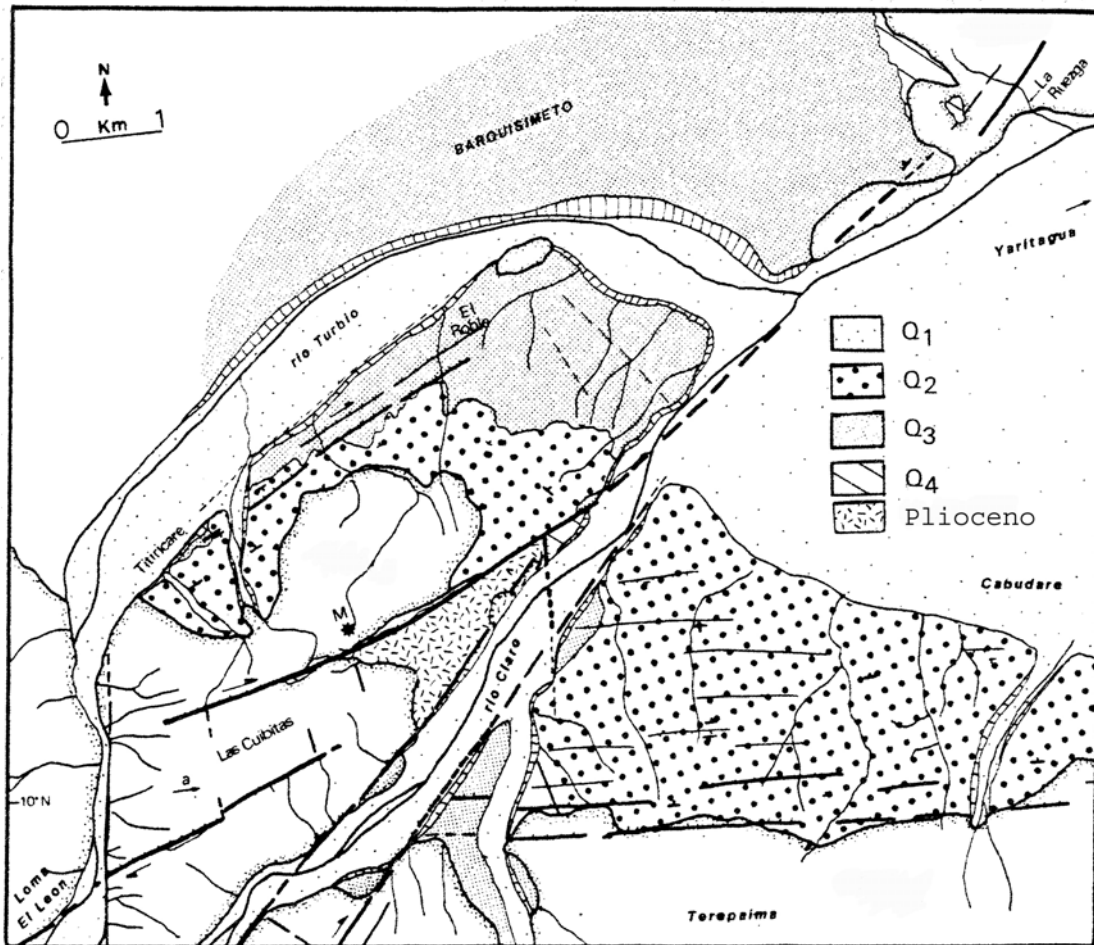
Giraldo (1985) describe cuatro series sedimentarias cuaternarias: Q_1 , Q_2 , Q_3 , y Q_4 , y una secuencia de edad del Plioceno que podría corresponder a la formación Guamasire descrita por Bushman (1964). Esta estratigrafía es válida también para la depresión de Cabudare.

Los aluviones Q_1 son vertidos a lo largo de los grandes valles o planicies: Cabudare, Río Turbio y Río Claro. Estos se caracterizan por la presencia de

conglomerados mal consolidados (de matriz arenosa) con intercalaciones de niveles arcillosos, cuyo color en conjunto es amarillento; la edad de estos sedimentos es considerada aquí como Pleistoceno superior-Holoceno.

Q₂, en discordancia sobre los sedimentos Q₃, está compuesto de conglomerados cimentados por una matriz calcárea. Los sedimentos Q₃ constituyen la terraza de Barquisimeto, cuyo espesor no sobrepasa los 80 m. La característica principal de esta serie es la intercalación en los conglomerados de horizontes arenosos y arcillosos de colores amarillento y anaranjado; su edad estimada es Pleistoceno inferior (Giraldo, 1985).

La discordancia entre el Plioceno y los sedimentos Q₄ está muy bien expuesta a lo largo de la vía descendiente de El Manzano hacia Río Claro. Los conglomerados que se sitúan al este de Barquisimeto son igualmente reportados en la serie sedimentaria Q₄. El color general de estos sedimentos es anaranjado y están bien consolidados; Q₄ es considerado como un Cuaternario antiguo-medio.



Mapa 2.3. Representación de los cuatro niveles de sedimentación (Q₁, Q₂, Q₃ y Q₄) presentes en el área (Giraldo, 1985)

2.2.8 Descripción litológica de las formaciones presentes en la región

2.2.8.1 Grupo Los Cristales

En la región de Barquisimeto-Yaritagua, Bushman (1958, 1959, 1965) describe al Grupo Los Cristales como una espesa secuencia de rocas con metamorfismo de bajo grado. Bushman (*op. cit.*) le asigna a la unidad un espesor variable entre 1500 a 2000 metros. El contacto superior de la formación se desconoce y en el inferior es de falla con la Formación Nirgua. El Grupo Los Cristales consiste de esquistos calcáreos cuarzo-sericíticos, esquistos grafitosos, calizas cristalinas macizas, calizas cristalinas grafitosas laminadas, calizas arenáceas, cuarcitas, metaconglomerados, filitas y esquistos verdes interestratificados. Este grupo contiene

grandes fragmentos de rocas intraformacionales y conglomerados de guijarros y peñones de gran angularidad, lo cual hace descartar, como la gradación en algunas areniscas, un ambiente sedimentario en aguas someras o bajas. Estas características pudieron haberse desarrollado por efectos de deslizamientos submarinos o de corrientes esporádicas de turbidez. (Bellizzia y Rodríguez, 1968)

2.2.8.2 Formación Carorita

El nombre de Formación Carorita fue aplicado por Bushman (1959, 1965) para designar rocas del Cretáceo Inferior que afloran en la región de Barquisimeto. La unidad consiste esencialmente de calizas arenosas feldespáticas de grano grueso en capas macizas, los horizontes delgados se presentan bien foliados. Las areniscas y conglomerados calcáreos a veces muestran gradación. El espesor de la Formación Carorita en el área de Barquisimeto se estima en unos 900 metros (Bellizzia y Rodríguez, 1968).

2.2.8.3 Calizas de Río Turbio

Bushman (1958, 1959) designó a esta unidad como una secuencia de calizas con estratificación mediana a maciza y calizas arenáceas, interestratificadas con areniscas, areniscas calcáreas, algunas limolitas y lutitas arenáceas, que afloran al sur de Barquisimeto. Bushman (1958, 1959) interpreta estos afloramientos como un bloque de falla a lo largo de la falla de Boconó o Barquisimeto, y estima un espesor de unos 350 metros. Bellizzia y Rodríguez (1966, 1967) consideran estas rocas como pertenecientes a la Formación Los Cristales y así aparece en su mapa de la región de Barquisimeto (Bellizzia y Rodríguez, 1968).

2.2.8.4 Formación Bobare

Las rocas de la Formación Bobare constituyen esencialmente la serranía del mismo nombre en el Estado Lara, que se extiende desde el norte de Barquisimeto hasta la Serranía de Churuguara-Siquisique al norte; hacia el este, el Valle de Duaca la separa de la Serranía de Aroa, y hacia el oeste, enlaza con la Serranía de Matatere.

No obstante la complejidad estructural de esta sección, se ha podido estimar un espesor mínimo de 1600 metros. Hacia el este la Formación Bobare aparentemente pasa por transición al Grupo Los Cristales. La Formación Bobare se compone esencialmente de areniscas cuarzosas con las cuales se interstratifican lutitas y limolitas que con frecuencia contienen lentes delgados y concreciones de material ferruginoso. Se considera la edad más probable de los sedimentos de esta formación como Cretáceo Superior (Bellizzia y Rodríguez, 1968).

2.2.8.5 Formación Barquisimeto

La Formación Barquisimeto fue descrita originalmente por Bushman (1958, 1959, 1965) como una espesa sección de calizas, lutitas, limolitas, margas, lutitas silíceas y ftanitas, expuesta en los alrededores de Barquisimeto. La presencia de porfiroblastos de pumpelita y el carácter filítico de algunas lutitas indican un metamorfismo de bajo grado. Coronel y Renz (1960) señalan como localidad tipo el Cerro Volador al norte de Barquisimeto, donde estiman un espesor máximo de 1700 metros. No obstante, el carácter alóctono de la unidad impide mediciones precisas y el espesor estimado depende en cada caso del tamaño de los bloques.

Coronel y Renz (1960) y Bellizzia y Rodríguez (1966, 1967) consideran que la Formación Barquisimeto representa una acumulación heterogénea de masas alóctonas del Cretáceo, embebidas en el “flysch” del Terciario inferior. Como es de esperar en una zona donde la tectónica por gravedad ha jugado un papel de primera importancia, las relaciones de la Formación Barquisimeto con las Formaciones Bobare, Carorita, Matatere y Morán son de carácter anormal y caótico. La edad de la Formación Barquisimeto es Cenomaniense a Maestrichtiense, con posible extensión al paleoceno (Bellizzia y Rodríguez, 1968).

2.2.8.6 Formación Morán

El nombre de Formación Morán fue introducido por Von Der Osten Y Zozaya (1957) para designar una secuencia de lutitas y areniscas con algunas calizas lenticulares, expuesta en el distrito del mismo nombre, en el Estado Lara. En la región

de El Tocuyo la Formación Morán ha sido dividida en dos unidades o miembros: uno inferior lutáceo o “Lutitas de El Tocuyo” y otro superior arenáceo o “Miembro Botucal”. La Formación Morán se compone en su mayor parte de lutitas que representan un 75 % de la secuencia estratigráfica. La Formación Morán posiblemente sea concordante sobre las rocas de las formaciones Cazadero y Barquisimeto, su contacto es discordante con los sedimentos del Terciario Superior y Cuaternario. Al sur está en contacto de falla con la Formación Villanueva. Esta facies de areniscas cuarzosas (ortocuarzitas) pasa lateral y verticalmente a los típicos depósitos de “flysch” del Surco de Barquisimeto y del Surco de Guárico respectivamente (Bellizzia y Rodríguez, 1968).

2.2.8.7 Formación Guamacire

El nombre de Formación Guamacire fue publicado originalmente por Bushman (1959), para designar una secuencia de areniscas, lutitas, margas y calizas que aflora al sur de Barquisimeto, Estado Lara. Guamacire se compone de areniscas, calizas limosas, margas y lutitas, con frecuentes lentes de conglomerados. Bushman (*op. cit.*) indica "al menos 100 m" de espesor. En la localidad tipo y en el área al norte y noreste de Yaritagua, la formación yace discordantemente sobre las rocas metamórficas del Grupo Los Cristales del Cretácico. El contacto superior es con aluviones cuaternarios. Campos *et al.* (1979) y Stephan (1982) asignan los fósiles mencionados arriba al Mioceno Tardío o al Plioceno (www.pdvsa.com/lexico, 2003).

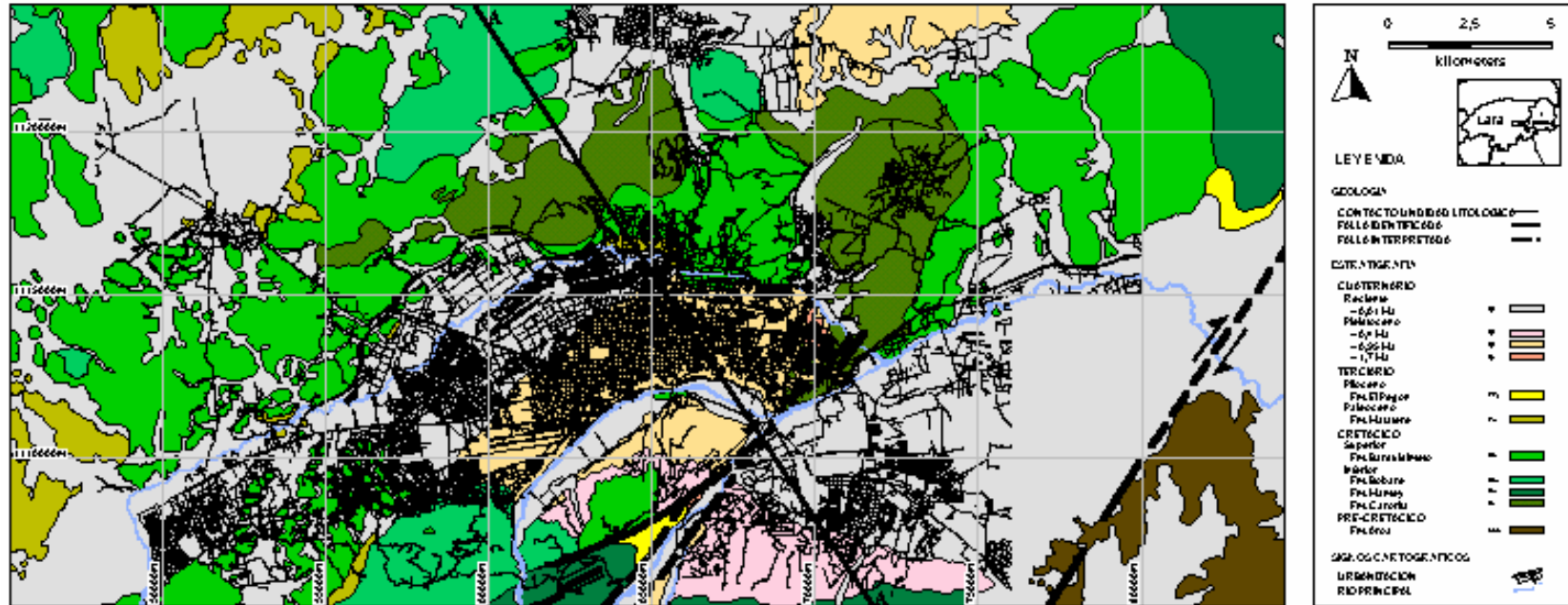
2.2.8.8 Formación El Pegón

La Formación El Pegón fue descrita originalmente por Bushman (1959), designando una secuencia de aluviones pobremente consolidados, expuestos en el área de Yaritagua, Estado Yaracuy. Jefferson (1964) extendió el uso, en sustitución del nombre Guamacire, describió la unidad en la región de Quíbor-Sanare (Estado Lara), indicando que yace en discordancia sobre la Formación Trujillo (Formación Morán). En el área Quíbor-Sanare, Jefferson (*op. cit.*) indica que la Formación El Pegón consiste de gravas de color blanco, marrón y marrón amarillento, con peñones

y guijarros de cuarzo blanco, ftanita y arenisca. En la localidad tipo, la formación tiene unos 100 m de espesor. Al sur de La Piedad, la formación tiene 60 m de espesor, y al noroeste de Acarigua, un espesor promedio de 150 m.

La formación aflora en la región entre las quebradas Grande y El Pegón, al norte de Yaritagua, entre esta población y Barquisimeto, del lado norte de la carretera, en aisladas áreas al sur de La Piedad entre la carretera de Acarigua y la Quebrada Seca, y en la Quebrada Baramis de la misma vía. En la región Quíbor-Sanare, yace discordantemente sobre la Formación Morán (Jefferson, *op. cit.*). En la región Sanare-Cabudare, está en discordancia sobre la Formación Mamey, y está cubierta con terrazas más jóvenes o con aluviones (Campos *et al.*, 1979). Bushman (*op. cit.*) considera que la formación puede ser de edad Mioceno o Plioceno, por correlación con la Formación Guamacire (www.pdvsa.com/lexico, 2003).

MAPA GEOLÓGICO INTEGRADO DE LA REGIÓN



Mapa 2.4 Mapa geológico digital de Barquisimeto y alrededores: en la base cartográfica (Bochold, 2004), con líneas del corte geológico A-A'

Página destinada al corte geológico 2.2 del área de Barquisimeto y alrededores. Disponible en archivo de Autocad (2000) en el Disco Compacto que acompaña a este libro

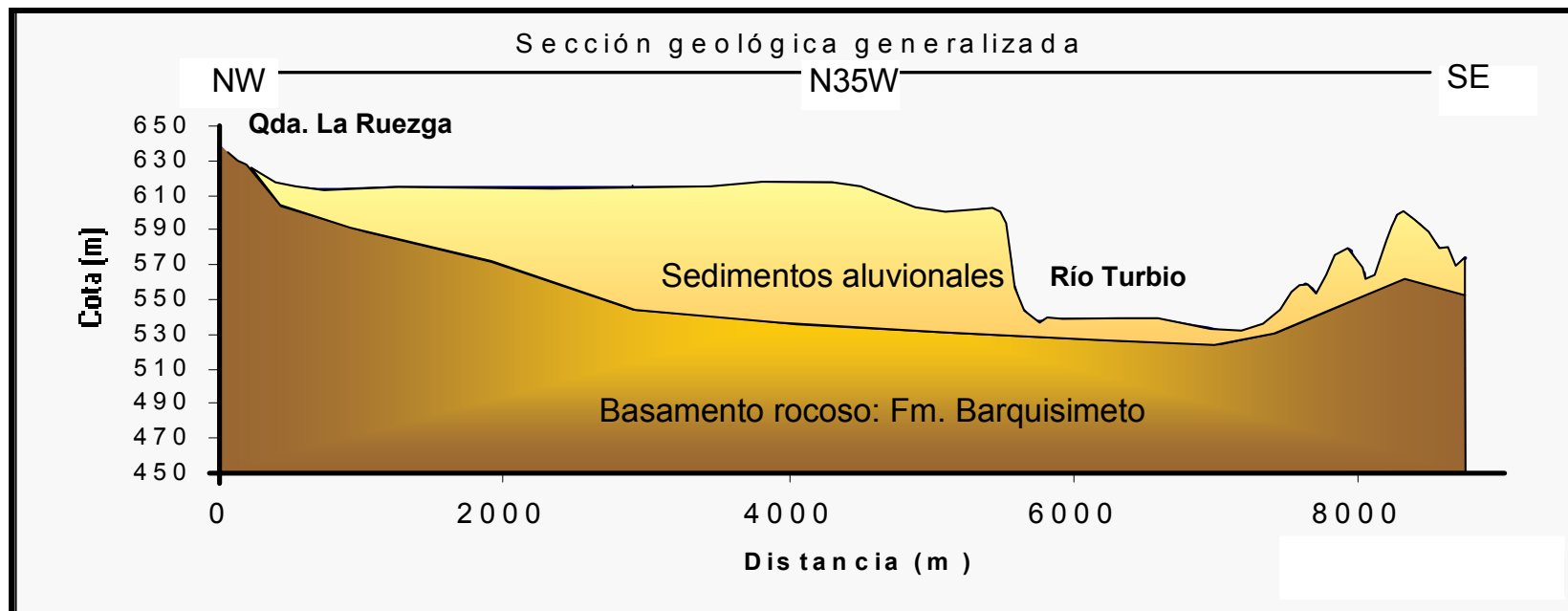


Figura 2.3 Ampliación de la sección geológica generalizada N35W en el tramo Qda. La Ruezga – Río Turbio

El mapa geológico mostrado anteriormente (Mapa 2.4) fue realizado por Bechtold (2004), a partir de la recopilación bibliográfica de la geología regional del Estado Lara. La sección geológica que lo acompaña (Fig. 2.3) se creó para este proyecto a partir de los datos obtenidos de dicha recopilación, además de consultas de diversos autores que han realizado secciones geológicas en zonas aledañas, tales como Bellizzia y Rodríguez (1968), Skerleck (1979) y Stephan (1982). Dichas secciones geológicas muestran el modelo de napas estipulado para la región. De la integración de estos trabajos, se construyó una sección que atraviesa la ciudad de Barquisimeto cuyo límite sur se encuentra antes de la traza de relevo de la falla de Boconó que conforma el límite sur de la Cuenca de Tracción de Cabudare.

Como se puede observar, la Formación Barquisimeto subyace la terraza aluvional de la ciudad, su contacto con la Formación Mamey se encuentra definido por la Falla de Boconó en el sur. Hacia el norte se observa un cuerpo alóctono de la formación Matatere II definida por Stephan (1982). Y en contacto de falla inversa con la Formación Barquisimeto y más al norte, se observa la Formación Carorita, la cual se considera igualmente un cuerpo alóctono de la Formación Mamey.

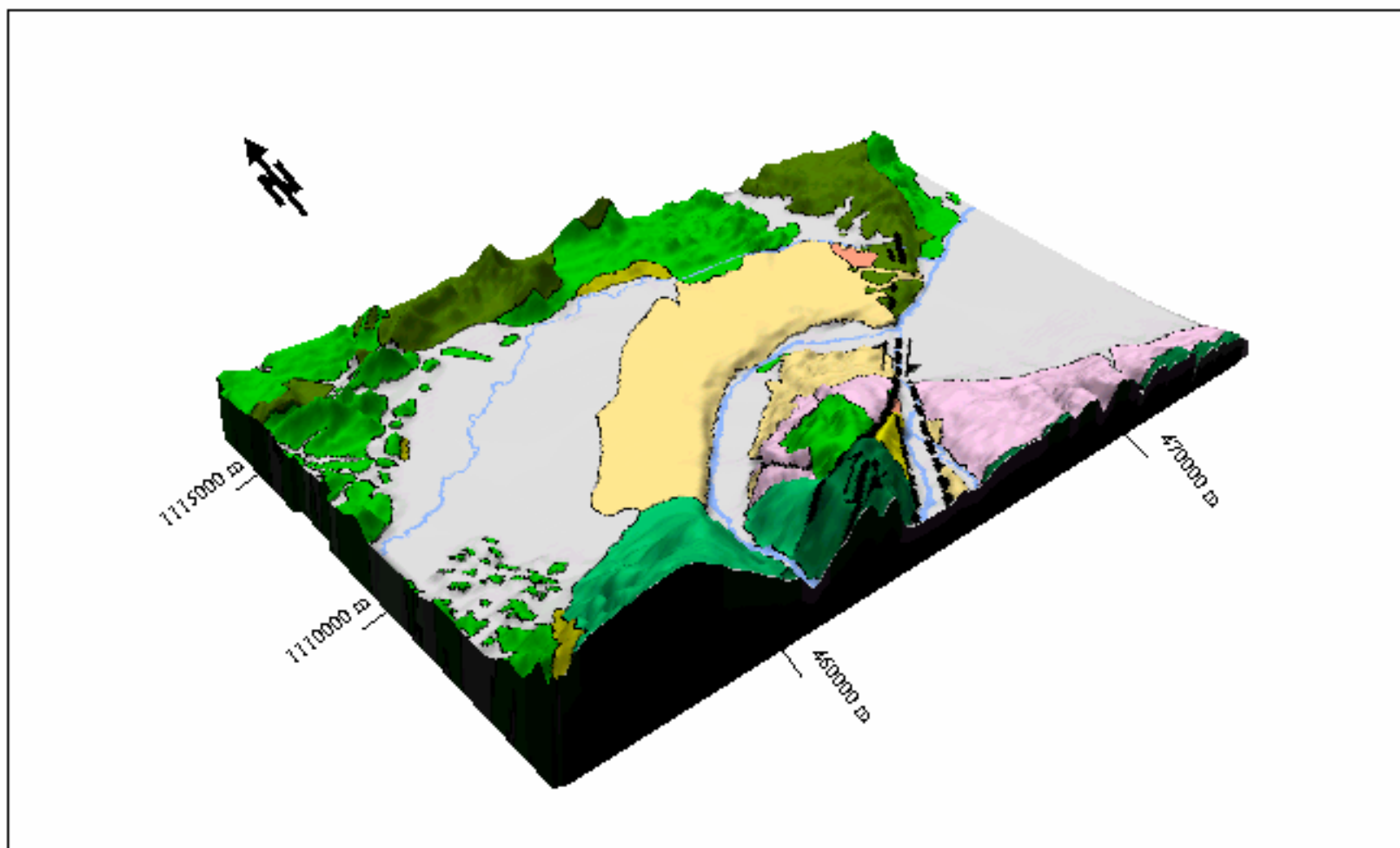


Figura 2.4 Modelo topográfico 3D del mapa geológico digital de Barquisimeto y alrededores: con énfasis cuaternario factor de exageración vertical = 5 (Bechtold, 2004)

CAPÍTULO III

SÍSMICA DE REFRACCIÓN

3.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DEL MÉTODO

Los métodos sísmicos constituyen una herramienta fundamental en la prospección geofísica, y trabajan con la información que proporcionan las ondas elásticas que se propagan por el subsuelo.

Existen dos métodos fundamentales de adquisición sísmica, a saber: la sísmica de reflexión, utilizada principalmente en la prospección de hidrocarburos y se basa en la generación de ondas a través de fuentes de alto poder y la recolección de las reflexiones de las mismas cuando éstas han penetrado desde la superficie hasta diversos cambios de propiedades acústicas distribuidos en el subsuelo que causan dichas reflexiones. El método sísmico de refracción utilizado principalmente para fines geotécnicos, prospección de acuíferos, así como delimitación de las primeras capas del subsuelo. Las propiedades de las rocas que influyen en el comportamiento de las ondas sísmicas son: petrografía (contenido en minerales), compactación, porosidad (porcentaje espacios vacíos), tipo de fluido presente en los poros (aire, agua, petróleo, gas), entre otras.

3.1.1 Ondas sísmicas

A partir de una fuente de ondas sísmicas situada en la superficie se generan distintos tipos de ondas:

- La onda directa, que se propaga a partir de la fuente de ondas sísmicas en el medio superior con a velocidad uniforme V_1 .
- La onda reflejada, que se genera de la reflexión de la onda directa incidente en la interface entre el medio 1 y el medio 2, y se propaga con velocidad V_1 .

Una porción de la onda incidente en la interface entre el medio 1 y el medio 2 viaja por dicha interface y se refracta. Cuando $V_2 > V_1$, la onda refractada se propaga en el segundo medio con la velocidad V_2 .

Para medios isótropos, el movimiento de las partículas de ondas P está orientado en la dirección de propagación, de aquí que se llamen también ondas compresionales; el movimiento de las partículas de las ondas S está orientado en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda, por ello también se llaman ondas transversales. Como el plano es perpendicular a la dirección de propagación, se tienen dos direcciones posibles; tales direcciones van a producir la polarización de la onda S con componentes en cada dirección del plano.

3.1.2 Ley de Snell

Las ondas sísmicas como las ondas P y S, son ondas elásticas. Una onda sísmica incidente en una superficie de separación entre dos medios experimenta dos fenómenos: reflexión y refracción. Según la Ley de Snell, $\theta_i = \theta_{\text{refrac}}$, donde θ_i es el ángulo de incidencia del cuerpo de ondas y θ_{refrac} corresponde al ángulo de refracción del mismo. Para el fenómeno de refracción de las ondas sísmicas se cumple esta ley de la siguiente manera:

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_{\text{refrac}}} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.1)$$

donde V_1 corresponde a la velocidad de la onda en el medio 1 y V_2 la velocidad del medio 2. Para el caso de una interface inclinada o buzante entre dos medios (inclinada hacia la izquierda), se obtienen las dromocrónicas:

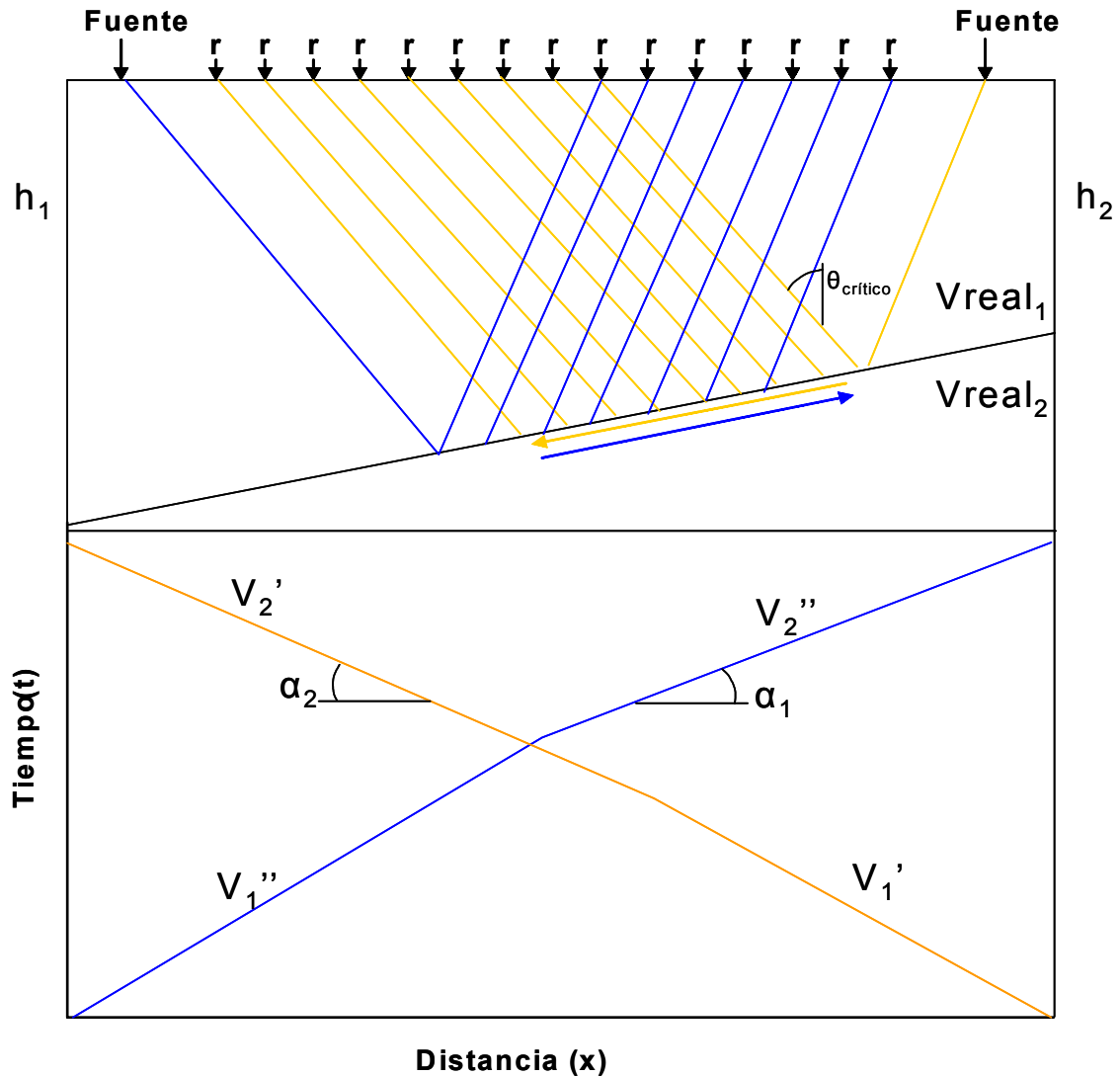


Figura 3.1 Representación de los tiempos de arribo de las ondas sísmicas que se refractan en una interface buzando hacia la izquierda (modificado de www.plata.uda).

Del gráfico 3.4 se observa que V_2' es una velocidad aparente menor a la velocidad V_2'' , aún cuando ambas pertenecen al mismo medio. Esto es debido a que a medida que el frente de ondas que se propaga por el segundo medio, va a su vez alejándose en profundidad del punto de recepción. Caso contrario sucede con V_2'' , cuya recta de representación se observa con menor pendiente, es decir, presenta una velocidad aparente mayor en el segundo medio, ya que al propagarse por el mismo medio, el frente de ondas se va acercando en profundidad al punto de recepción. Por lo tanto, la velocidad real del segundo medio será mayor que V_2' y menor a V_2'' .

3.1.3 Métodos de adquisición aplicados en sismica de refracción

Los métodos de adquisición de la información en la sismica de refracción son diseñados según su objetivo, es decir, dependen tanto de la profundidad como de la dimensión del estudio. El método básico de refracción es empleado mediante tendidos en línea o “in line”, el cual consiste en un tendido de receptores equiespaciados y la fuente se ubica en uno de los extremos; aunque para mayor control de los tiempos de llegada, así como mejorar la resolución de la información, usualmente se efectúa un disparo en el extremo opuesto (contradisparo). De manera similar, es igualmente utilizado un disparo intermedio en el tendido, y esta modalidad de geometría de adquisición se denomina propagación dividida o “split spread”.

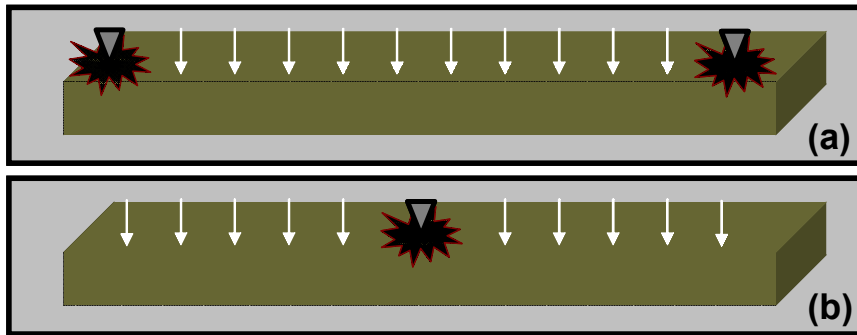


Figura 3.2 Geometrías de adquisición en sismica de refracción, a) tipo “in line”, b) tipo “split spread” (las flechas indican los receptores y los triángulos representan las fuentes sísmicas).

3.2 MARCO METODOLÓGICO

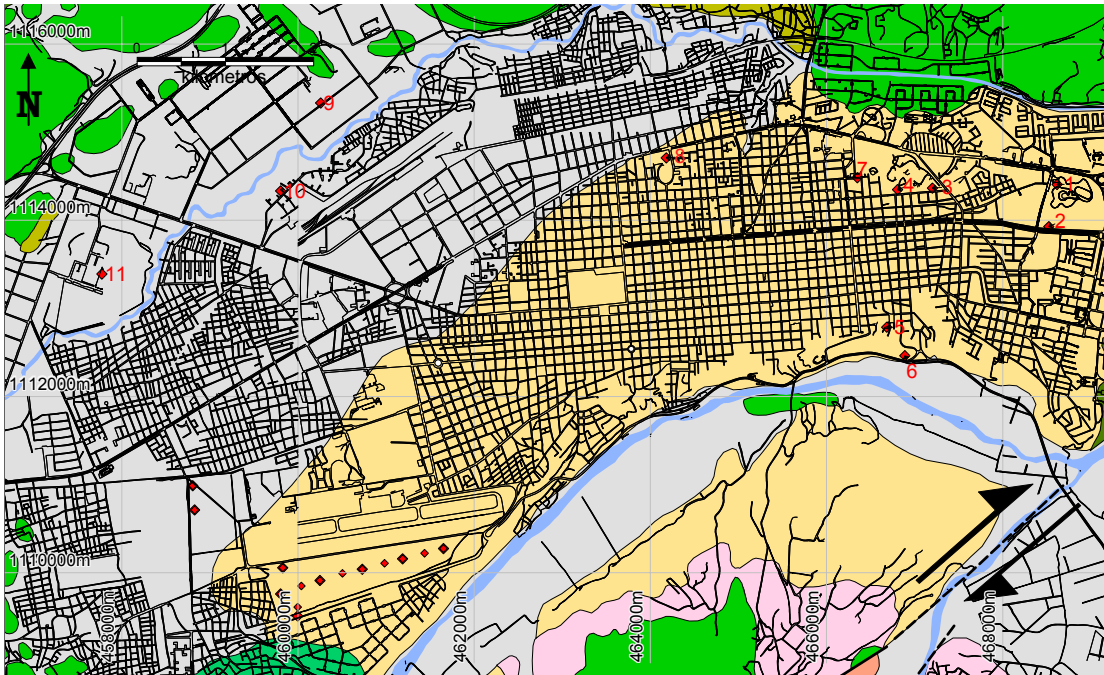
3.2.1 Metodología de adquisición

Durante el mes de junio de 1999, se adquirieron 11 perfiles sísmicos de refracción en distintos puntos de la ciudad de Barquisimeto, específicamente distribuidos en la zona central de la ciudad, aplicando la misma metodología de adquisición en todos los tendidos:

- ✓ El espaciamiento entre receptores en los distintos tendidos fue de 2 y 5 metros de longitud dependiendo de las dimensiones del espacio de trabajo, así como de la profundidad de prospección; realizándose disparos en los extremos y, dependiendo de la longitud, dos o tres disparos intermedios, y utilizando la mitad de la distancia entre dos receptores como la distancia fuente - primer receptor en todos los casos.
- ✓ La fuente de energía consistió de golpes con una mandarina. Se utilizaron dos tipos de placas para inducir estos campos de ondas al subsuelo, una era plana y se golpeaba en sentido vertical para generar ondas P, y la otra permitía ser golpeada por los lados en sentido horizontal para generar ondas S.
- ✓ El sismógrafo, marca Geometrics-Strataview, se programó para grabar durante un segundo a una tasa de muestreo de 0,10 milisegundos, con capacidad para 48 canales de grabación, para lo cual se utilizaron dos cables de 24 canales cada uno.

Las líneas sísmicas principales de este proyecto se ubicaron en el área del aeropuerto de Barquisimeto, una de dos kilómetros de longitud y nueve disparos en total para la adquisición de datos de ondas S, y cinco disparos para ondas P, con orientación E-W ubicada en la zona de seguridad del Aeropuerto de Barquisimeto; y dos líneas de 480 metros dispuestas de manera perpendicular a la anterior. Una de ellas se interceptaba con la línea de mayor longitud, y la otra se ubicó en la zona oeste de la Base Aérea Militar de Barquisimeto. Para estas últimas líneas, al igual que para la principal, se realizaron disparos tanto para ondas S como para ondas P. Estas líneas sísmicas se adquirieron durante el mes de noviembre del año 2002.

- ✓ Para los disparos sísmicos se utilizaron cargas explosivas de 5 kilos de pentolita (suministradas por la compañía CAVIM.), colocadas a una profundidad de 6 metros. El espaciamiento entre receptores fue de 10 metros y la distancia fuente-primer receptor era de 5 metros (mitad de la distancia entre receptores) tanto en los disparos intermedios como en los extremos de los tendidos.
- ✓ Para los disparos de ondas P se utilizaron receptores de componente vertical de 30 Hz, y para los disparos de ondas S se utilizaron geófonos de componente horizontal de 28 Hz.



Mapa 3.1 Ubicación de los puntos de disparo de las líneas sísmicas en el área del Aeropuerto de Barquisimeto, la Base Aérea Militar y en el resto de la ciudad

3.2.2 Metodología de procesamiento

Una vez descargados los datos del sismógrafo a la computadora, estos fueron tratados mediante el programa REFLEX (Sandmeier, 1998). Al crear un nuevo proyecto en el programa, éste automáticamente genera seis subcarpetas dentro de la carpeta creada previamente con la identificación del proyecto o línea sísmica a procesar (ASCII, LINEDATA, MODEL, PROCDATA, ROHDATA y TRAVTIME).

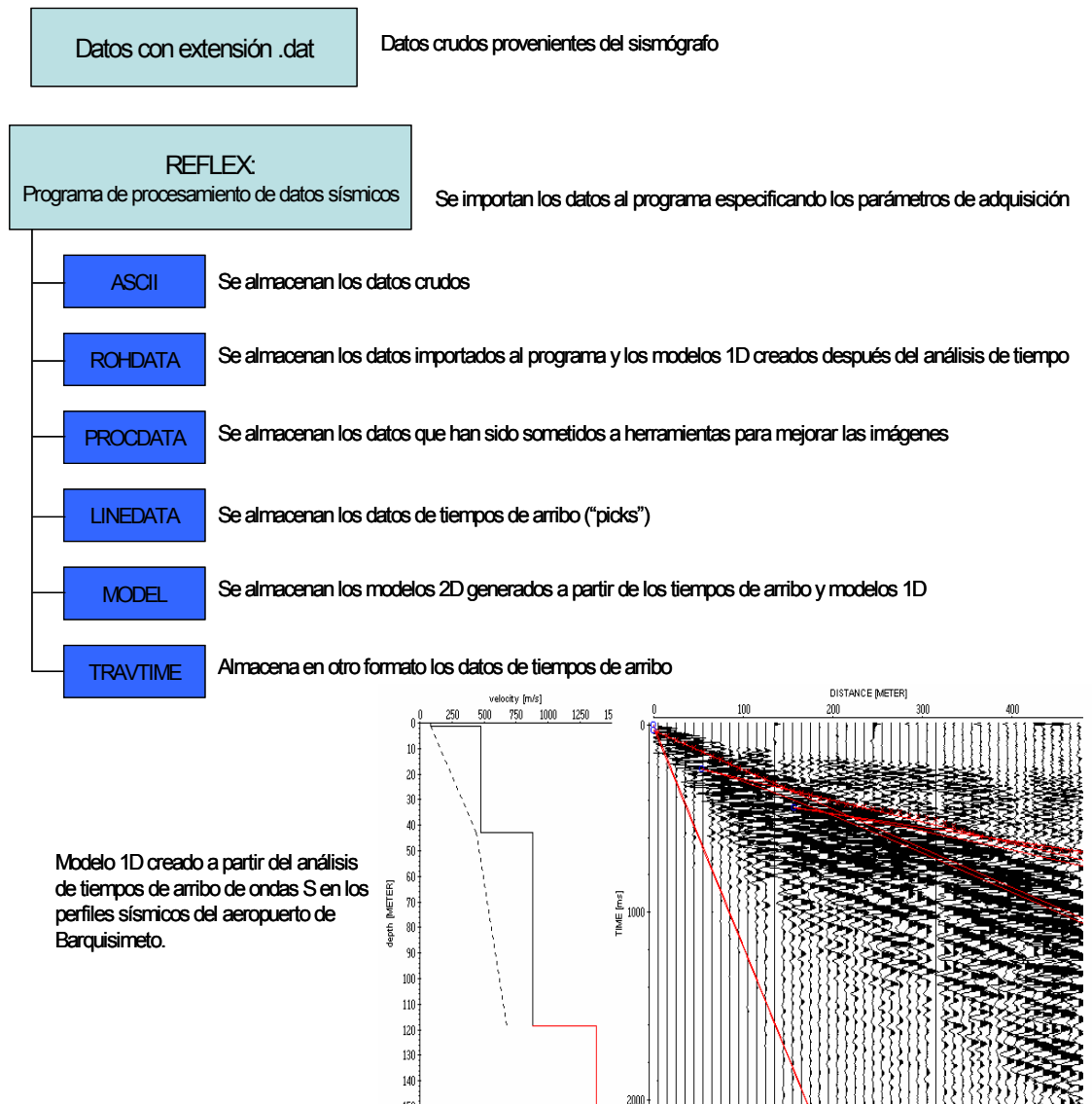


Figura 3.3 Resumen esquemático del análisis de los datos sísmicos de refracción mediante el programa REFLEX.

Con los datos de los modelos 1D, así como de fuentes complementarias de información, tales como revisiones bibliográficas acerca de la geología del área, datos geotécnicos, etc., se utilizó el programa RAYINVR (Zelt y Smith, 1992) para generar los modelos sísmicos 2D mediante trazados de rayos, tanto para ondas S como para ondas P de los tendidos del Aeropuerto y la Base Aérea Militar.

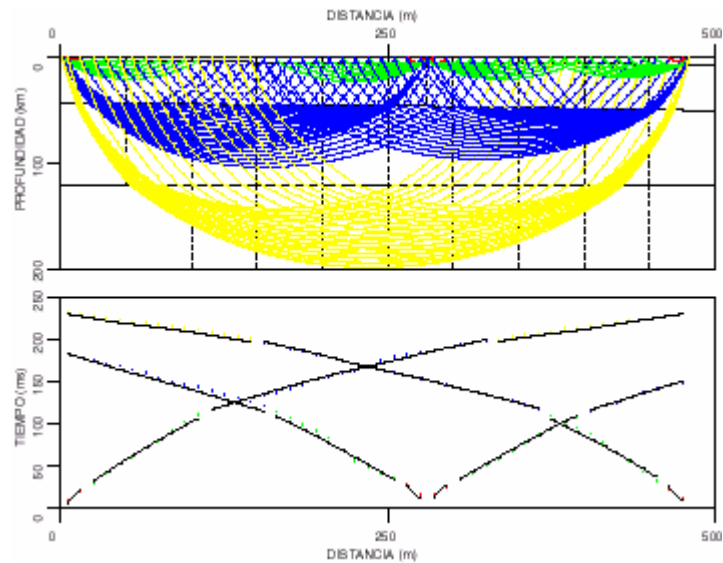


Figura 3.4 Modelo sísmico 2D generado mediante el programa RAYINVR

Utilizando los valores de velocidades obtenidos en todos los perfiles sísmicos, se generó en “Map Info” un mapa de distribución de velocidades V_{s30} que comprende la zona oeste (área del aeropuerto) y en la zona central de la ciudad donde los perfiles sísmicos mostraban resoluciones adecuadas de sus imágenes para obtener datos precisos de velocidades.

3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Mediante el programa RAYINVR se realizaron los modelos 2D de los tres perfiles sísmicos del Aeropuerto y la Base Aérea Militar, resultando tres pares de modelos correspondientes a los datos tanto de P como de S. Dichos modelos se presentan a continuación con sus valores promedios de velocidades y espesores de capas.

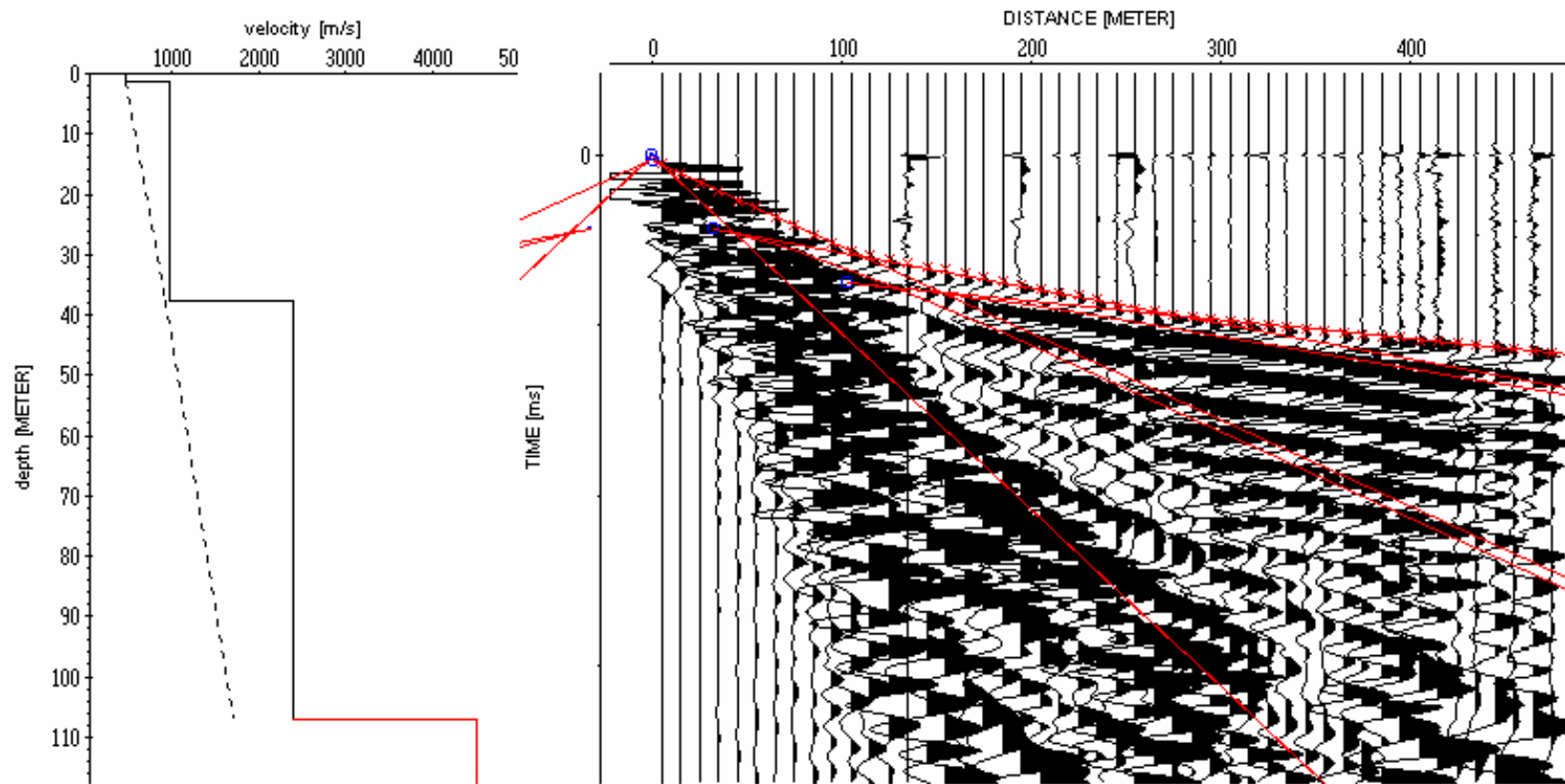


Figura 3.5 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 0 metros del perfil sísmico de ondas P de la Base Aérea Militar

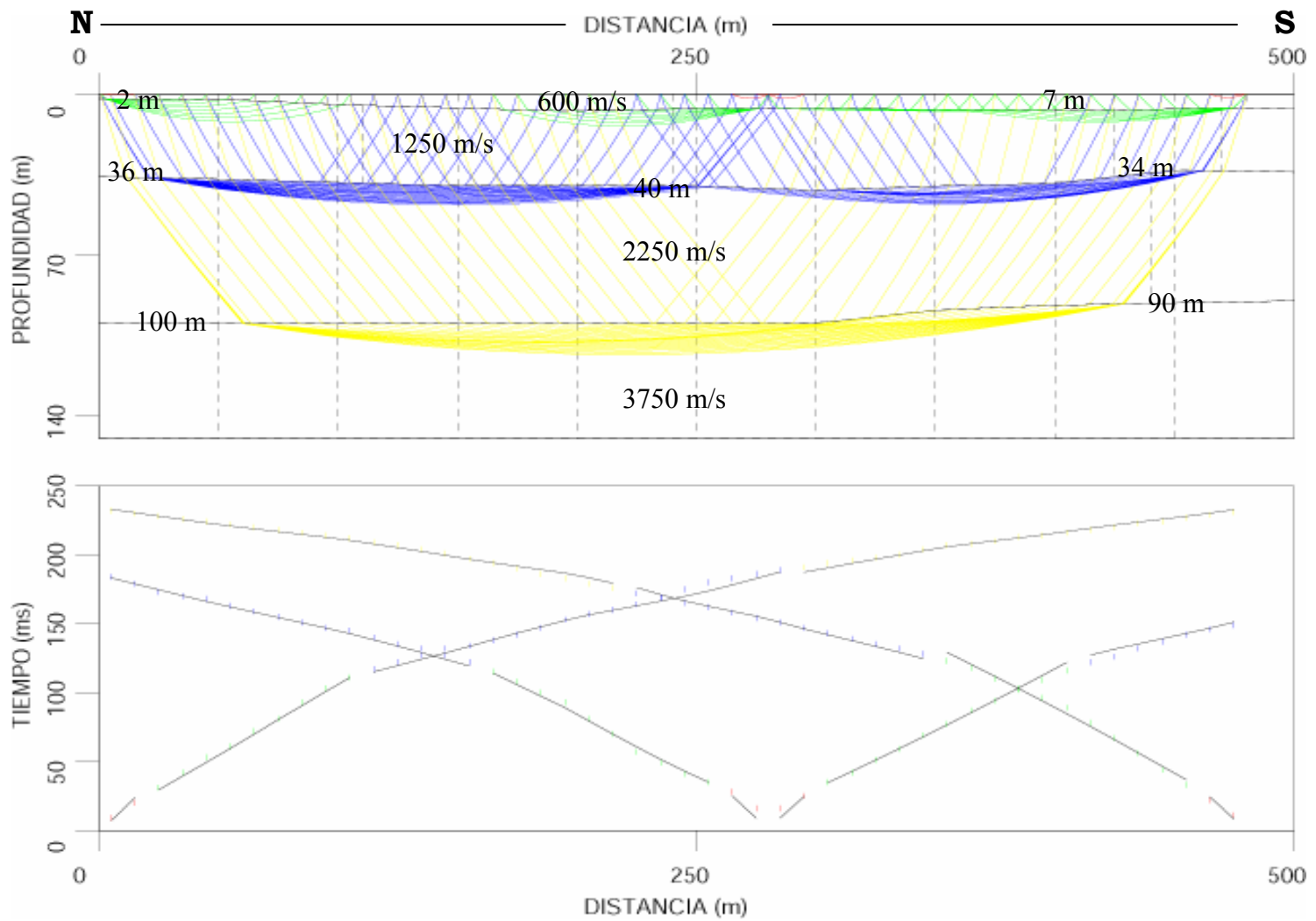


Figura 3.6 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la Base Aérea Militar

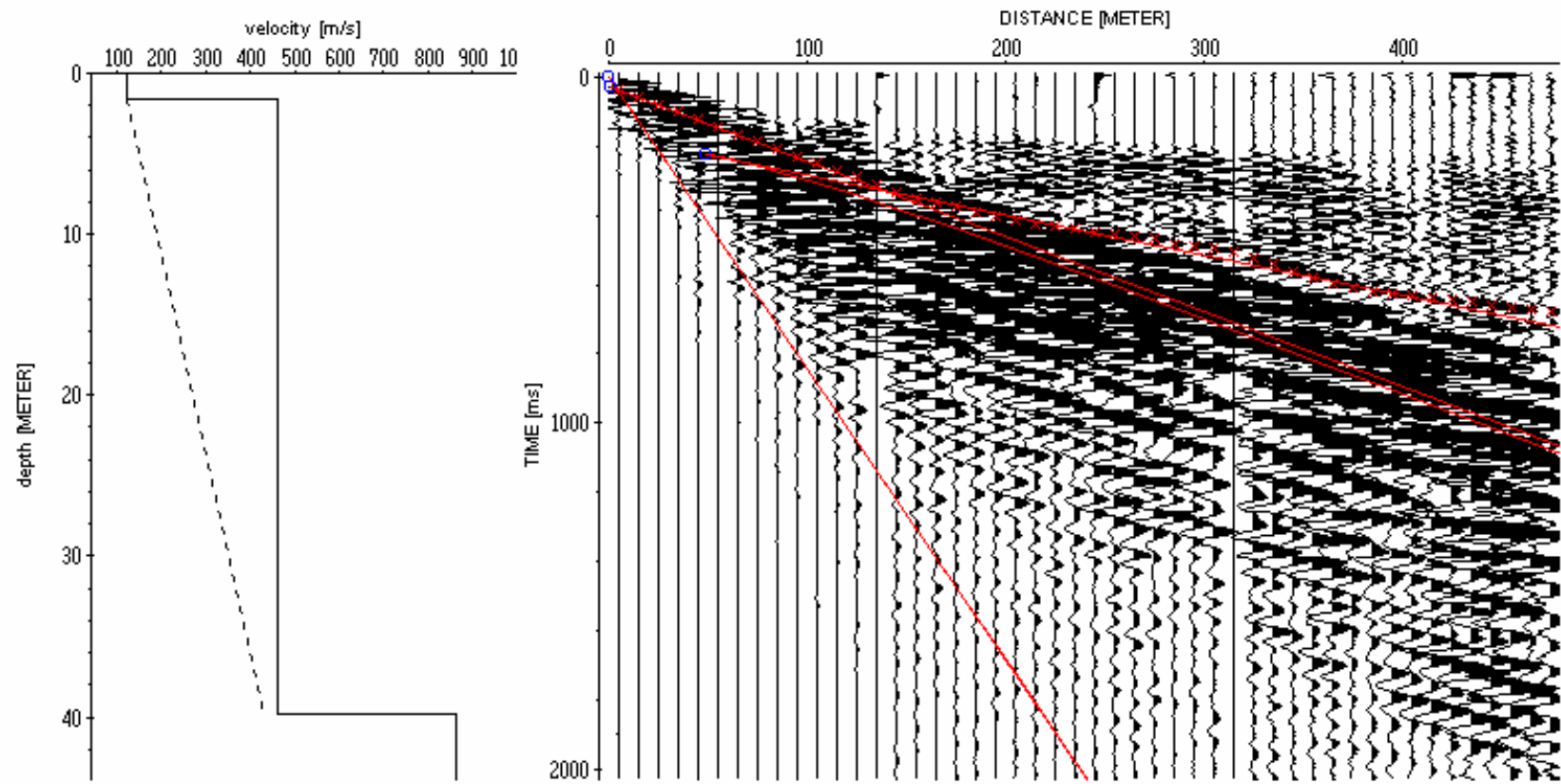


Figura 3.7 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 0 metros del perfil sísmico de ondas S de la Base Aérea Militar

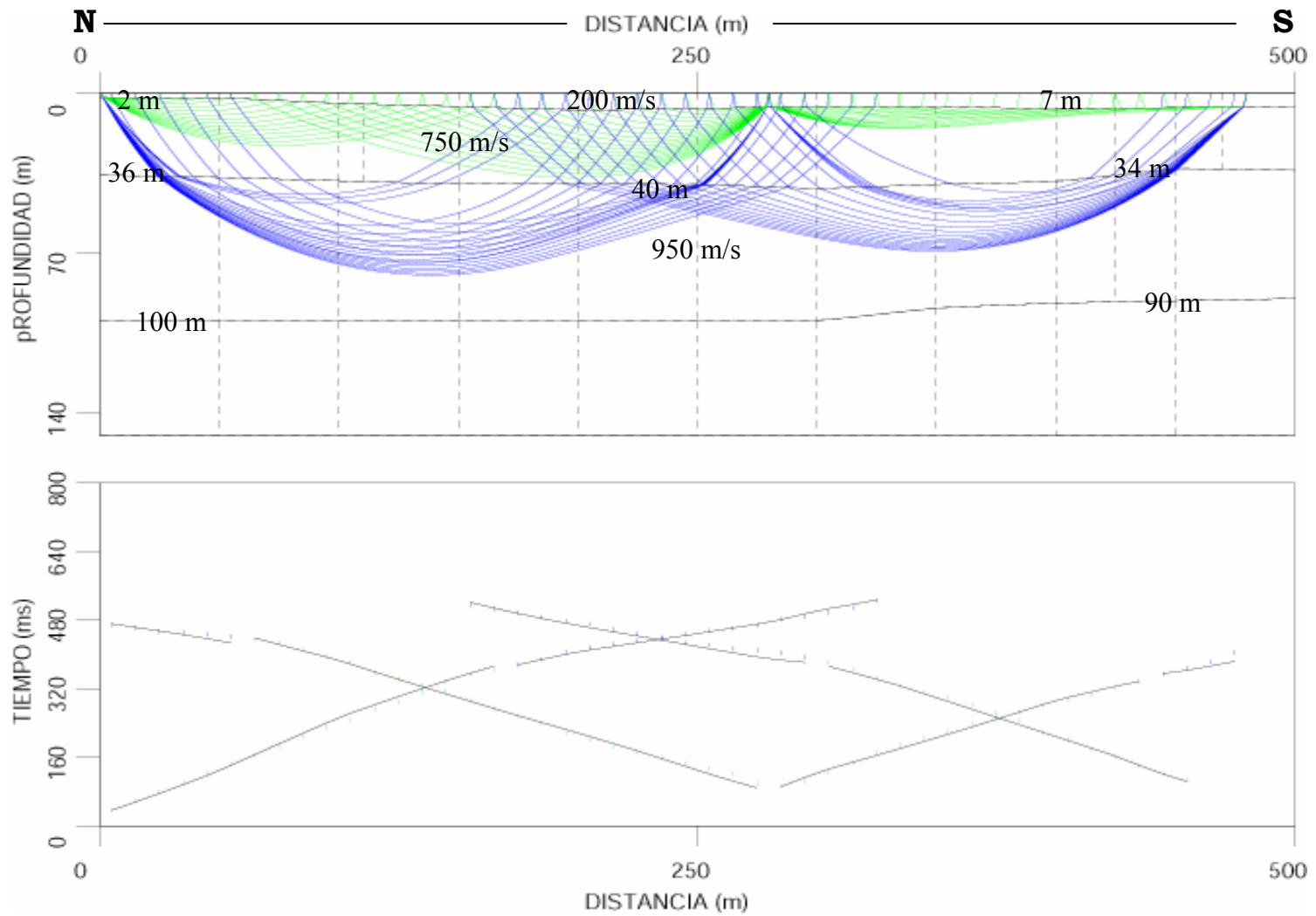


Figura 3.8 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la Base Aérea Militar

En los modelos 2D de velocidades de los perfiles P y S de la base aérea militar, se representaron según los modelos 1D generados en REFLEX, cuatro capas: la primera posee un espesor de 2 a 7 metros desde su extremo norte al extremo sur respectivamente. Las velocidades de onda P se encuentran cercanas a 650 m/s, siendo la velocidad de onda de corte para dicha capa 200 m/s. La segunda capa posee valores aproximados de 1250 m/s para la onda P, mientras que para la onda S se estableció un promedio de 750 m/s. Su límite con la tercera capa se encuentra entre 33 y 40 metros de profundidad. Esta interface litológica corresponde al contacto entre la terraza aluvial y el basamento rocoso de la Formación Barquisimeto. En esta última, el valor promedio de velocidades P es 2250 m/s y la velocidad de onda de corte se encuentra cercana a los 950 m/s. La última capa observada en este perfil se encuentra entre 90 y 100 metros de profundidad, con velocidades de onda P mayores a 3750 m/s. Sin embargo la existencia de esta última interface es cuestionable debido a la poca capacidad de penetración de la fuente sísmica. No obstante, podría ser adjudicada a la sección de la Formación Barquisimeto no afectada por la meteorización debida a la capa freática.

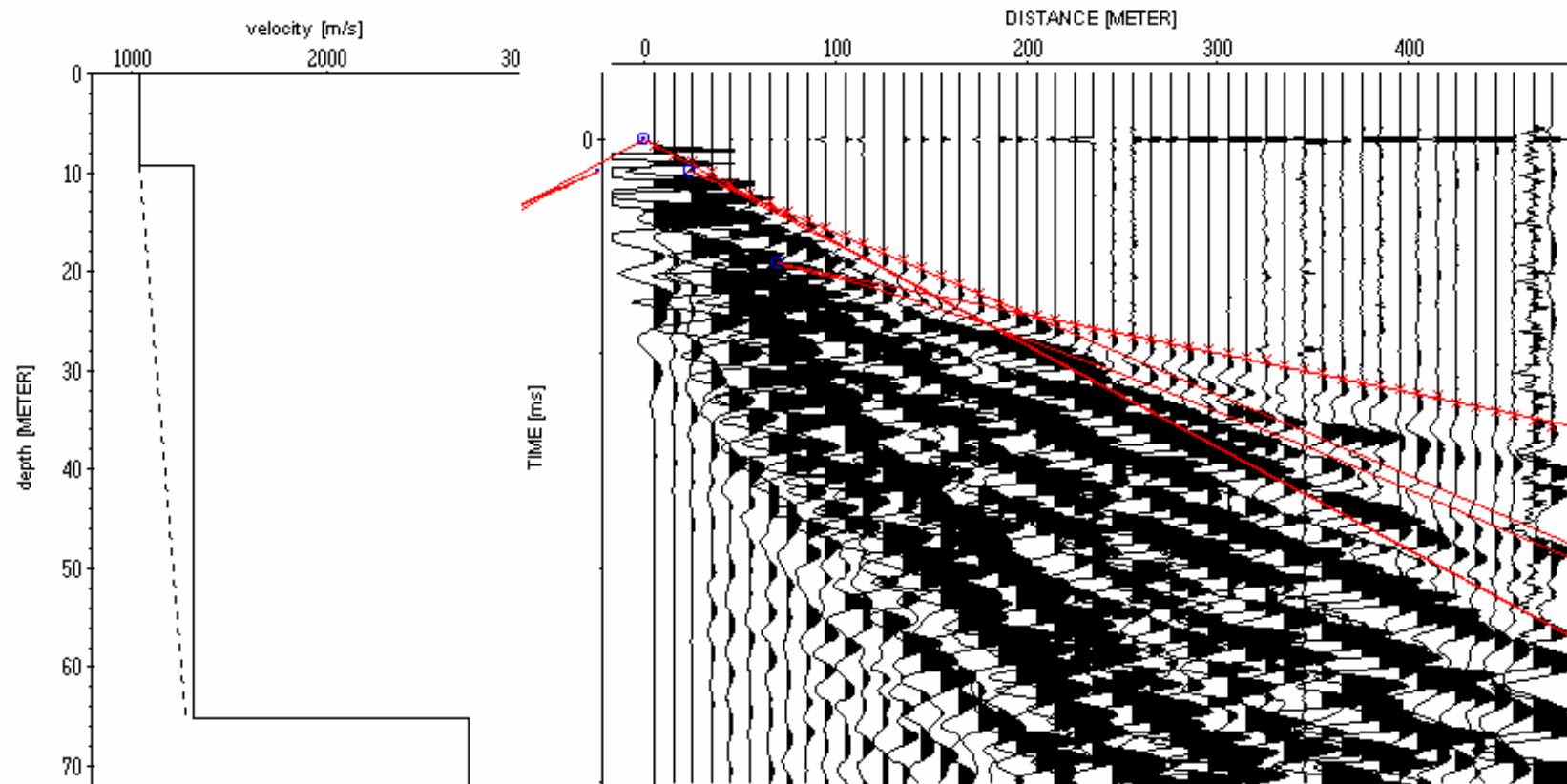


Figura 3.9 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 0 metros del perfil N-S de ondas P del Aeropuerto de Barquisimeto

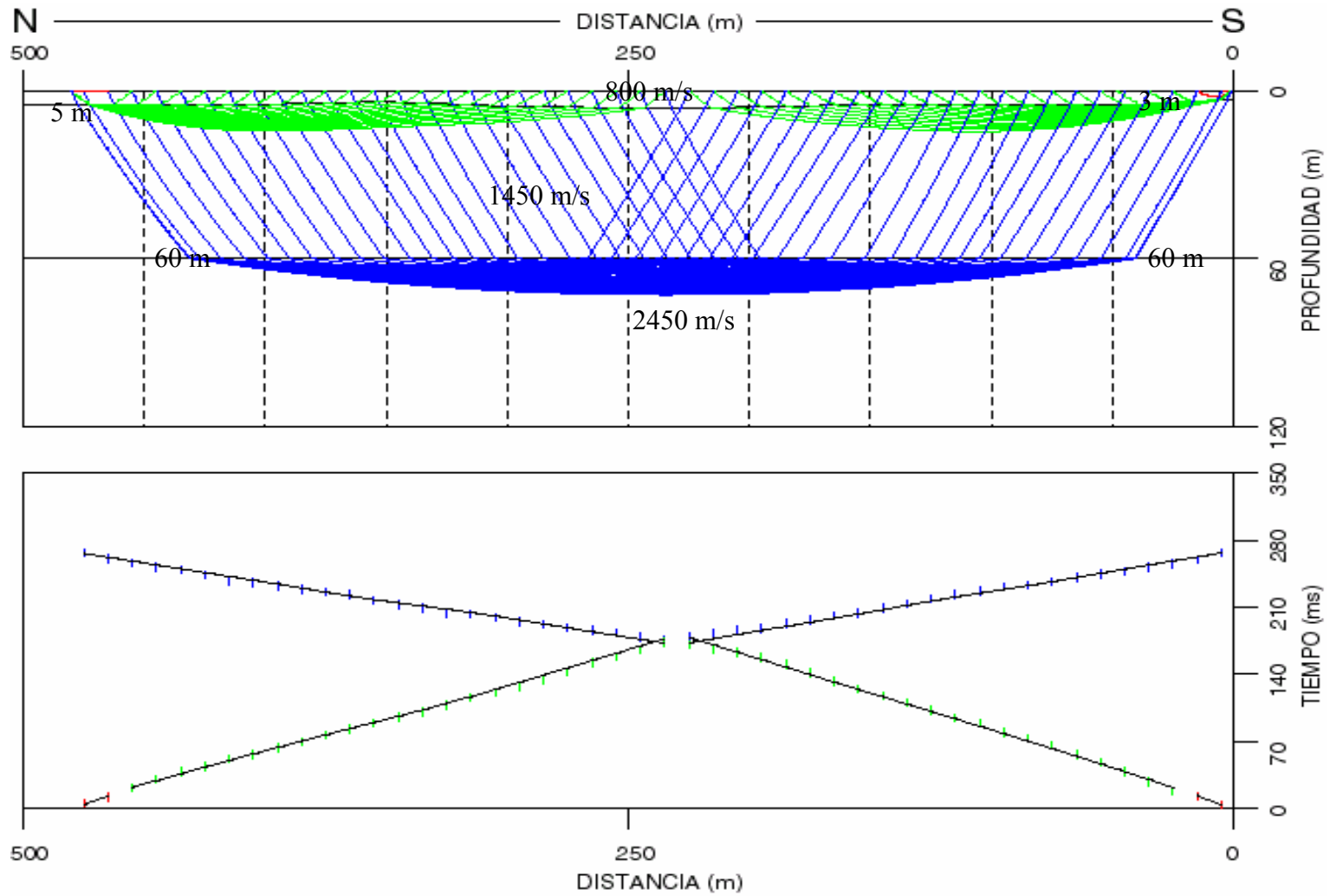


Figura 3.10 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la línea N-S del Aeropuerto de Barquisimeto

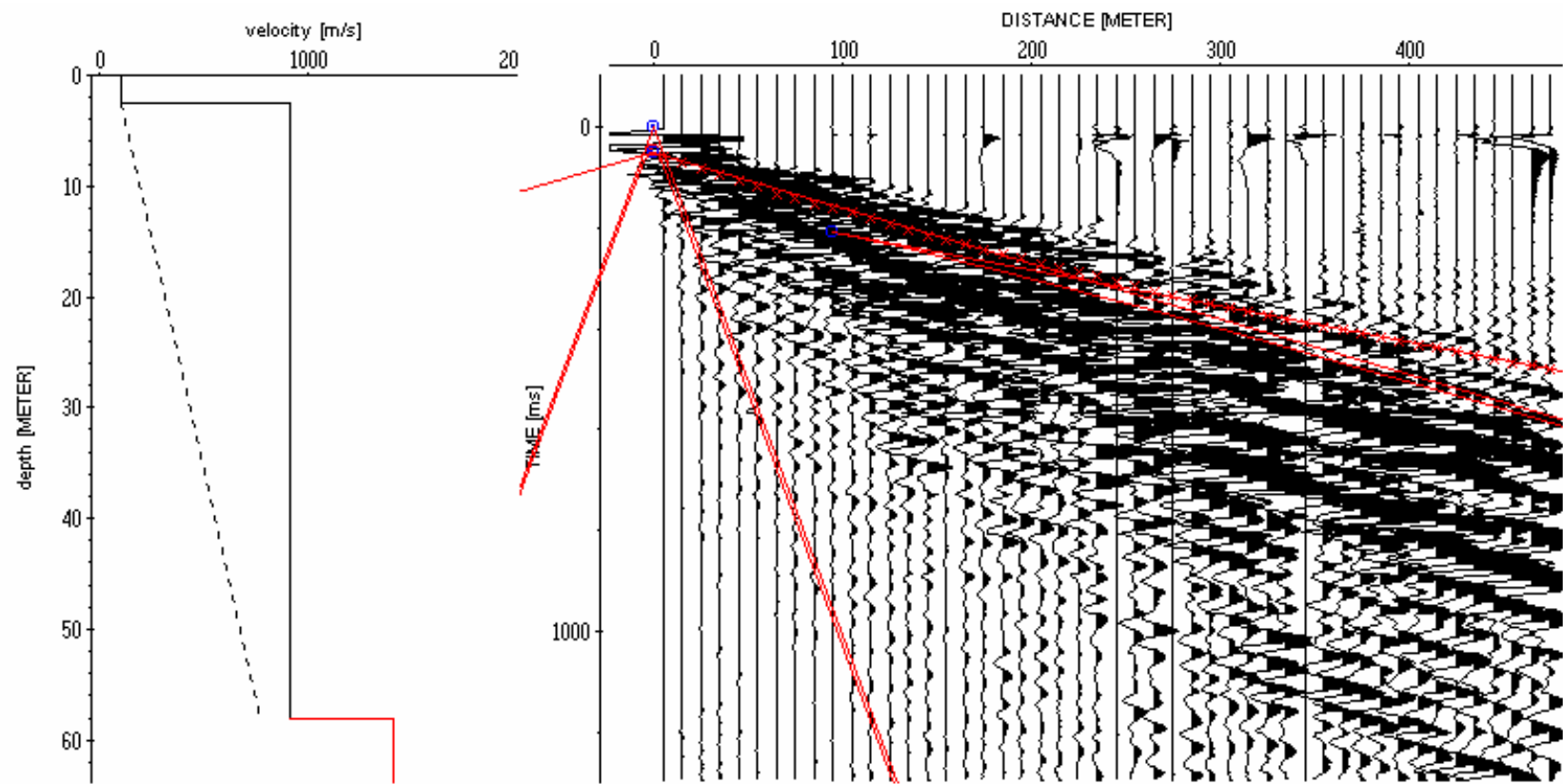


Figura 3.11 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 0 metros del perfil N-S de ondas S del Aeropuerto de Barquisimeto

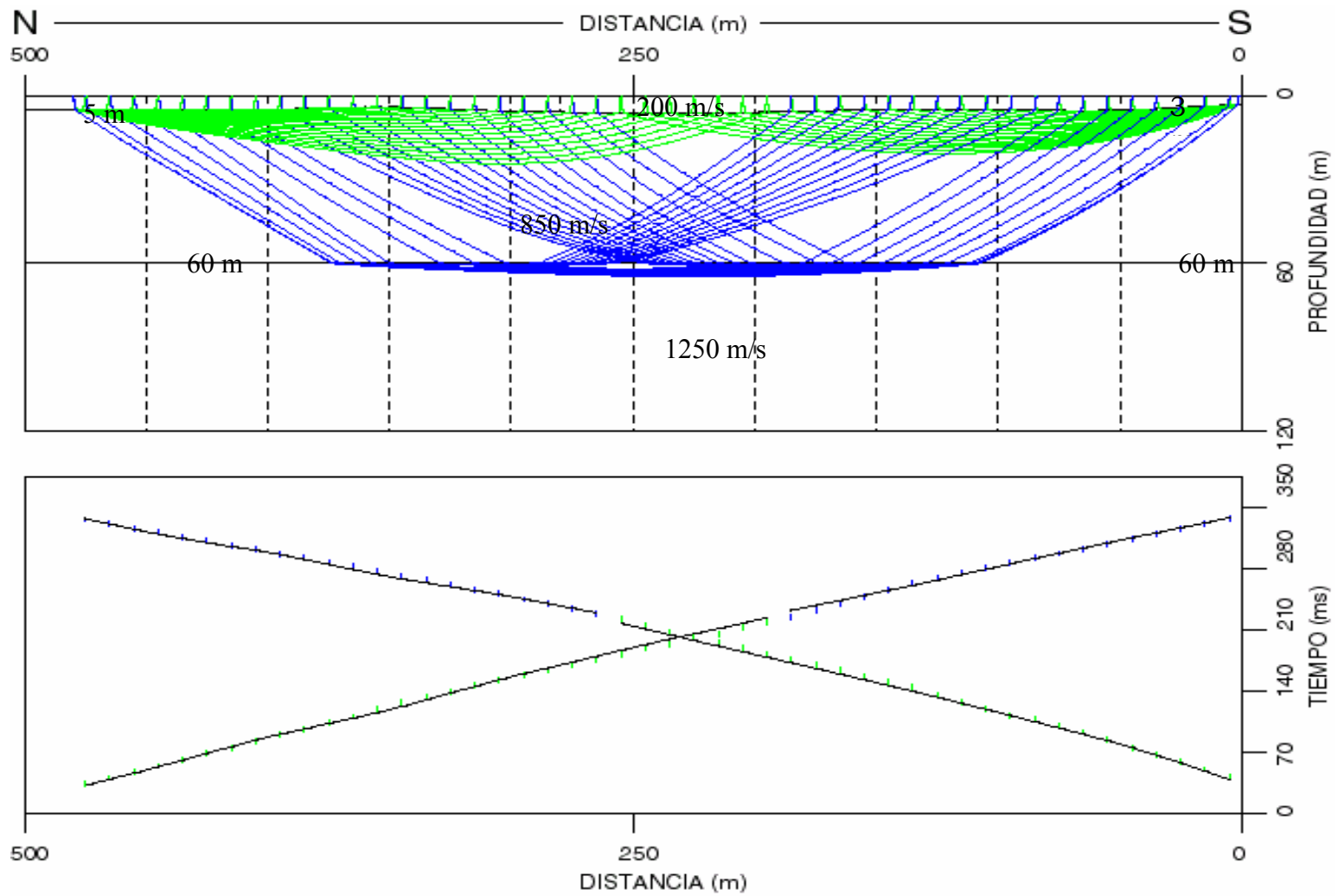


Figura 3.12 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la línea N-S del Aeropuerto de Barquisimeto

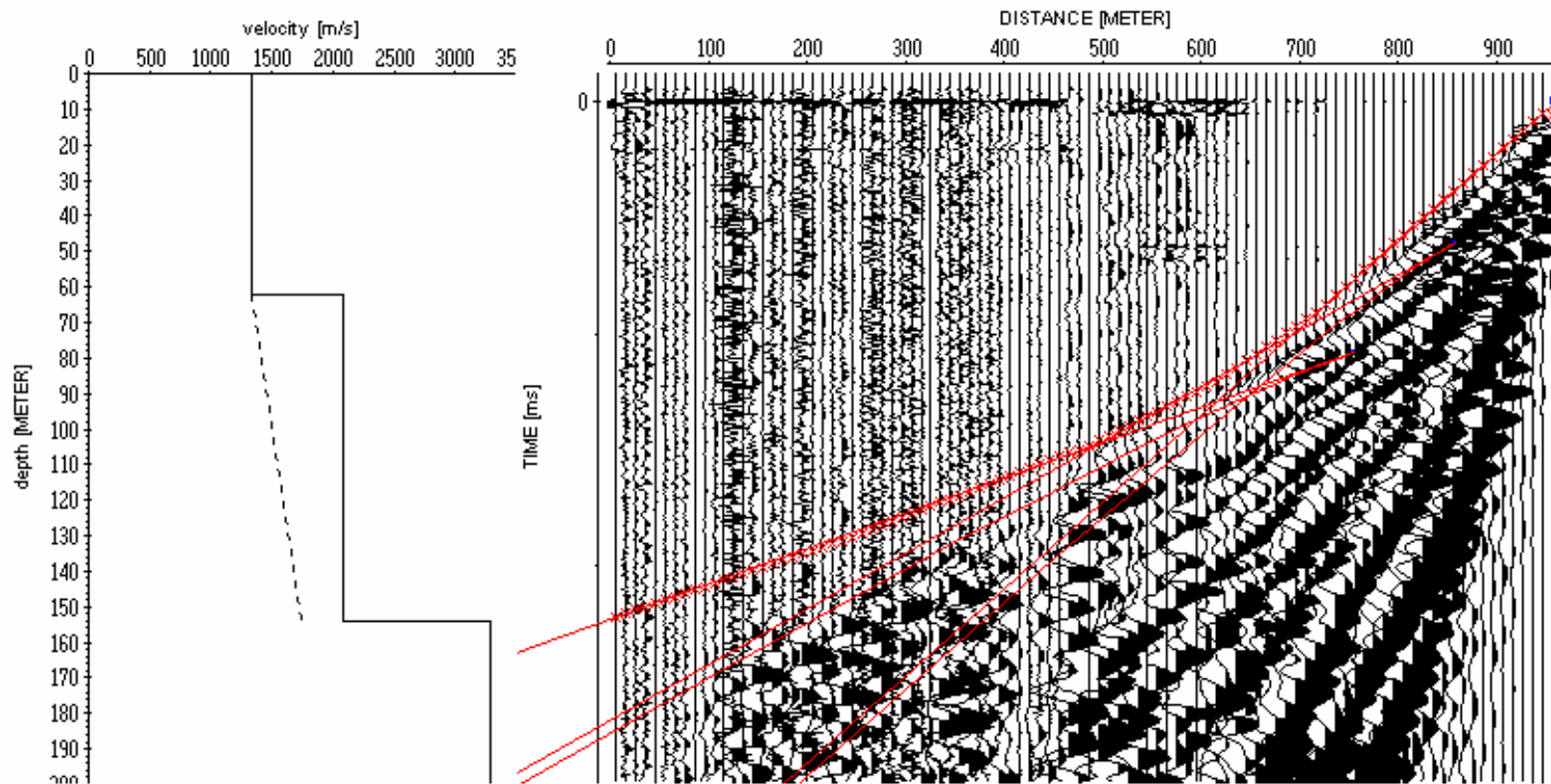


Figura 3.13 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 960 metros del perfil E-W de ondas P del Aeropuerto de Barquisimeto

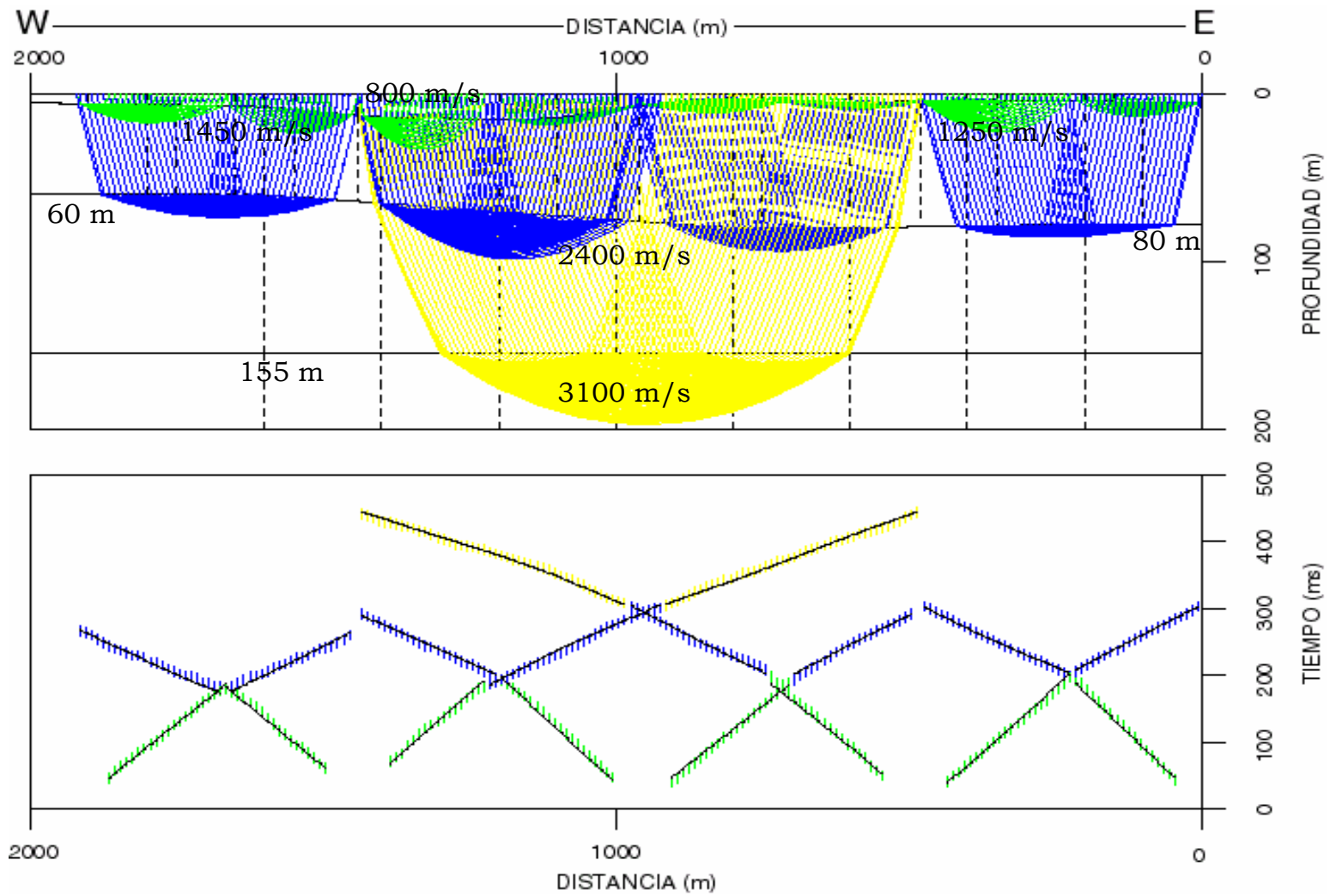


Figura 3.14 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la línea principal del Aeropuerto de Barquisimeto

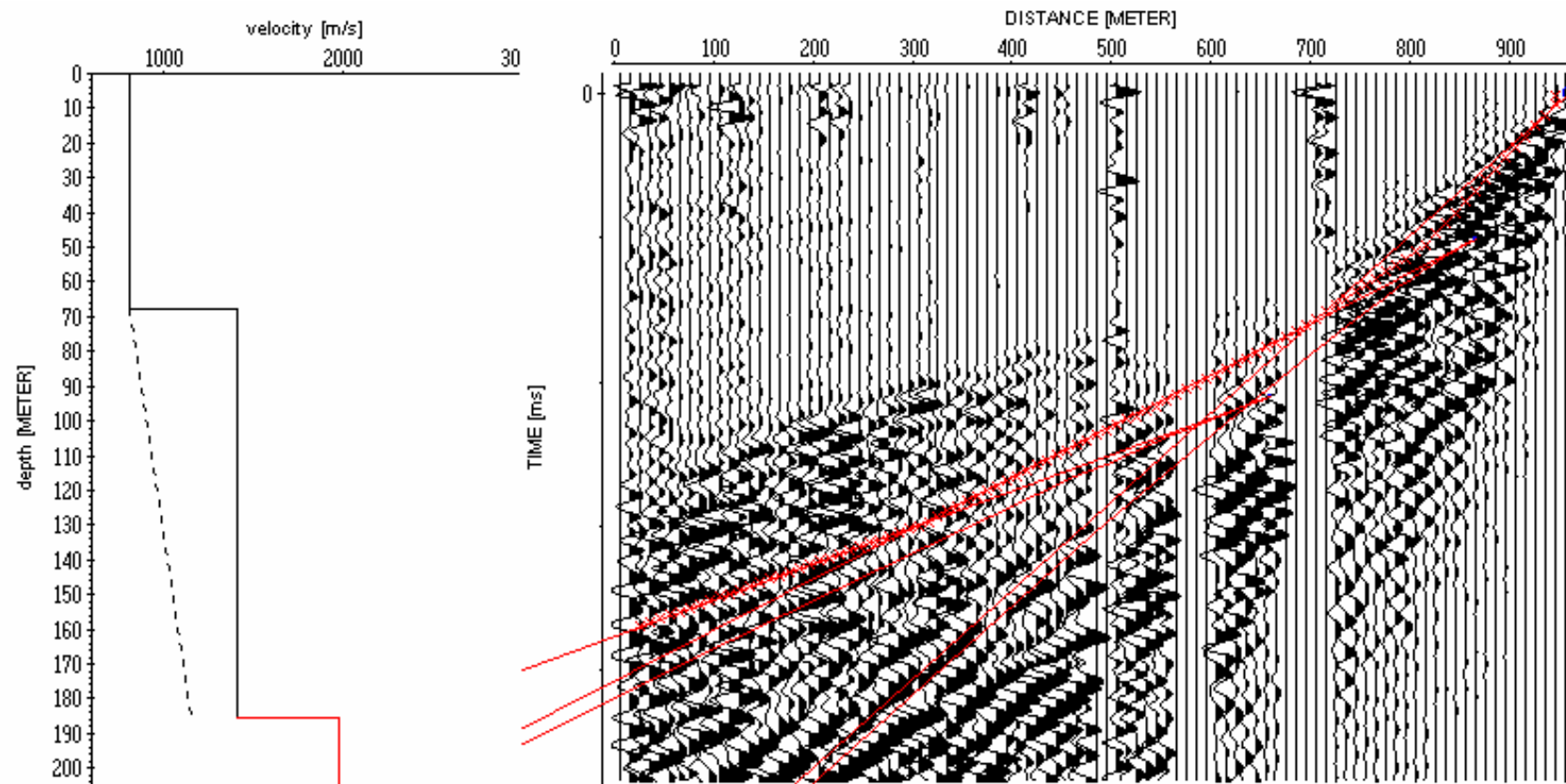


Figura 3.15 Identificación de tiempos de arribo y modelado 1D del disparo en 960 metros del perfil E-W de ondas S del Aeropuerto de Barquisimeto

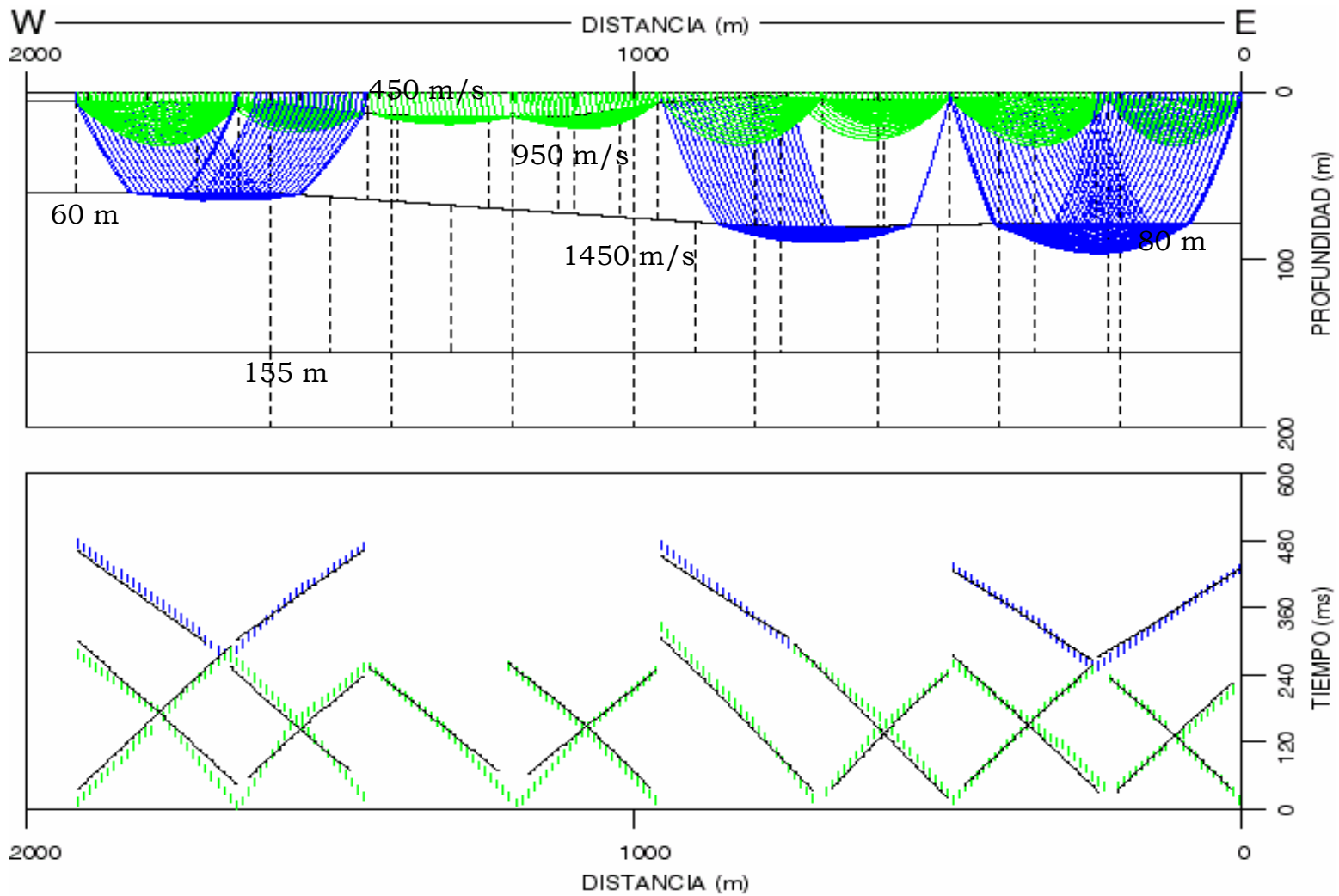


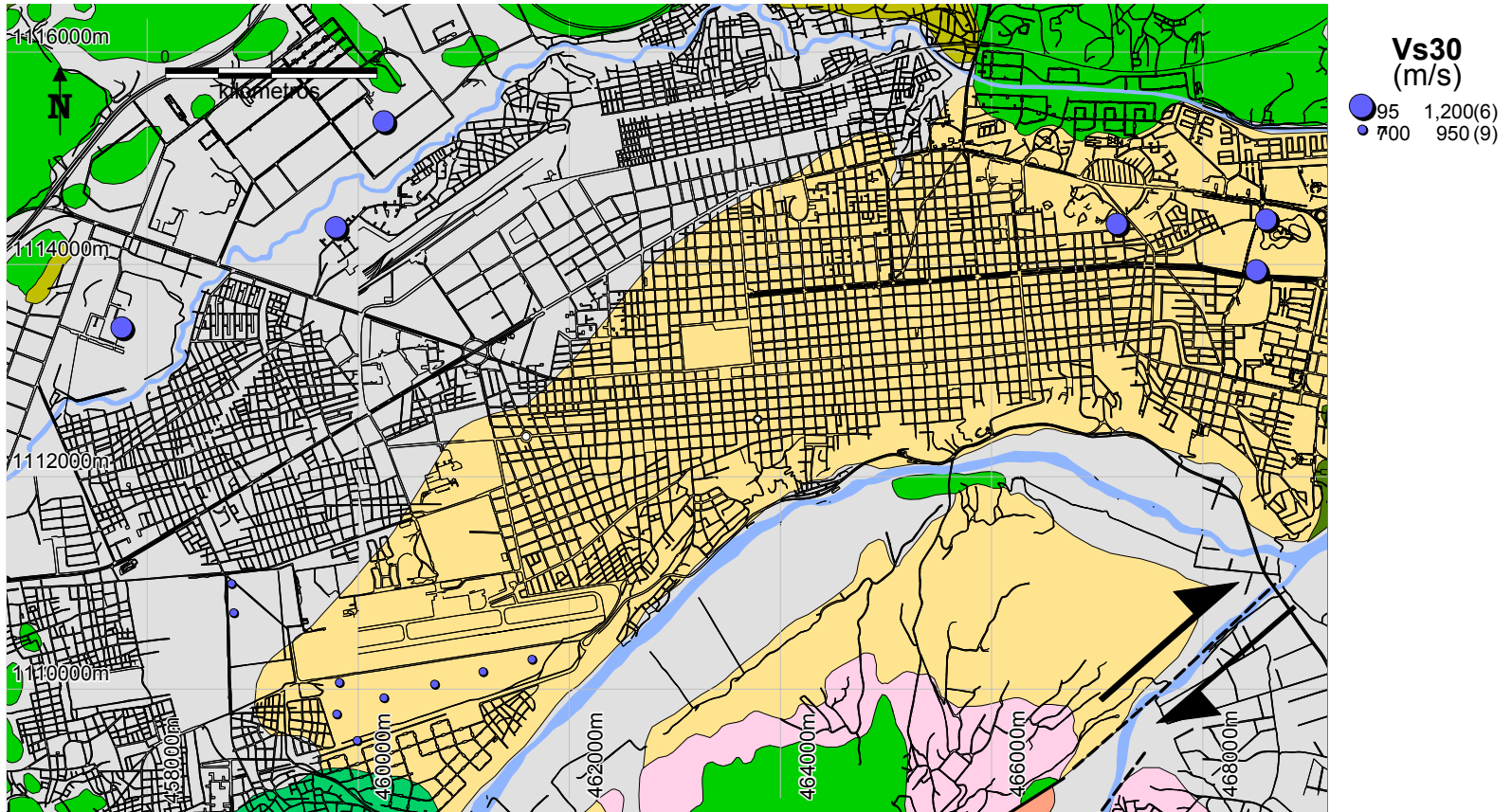
Figura 3.16 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la línea principal del Aeropuerto de Barquisimeto

En los perfiles adquiridos en el área del aeropuerto, se observaron velocidades de onda P cercanas a 1150 m/s para la primera capa, tanto para el perfil principal o E-W como para el N-S. Mientras que para las ondas S en ambos perfiles, las velocidades se aproximan a 200 y 300 m/s para esta primera capa, cuyo límite se encuentra entre 3 y 6 metros de profundidad, aunque se observó una zona de mayor espesor (15 m) en el perfil principal o E-W.

En el punto de cruce entre los perfiles del aeropuerto, la profundidad de la tercera capa o el contacto de la terraza con la Formación Barquisimeto es 60 metros, pero en el tendido principal este espesor aumenta hacia el este o hacia el inicio del mismo, alcanzando hasta 80 metros de profundidad debido a la cercanía de este extremo con el río Turbio. Las velocidades P para la segunda capa se encuentran cercanas a 1400 m/s en ambos perfiles, y la onda S se registró en el orden de los 950 m/s.

La tercera capa posee velocidades P de 2450 m/s en ambos perfiles, siendo las velocidades de onda S cercanas a 1250 m/s. El límite de esta capa sólo se pudo diferenciar en el tendido principal de ondas P del aeropuerto (E-W), a una profundidad aproximada de 155 metros, y con un promedio de velocidades de 3150 m/s. Pero surge nuevamente la incertidumbre acerca de la existencia de esta capa por la poca capacidad de las fuentes sísmicas de ofrecer resultados confiables a estas profundidades. Las tablas de velocidades y espesores correspondientes a los modelos sísmicos 2D mostrados anteriormente se encuentran en el apéndice A.

Los datos de las líneas sísmicas adquiridas en las zonas industrial y central de la ciudad constituyen una fuente complementaria de información al objetivo de este proyecto, por lo que dichos datos sólo fueron utilizados para obtener valores de velocidades sísmicas, con las cuales se pudo crear el mapa de velocidades aparentes de onda S para los primeros 30 metros de profundidad en el área. Los datos de los perfiles 1 al 8 corresponden a los tendidos sísmicos de las zonas central y este de la ciudad y los archivos 9, 10 y 11 corresponden a dos tendidos sísmicos adquiridos en la zona industrial. Los datos de Vs30 de la zona oeste de la ciudad se obtuvieron de los tendidos del aeropuerto de Barquisimeto y la base aérea militar.



Mapa 3.2 Distribución de velocidades Vs30 en el Aeropuerto, Base Aérea y zona central de la ciudad

Las velocidades V_{s30} que se reportan en la Tabla A.7 del apéndice A, muestran que los valores de velocidad de onda S más elevados se concentran en el este de la ciudad. Más específicamente, los valores de velocidad reportados en los disparos de la línea sísmica principal (E-W) se encuentran en el orden de los 850 m/s, incluyendo con estos valores a los disparos de la línea perpendicular o N-S que atraviesa a la principal cerca del punto de disparo Ap1650.

El perfil de la base aérea se encuentra a 1 km al NW del último extremo de la línea principal. Los valores de V_{s30} observados para este perfil se presentan en el orden de los 720 m/s. Hacia el centro de la ciudad se hallaron mayores valores de velocidades V_{s30} , encontrándose en el rango de 900 a 1100 m/s.

Los modelos 1D creados para obtener valores de velocidades aparentes de los perfiles de la base aérea militar y el aeropuerto de Barquisimeto, se encuentran en el disco compacto anexo (archivo "MODELOS 1D" de la carpeta "SISMICOS"). Asimismo, en el archivo "MODELOS 2D" se muestran las imágenes de los modelos sísmicos 2D generados mediante el programa "RAYINVR" con sus respectivas tablas de valores de velocidades y profundidades.

CAPÍTULO IV

ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

4.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS

4.1.1 Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

De Marco (2002) define el ensayo SPT (“Standard Penetration Test”) como el estudio que determina la resistencia que ofrece el suelo (en el fondo de una perforación) a la penetración de un muestreador circular de acero, que a la vez, permite recuperar una muestra perturbada para fines básicamente de identificación litológica.

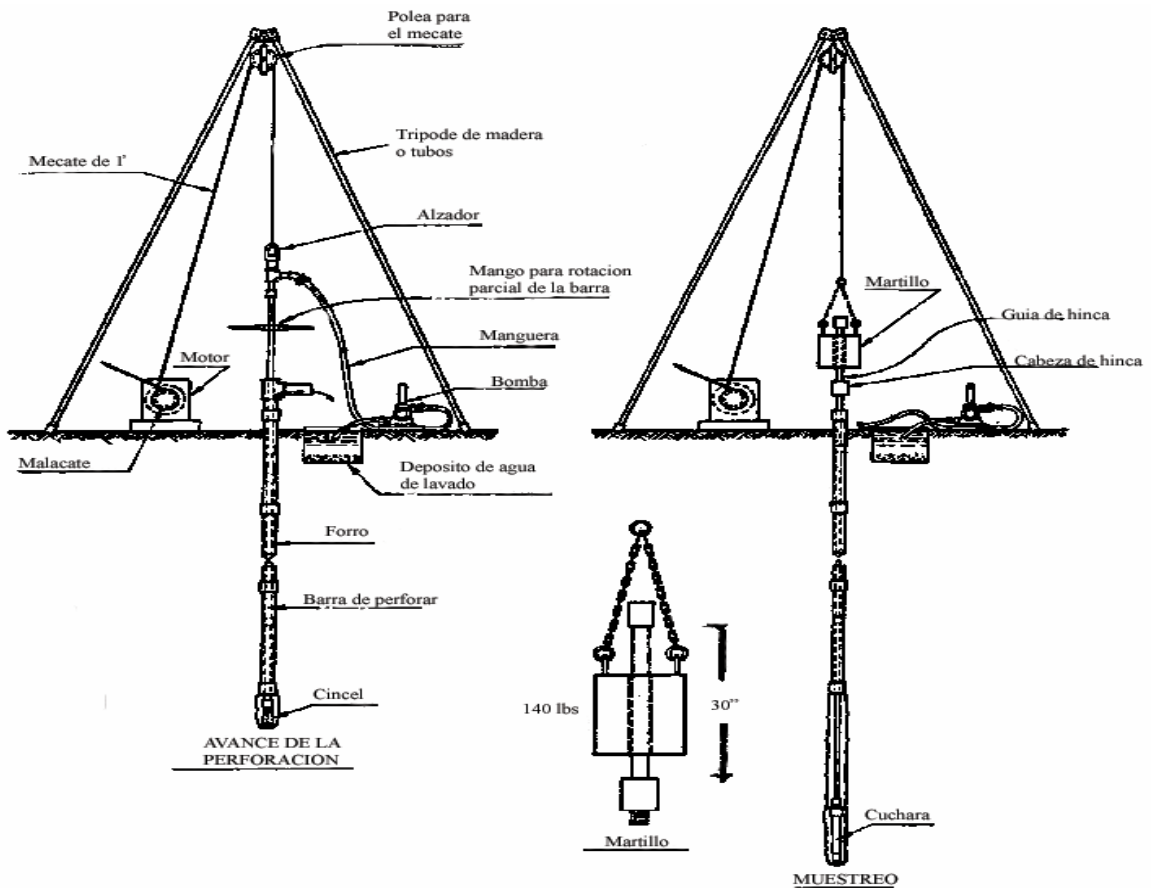


Figura 4.1. Equipos para estudios geotécnicos en roca descompuesta o suelo: a) Equipo de avance, b) Equipo para ejecución del ensayo SPT

La resistencia a la penetración puede ser relacionada con las características y variables del terreno, principalmente en suelos granulares y arcillas saturadas. El fundamento del ensayo consiste en dejar caer un martillo de 63,5 kg sobre una cabeza de hincas desde una altura de 76 cm. El número de golpes necesario para lograr la penetración de 30 cm del muestreador se reporta como resistencia a la penetración N_{SPT} .

El peso de la barra de perforación deber ser de 5 a 8 kg/m, siendo las más utilizadas en Venezuela las del tipo AW, de aproximadamente 20 kg por elemento de tres metros de longitud. El diámetro de la perforación debe estar comprendido entre 63 y 150 mm (De Marco, 2002).

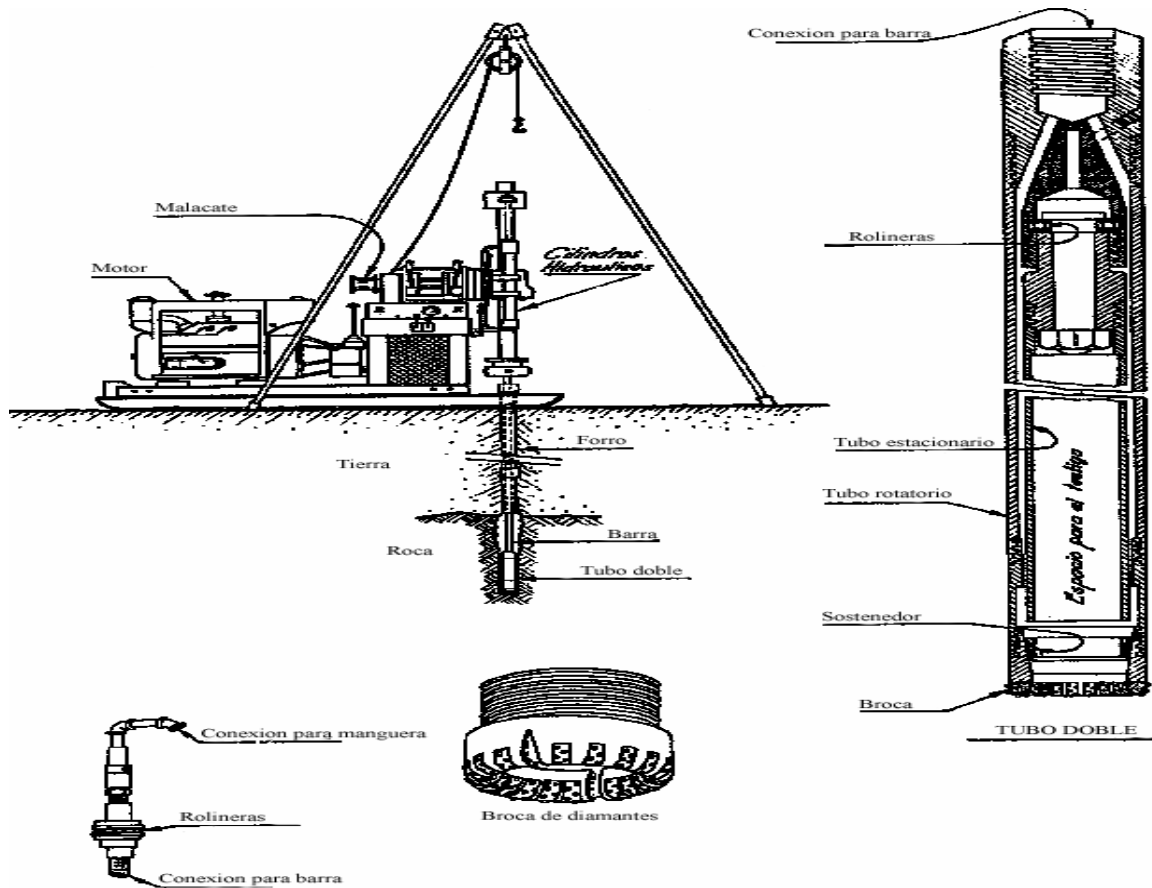


Figura 4.2. Equipos de rotación para perforaciones geotécnicas en roca

4.1.2 Procedimiento internacional de referencia del ensayo SPT

En los últimos años, las investigaciones del subsuelo a partir del Ensayo de Penetración Estándar, han hecho necesaria la medición o evaluación de la energía incidente que hinca el muestreador durante el ensayo. Las tendencias de las investigaciones se han orientado a establecer correcciones para los valores obtenidos en los procedimientos rutinarios, normalizando los valores del número de golpes a un valor de referencia de energía que permita la generalización de las correlaciones empíricas entre las propiedades de los materiales del subsuelo, y hacerlas comparables a nivel mundial (De Marco, 2002).

Para estos fines, Décourt *et al.* (1988), propusieron el Procedimiento Internacional de Referencia para el Ensayo de Penetración Estándar (IRTP), basados en su propia experiencia y en múltiples publicaciones relacionadas con este tema. A continuación se presenta un resumen de los procedimientos propuestos:

a) Procedimiento para la hinca del muestreador: Con el fin de considerar la falta de apoyo del muestreador al inicio de la prueba, la cuchara partida debe hincarse hasta lograr una penetración de 15 cm en el suelo, registrando el número de golpes requerido para alcanzar dicha penetración. Si los 15 cm de penetración no son posibles en 50 golpes, se detiene la hinca, se registra la profundidad de penetración obtenida y se toma como punto de inicio para el siguiente paso del ensayo.

b) Hinca para la realización del ensayo: El número de golpes requerido para lograr los siguientes 30 cm de penetración, es denominado resistencia a la penetración N_{SPT} , registrando el valor requerido para cada intervalo de 15 cm. La hinca debe suspenderse al alcanzar los 50 golpes durante la realización del ensayo en cualquiera de los intervalos de 15 cm, registrando la penetración parcial alcanzada.

c) Energía incidente de referencia (60%): Existe un consenso mundial en el que los valores de N_{SPT} deben ser normalizados (o referidos) a una energía estándar desde que Schmertmann & Palacios (1979) probaron que los valores del número de golpes son inversamente proporcionales a la llamada energía incidente o de entrega: $N_1/N_2 = E_2/E_1$. La mayoría de los investigadores argumentan que para propósitos de comparación, una energía de entrega del 60% de la energía teórica por caída libre,

debe ser considerada como referencia (N60), valor igualmente recomendado en la Norma Venezolana COVENIN 1756-98 para el diseño de edificaciones.

4.1.3 Contenido de humedad

El contenido de humedad de un suelo es la suma de sus aguas: libre, capilar e hidrosférica (Valle, 1976). El contenido de humedad w está referido al peso del material seco:

$$\begin{aligned} \text{Contenido de humedad (\%)} &= \frac{\text{Peso muestra húmeda} - \text{Peso muestra seca}}{\text{Peso muestra seca}} \cdot 100 \\ &= \frac{\text{Peso del agua contenida en la muestra}}{\text{Peso de la muestra seca}} \cdot 100 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Se toma como muestra seca, la secada en el horno a 110 °C. El tiempo de secado de una muestra varía de acuerdo con el tipo de suelo. Generalmente, se toman unos 100 a 200 gramos de suelo húmedo y son secados en un horno durante 24 horas.

4.1.4 Peso unitario

Puede utilizarse como una alternativa al uso de la densidad. El peso unitario se define como el peso por unidad de volumen y puede obtenerse multiplicando la densidad por la aceleración de la gravedad $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (Berry y Reid, 1997).

4.1.5 Límites de consistencia

Para interpretar mejor los llamados “límites de consistencia” o “límites de Atterberg”, se puede tomar como ejemplo una masa de arcilla. Cuando la muestra se encuentra muy saturada de agua, es decir, tanta agua como para que ésta escurra con facilidad se le dice “líquida”, y al irse evaporando dicha agua, ésta va haciéndose un tanto plástica. Este límite entre los estados “líquido” y “plástico” se halla representado por el contenido de humedad del suelo y se llama “límite líquido”. Si continúa la evaporación del agua, la arcilla perderá plasticidad, y llegará a secarse adquiriendo una consistencia semisólida. A este paso del estado “plástico” al

“semisólido” se le llama “límite plástico”, y su valor está dado por el contenido de humedad que tiene la arcilla en tal estado límite.

Finalmente, si el proceso de evaporación continúa, la arcilla adquiere mayor solidez y va contrayéndose hasta que llega un momento en que cesa la contracción, no obstante continuar el proceso de evaporación. A este estado límite se le llama “límite de contracción”. Su valor, como en los casos anteriores, está dado por su contenido de humedad (Valle, 1976).

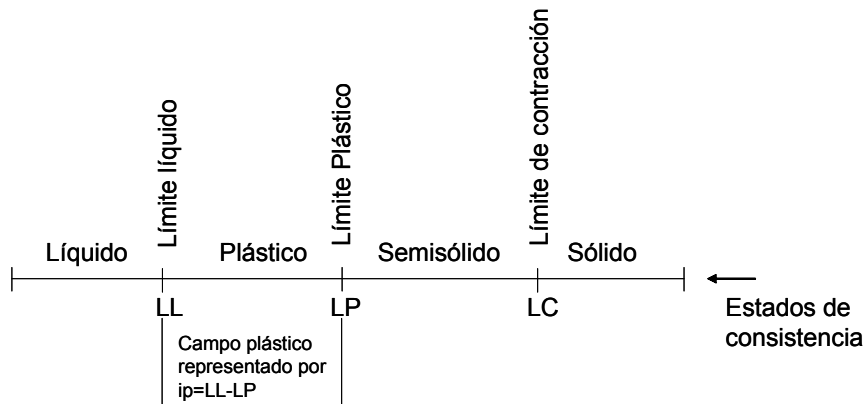
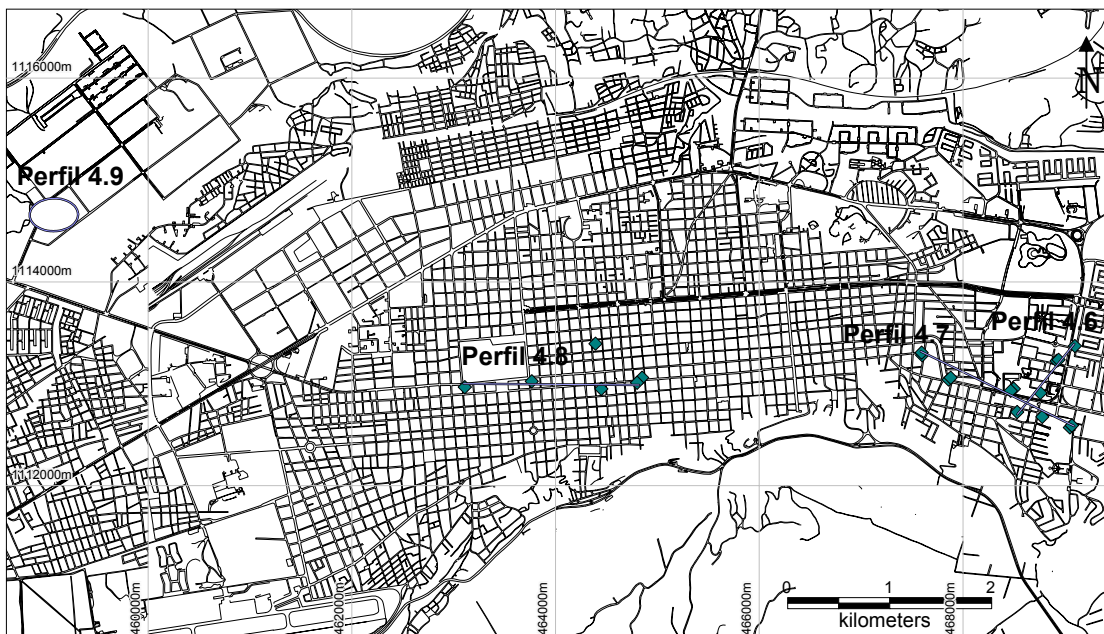


Figura 4.3. Representación gráfica de los límites de consistencia (Valle, 1976)

4.2 INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOTÉCNICA

Se utilizaron 23 perforaciones geotécnicas de estudios SPT repartidas por toda la ciudad de Barquisimeto, específicamente, del proyecto de tesis de Pacheco y Terán (1999), se extrajeron las perforaciones concentradas en la zona este de la ciudad, del proyecto de Urbina y Villalobos (2000) se utilizaron las perforaciones de la zona central, y de Rojas y Rojas (2003) se obtuvo la información geotécnica referente a la zona noroeste de Barquisimeto. El mapa 4.1 muestra la distribución de las perforaciones seleccionadas en la ciudad de Barquisimeto. Estas perforaciones fueron realizadas por la compañía EPC con fines civiles, y su selección fue basada en la utilidad para generar perfiles geotécnicos con datos de espesores, litologías y densidades precisos como apoyo para las interpretaciones y modelados de los datos de sísmica y gravimetría.



Mapa 4.1. Ubicación de las perforaciones para la construcción de perfiles: los puntos verdes representan las perforaciones, las líneas y el círculo representan las disposiciones de los perfiles

La figura 4.4 es una de las planillas tipo diseñada para representar la información geotécnica proveniente de las fuentes mencionadas. El resto de las planillas se muestran en orden alfabético en el Apéndice D.

Planilla de información de estudios SPT

Datos de referencia

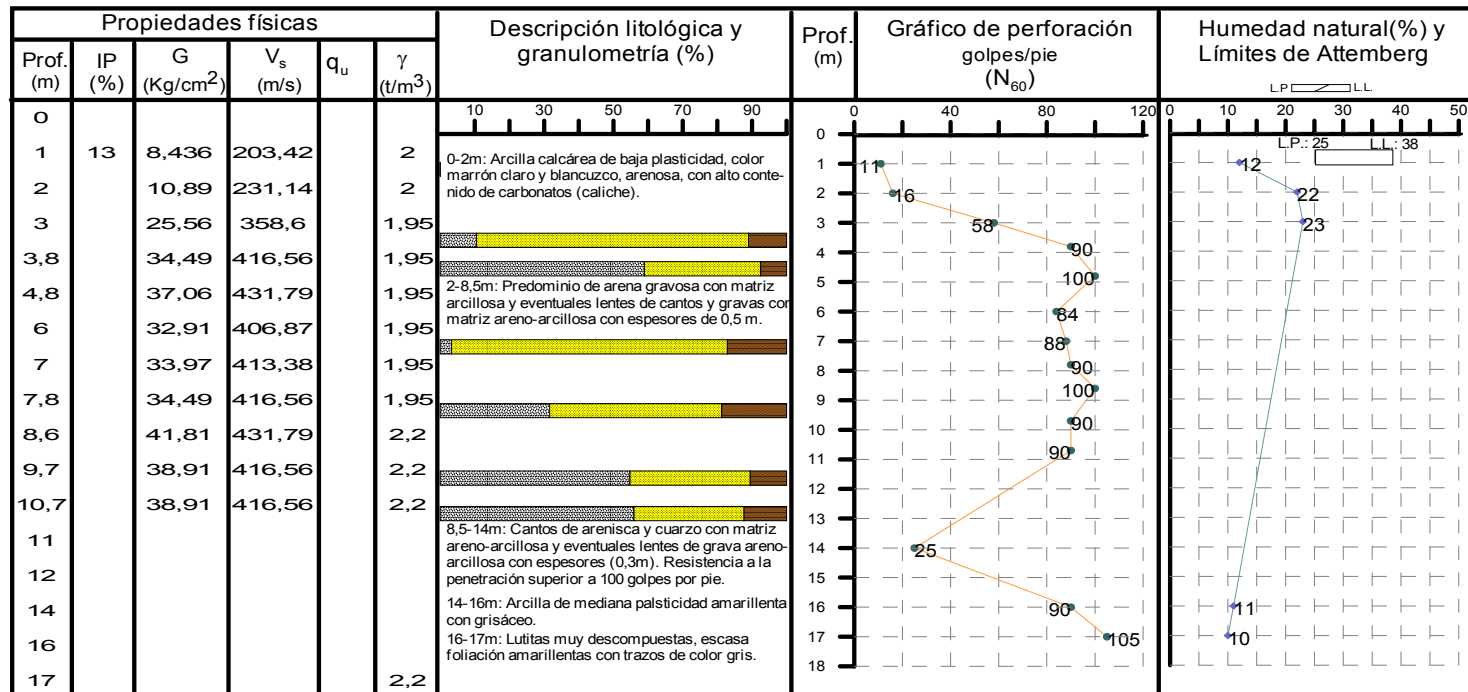
Perforación Nro.: D7-P1 Fecha: 10/11/77 Ubicación descriptiva: Carrera 19 con calle 31
 Coord. (UTM): N1113050 E465420 Cota: 566,00 m.s.n.m. Fte. de información: EPC (*)
 Responsable de información: Ricardo De Marco C. C.I. 15.118.581

Datos de adquisición

Peso del martillo: 140 lbs Caida del martillo: 76 cm Prof de perforación: 17,00 m.

Leyenda

W: Humedad natural; Límites de Atterberg → LL: Límite Líquido, LP: Límite plástico; Granulometría: PT4 - PT200; γ : Densidad (ton/m³)
 G: Módulo de corte (Kg/cm²); q_u : Compresión sin confinar o penetrómetro* (Kg/cm²)



* Adaptado de Pacheco y Terán (1999) y Urbina y Villalobos (2000).

Figura 4.4. Planilla diseñada para la representación de los datos geotécnicos

Las perforaciones geotécnicas reportaron en su mayoría, una capa de espesor variable de materiales granulares en algunas regiones y arcillosos en otras en la parte más cercana a la superficie (primeros 5-8 metros de profundidad), luego reportan una capa compuesta por cantos y peñones de areniscas de unos seis metros de espesor, y con más profundidad llegan a una capa de lutitas muy descompuestas con escasas evidencias de estratificación. Por los reportes de las perforaciones D3-P1, D3-P4 y S37-P1, fue posible crear un perfil que muestra el contacto de esta última capa de lutitas descompuestas con el manto rocoso que corresponde a lutitas que inclusive, muestran marcas de foliación, por lo que se ha relacionado la capa subyacente de la terraza aluvial con las lutitas filíticas de la Formación Barquisimeto (Fig. 4.6).

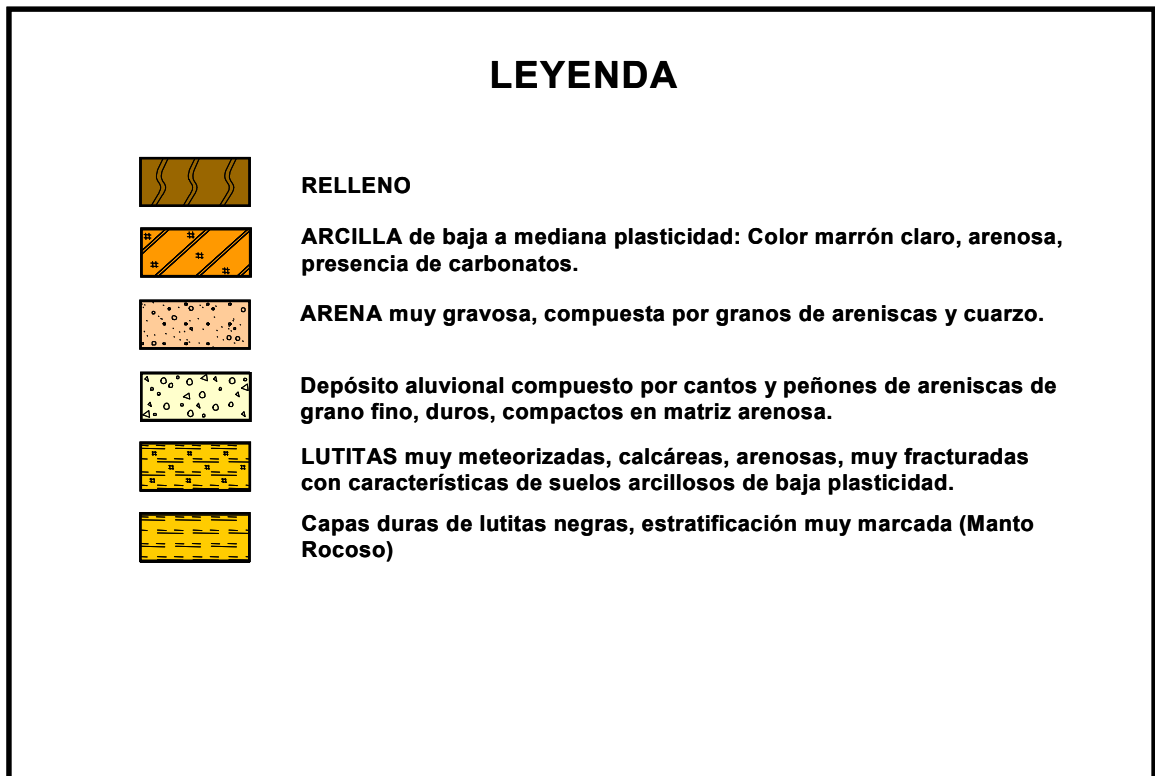


Figura 4.5. Leyenda de simbologías y descripción litológica de los perfiles geotécnicos construidos a partir de las perforaciones seleccionadas

A continuación se muestran los perfiles geotécnicos construidos a partir de la interpolación de los datos de espesores y litologías reportados en las perforaciones.

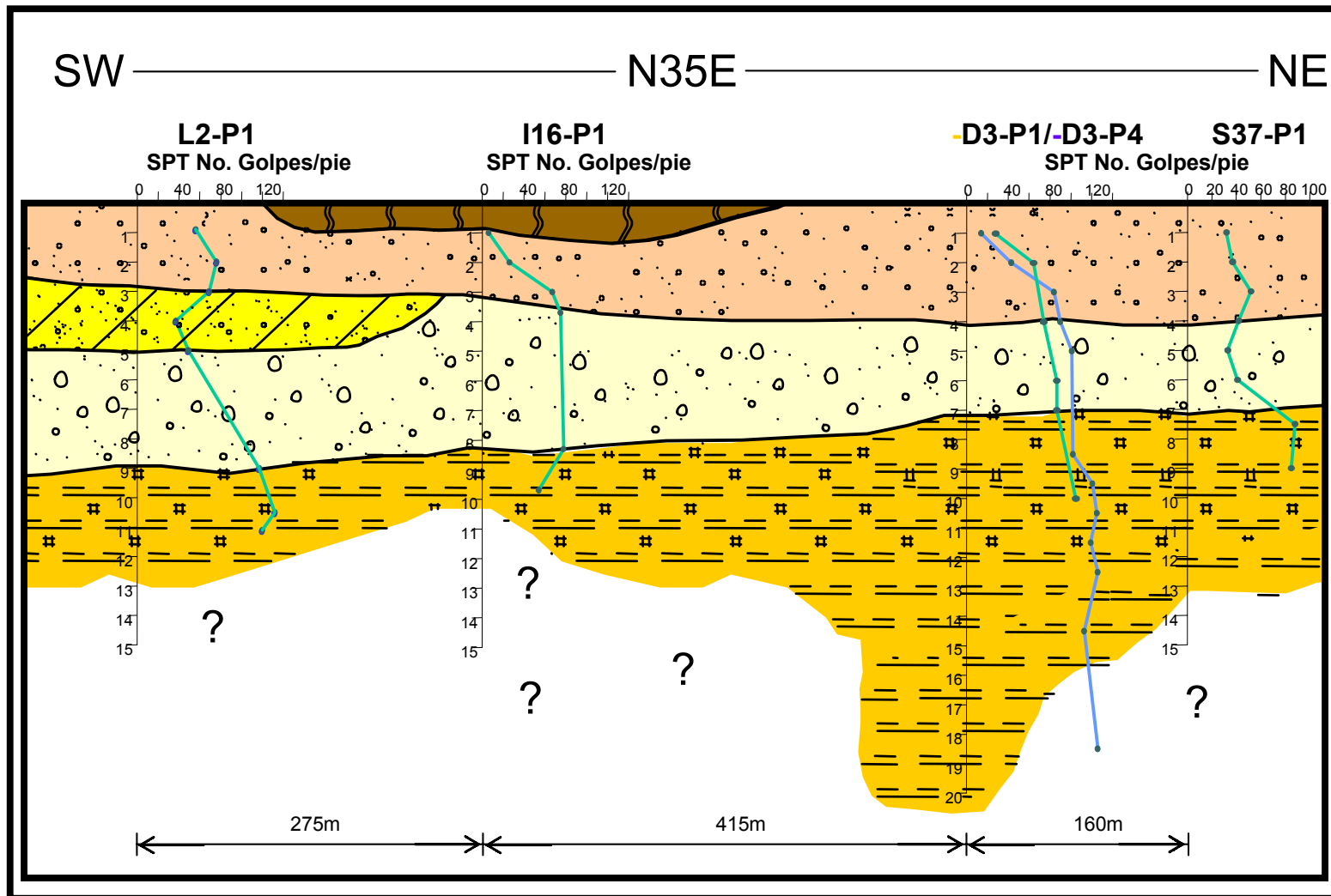


Figura 4.6. Perfil geotécnico de orientación N35E en la región centro-oriental de la ciudad de Barquisimeto

La perforación S37-P1 reporta el contacto de la terraza con el manto rocoso de la formación Barquisimeto a partir de 12 metros de profundidad. La falta de datos SPT a esta profundidad, permite inferir que la dureza de la roca impedía el avance necesario de la cuchara utilizada en este tipo de ensayos como para exceder el N_{SPT} de los rangos estipulados para Venezuela. Las perforaciones D3-P1 y D3-P4 describen una litología de lutitas parcialmente estratificadas, pero el aumento considerable en el número de golpes N_{SPT} a partir de los 5 primeros metros permite correlacionar el material rocoso aquí presente con el de la perforación anterior.

A partir de los 4 primeros metros aproximadamente, todas las perforaciones mencionan la presencia de una capa de unos 4 a 5 metros de espesor, constituida de cantos y peñones de arenisca embebidos en matriz arcillosa cuyo contacto subyacente se encuentra entre 7 y 9 metros con materiales lutíticos descompuestos, a veces estratificados. La presencia de rasgos de estratificación en estos materiales arcillosos señala la cercanía a la roca sobre la cual reposa la terraza de Barquisimeto.

En los primeros 4 a 6 metros de profundidad se observan materiales granulares, en su mayoría, arenas muy gravosas de matrices arcillosas y húmedas (15%) y de relativamente alta plasticidad, con un número de 30 a 40 golpes de resistencia al SPT. El peso unitario reportado con mayor frecuencia es $2,2 \text{ t/m}^3$ y en cuanto a la granulometría, a partir de 10 metros de profundidad los materiales arcillosos constituyen un 80% de las muestras analizadas.

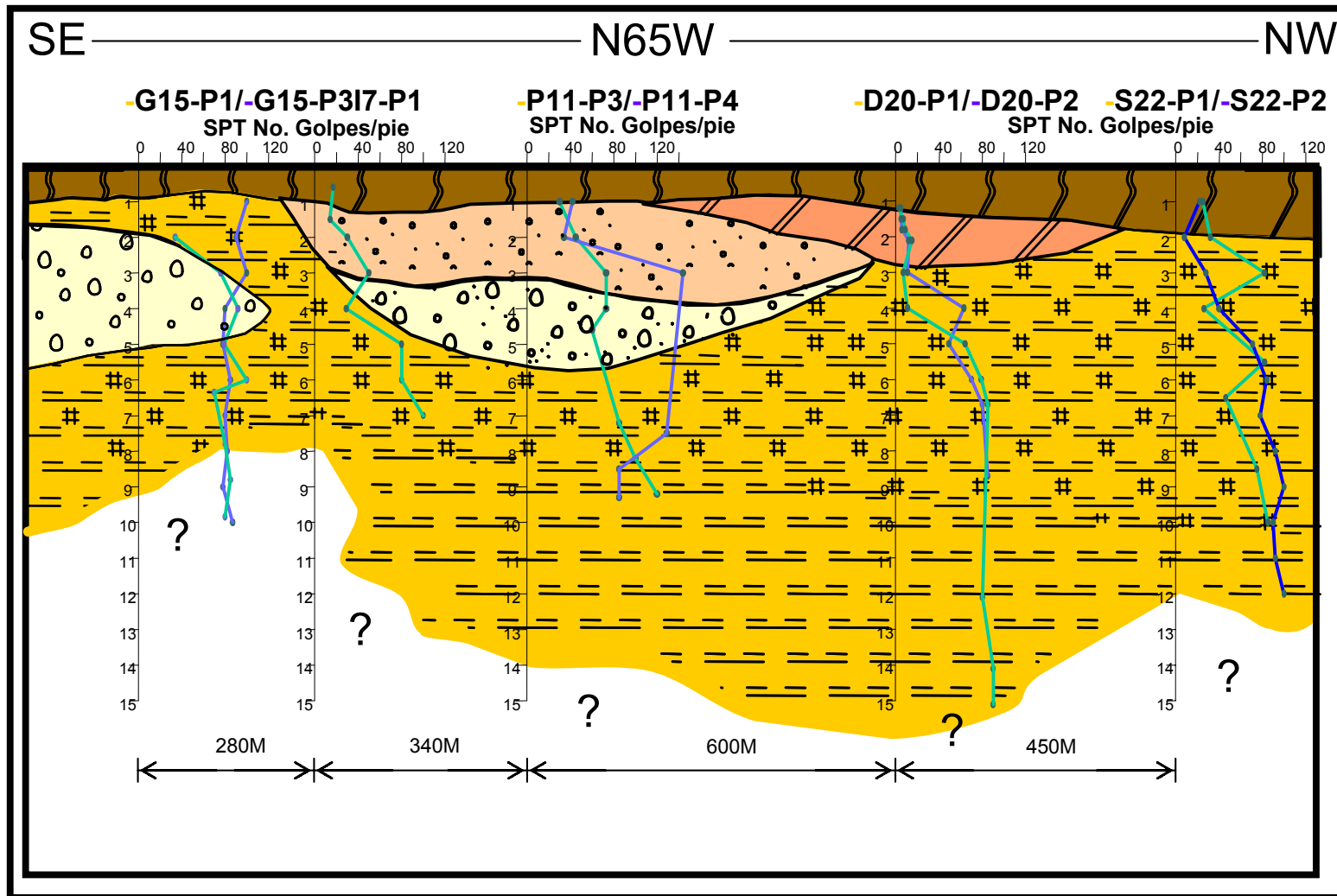


Figura 4.7. Perfil geotécnico de orientación N65W en la región centro-oriental de la ciudad de Barquisimeto

En el perfil 4.7, el material que cubre la superficie se constituye de materiales de relleno utilizados para nivelar la topografía. En las perforaciones P11-P3 y P11-P4 se reporta en contacto con el material de relleno, un límite areno-arcilloso que a su vez, se encuentra en contacto con una pequeña capa de unos 3 metros de espesor, constituida por cantos y peñones con las mismas características del perfil anterior. Un lente aluvional con estas mismas características se observa en la zona de las perforaciones G15-P1 y G15-P3 a partir de los 2 metros de profundidad.

De manera general, el material aquí presente se constituye de arcillas o materiales lutíticos con cierto grado de descomposición. Las perforaciones P11-P3, P11-P4, D20-P1, D20-P2, S22-P1 y S22-P2 reportan a partir de unos 9 metros de profundidad el contacto con el manto rocoso o lutitas de la Formación Barquisimeto, con altos índices de N_{SPT} , superiores a 80 golpes. Los valores de humedad varían cerca del 8% y nuevamente la granulometría se encuentra dominada en un 80%, por arcillas y limos. El peso unitario predominante es 2,2 t/m³.

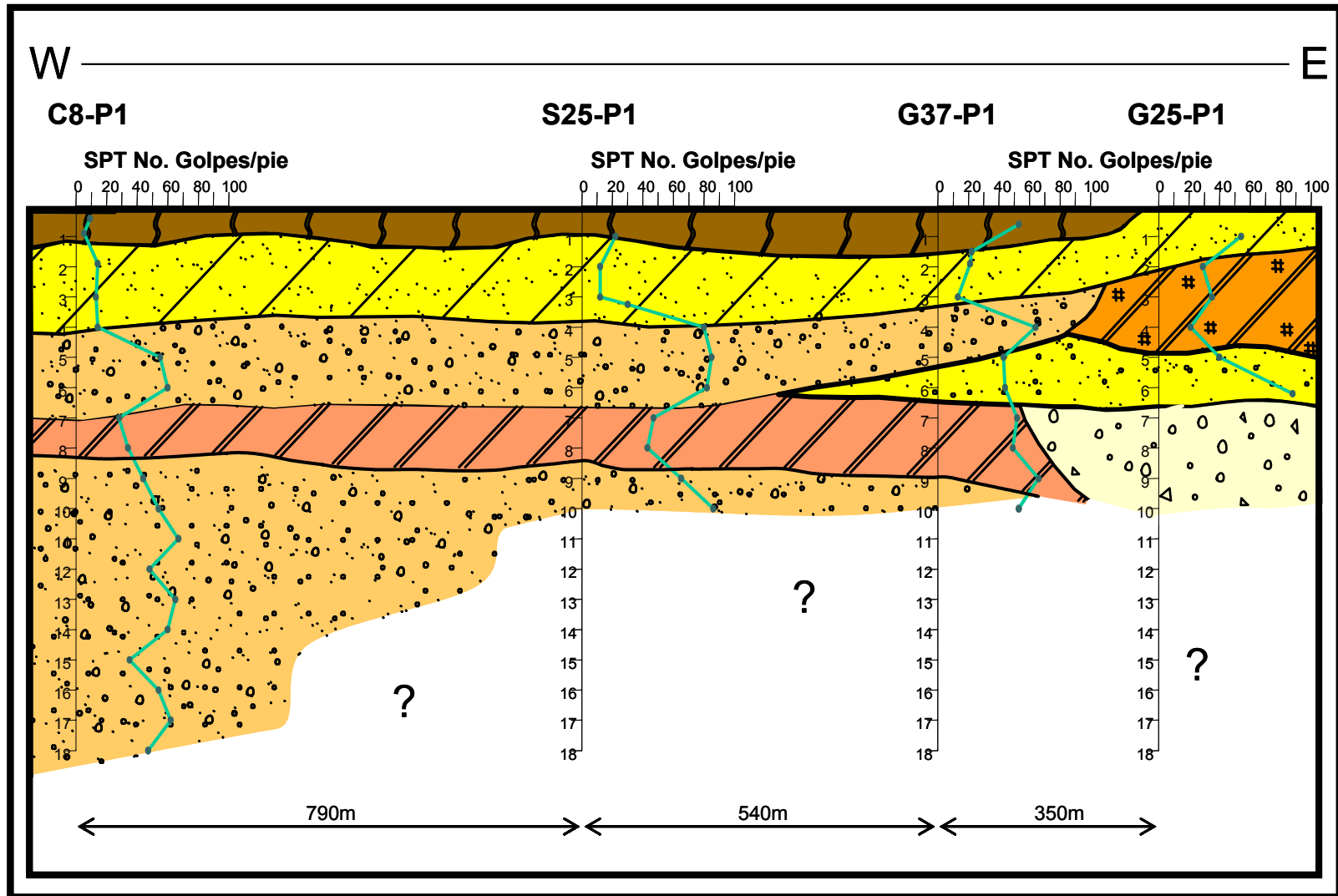


Figura 4.8. Perfil geotécnico de orientación E-W en la región central de la ciudad de Barquisimeto

El perfil 4.8 comprende el área del cementerio hacia el lado oeste de la ciudad, donde los materiales se observan predominantemente granulares. Como se ha podido observar, por debajo de la capa de relleno que cubre la superficie, se encuentra una capa arenosa-arcillosa de unos 4 metros de espesor. Por debajo se encuentra una capa de arenas muy gravosas. A los 7 metros aproximadamente, se observa una pequeña capa arcillosa de 2 metros de espesor, y a partir de los 9 metros de profundidad se repiten los materiales arenosos-gravosos. La perforación G25-P1 muestra nuevamente una capa a partir de 7 metros de profundidad constituida por cantos y peñones de arenisca con las características que se mencionan en el primer perfil 1. En las capas arenosas, el N_{SPT} varía por encima de 80 golpes y en las secciones arcillosas se observa un rango entre 12 y 40 percusiones. La humedad predominante se encuentra comprendida entre 6 y 12% y los pesos unitarios de las muestras analizadas se reportan cercanos a 2 t/m^3 .

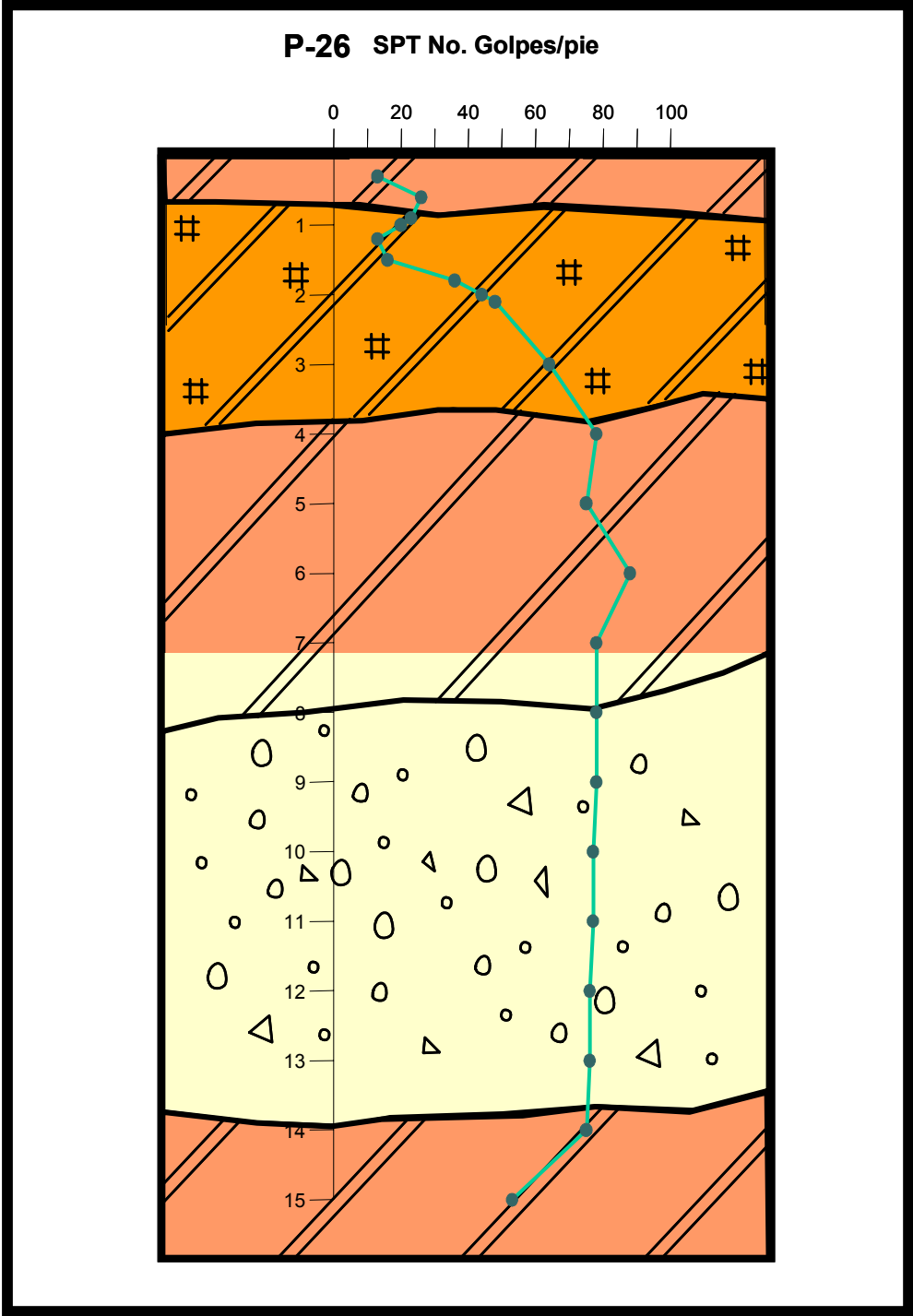


Figura 4.9. Perforación geotécnica P-26 en la región oeste de la ciudad de Barquisimeto

La figura 4.9 sólo contiene a la perforación P-26, debido a que las demás perforaciones disponibles en el oeste de la ciudad no alcanzan una profundidad lo suficientemente útil como para caracterizar los materiales presentes en esta región. La primera capa posee unos 3 metros de espesor y se compone de arenas gravosas, con N_{SPT} alrededor de 30 percusiones. A los 3 metros de profundidad se observa una capa de arcillas de baja plasticidad, duras y de alta resistencia al SPT, registrando más de 60 golpes y con humedad superior a 14%. Se observa nuevamente una capa de cantos y peñones de arenisca a partir de los 8 metros de profundidad, con N_{SPT} mayor a 70 golpes y humedad mayor a 10%. La granulometría se observa con mayor contenido de gravas y arenas en esta región y el peso unitario supera los 2,2 t/m³.

CAPÍTULO V

RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL

5.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DEL MÉTODO

Bard (1999) mencionan la aceptación en la ingeniería de terremotos que suelos no consolidados pueden jugar un papel importante en el movimiento de los terrenos y deben ser tomados en cuenta en la zonificación sísmica de poblaciones en crecimiento demográfico. Consecuentemente, la microzonificación constituye un paso esencial en la formulación de regulaciones sísmicas locales, programas de reducción de riesgo sísmico, etc.

5.1.1 Efecto por suelos no consolidados

Los daños causados por terremotos generalmente disminuyen en función de la distancia al epicentro. Al mismo tiempo, los terremotos destructivos han demostrado que el daño es mucho más severo en depósitos de sedimentos no consolidados que en afloramientos de rocas firmes (Rosset *et al.*, 2003). En valles de ríos que han sido recientes lugares de depósito de aluviones y que también corresponden a localidades de desarrollo de áreas urbanas donde existe una alta sismicidad, las amplificaciones locales de las ondas sísmicas han sido reportadas como las más altas. Pero también áreas de sismicidad moderada donde han sido desarrolladas ciudades de dimensiones medianas, podrían ser severamente afectadas por la combinación de los efectos de sitio y el desarrollo urbano.

Básicamente, los efectos de sitio están asociados a las ondas sísmicas que viajan por estratos de sedimentos no consolidados. Esto es debido principalmente a los grandes contrastes de impedancia existentes entre las bajas velocidades y densidades de los suelos no consolidados y las rocas subyacentes (Rosset *et al.*, 2003).

5.1.2 El uso de la técnica de Ruido Sísmico Ambiental

Bard (1999) considera que con las limitaciones de los distintos métodos utilizados para estimar los efectos de sitio de una región, la técnica de Ruido Sísmico Ambiental representa una forma práctica y poco costosa para la investigación. Ésta se basa en la teoría e hipótesis desarrolladas por Nakamura (1989), donde demuestra que la relación entre las componentes horizontal y vertical del ruido sísmico ambiental está relacionada con la frecuencia fundamental del suelo y al factor de amplificación.

Nakamura (1989) desarrolló la técnica formulando tres hipótesis:

- a) El ruido ambiental es generado por la reflexión y refracción de ondas de corte en capas superficiales de suelos y por ondas superficiales.
- b) Las fuentes locales superficiales de ruido no afectan el ruido ambiental en la base de la estructura no consolidada
- c) Las capas de sedimentos no consolidados no amplifican la componente vertical del ruido ambiental.

El ruido sísmico ambiental está compuesto por ondas superficiales tipo Rayleigh generadas por interacciones viento-estructuras, tráfico y otras actividades urbanas (Lermo y Chavez-Garcia, 1994)

5.1.3 Relación entre el espectro H/V de microtremores y H/V de ondas Rayleigh

Nakamura (1989), da una definición teórica de la técnica H/V con refracciones múltiples de ondas SH. Por otro lado, otros investigadores han tratado de explicar el “pico” resultante en la obtención de la relación H/V mediante ondas Rayleigh. Un microtremor consiste de muchos tipos de ondas: el estudio de las ondas superficiales se basa en la asunción de que el ruido consiste predominantemente de este tipo de ondas. Bajo esta asunción, Bard (1999) explica que muchos investigadores comparten las dos siguientes aseveraciones: en primer lugar, la relación H/V es básicamente relacionada a la elipticidad de las ondas Rayleigh debido a la predominancia de estas ondas en la componente vertical. En segundo lugar, esta elipticidad es la frecuencia dependiente y exhibe una forma de pico alrededor de la

frecuencia fundamental para sitios que contienen un alto contraste de impedancia entre la superficie y los materiales más profundos. Esta aproximación, proviene simplemente de la similitud de las figuras de relación H/V de microtemores y la relación H/V del modo fundamental de ondas Rayleigh.

5.1.4 Explicación de la relación H/V

La técnica empleada en este trabajo se basa en la interpretación de microtemores como ondas Rayleigh que se propagan en una capa no consolidada de sedimentos que yace sobre un medio rocoso. En el dominio de Fourier se tendrán entonces cuatro espectros de amplitud implicados (Rocabado et al., 2001):

- Componentes Vertical y Horizontal del movimiento en la superficie (V_s y H_s)
- Componentes Vertical y Horizontal del movimiento en la base de la capa sedimentaria (V_B y H_B)

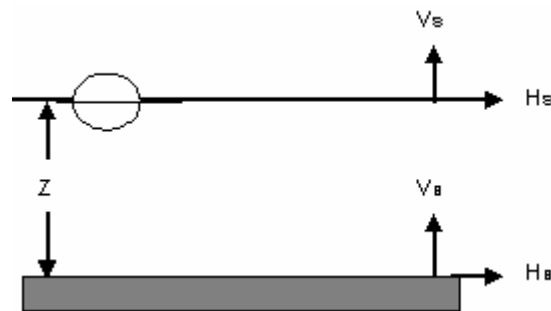


Figura 5.1 Modelo asumido por Nakamura (1989) para interpretar las mediciones de microtemores (tomado de Rocabado et al., 2001)

Una asunción amplia es que el movimiento de microtemores se debe a fuentes de ruido blanco, tales como tráfico en las cercanías del sensor, sin considerar cualquier contribución de fuentes profundas.

De acuerdo con Nakamura (1989), se supone que la componente vertical del movimiento no es amplificada por la capa sedimentaria. Asumiendo ahora que las fuentes muy locales no afectarán el movimiento de microtemores en la base de la capa sedimentaria, es posible estimar la forma espectral de la fuente del movimiento de microtemores, A_s , como una función de la frecuencia, w , según la relación:

$$A_S(\omega) = \frac{V_S(\omega)}{V_B(\omega)}, \quad (5.1)$$

donde V_S y V_B son las amplitudes del espectro de Fourier de la componente vertical de movimiento en la superficie y en la base de la capa sedimentaria respectivamente. Asumiendo ahora que un estimado del efecto de sitio de interés en la Ingeniería de Terremotos, S_E , está dado por:

$$S_E(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{H_B(\omega)}, \quad (5.2)$$

donde H_S y H_B son las amplitudes del espectro de Fourier de la componente horizontal de movimiento en la superficie y en la base de la capa sedimentaria respectivamente. Para compensar S_E por el espectro de la fuente, se calcula una relación modificada del efecto de sitio, S_M , con la siguiente ecuación:

$$S_M(\omega) = \frac{S_E(\omega)}{A_S(\omega)}. \quad (5.3)$$

La asunción final es que para todas las frecuencias de interés la relación:

$$\frac{H_B(\omega)}{V_B(\omega)} = 1, \quad (5.4)$$

quedando finalmente la relación de la siguiente forma:

$$S_M(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)}, \quad (5.5)$$

donde el efecto de sitio está dado por la relación entre las componentes horizontal y vertical del movimiento en la superficie de la capa sedimentaria. Esta ecuación fue verificada experimentalmente por Nakamura (1989) utilizando registros de microtemores obtenidos en perforaciones de pozos (Rocabado et al., 2001).

5.2 MARCO METODOLÓGICO

5.2.1 Metodología de adquisición

La adquisición de los datos de Ruido Sísmico Ambiental de este proyecto de tesis contempló, al igual que los datos gravimétricos, dos fases. En ambas se siguió la misma metodología tanto para la etapa de obtención de los datos como para su procesamiento:

- ✓ Las estaciones de ruido sísmico levantadas en períodos previos a este proyecto (Rocabado *et al*, 2002b), se distribuyeron en toda la ciudad de Barquisimeto procurando crear un mallado de mediciones que conserve un espaciamiento de 500 metros entre estaciones.
- ✓ Las mediciones realizadas durante la fase de adquisición de este proyecto (27 al 30 de mayo de 2003) se ubicaron justo sobre las líneas sísmicas del Aeropuerto y la Base Aérea, siguiendo las líneas rectas de los tendidos sísmicos y con un espaciamiento de 50 metros entre estaciones.
- ✓ La adquisición se realizó con un sismógrafo portátil “Orion-Nanometrics” y un sensor de tres componentes (N-S, E-W y vertical) marca “Guralp”, con un rango de operación de 30s-50 Hz; el intervalo de muestreo utilizado fue de 100 mps y con un tiempo de grabación de cinco minutos (300 segundos), tomando en cuenta factores como: que el sensor no fuera posicionado sobre tuberías de alumbrado, teléfonos o sistemas de alcantarillado de la ciudad, así como la espera de un lapso de tiempo prudente para garantizar la estabilidad de la señal, etc. Estas tres componentes se almacenaban en un archivo asignado a cada estación que, en la etapa de procesamiento, debía decodificarse y analizarse para su posterior interpretación.

5.2.2 Metodología de procesamiento

Los datos almacenados en el equipo ORION se descargaron en la computadora donde fueron procesados. Como los datos crudos no se encuentran listos para ser trabajados en el Sistema Operativo Windows, se debe efectuar una secuencia de comandos para llevarlos a formato ASCII (figura 5.2).

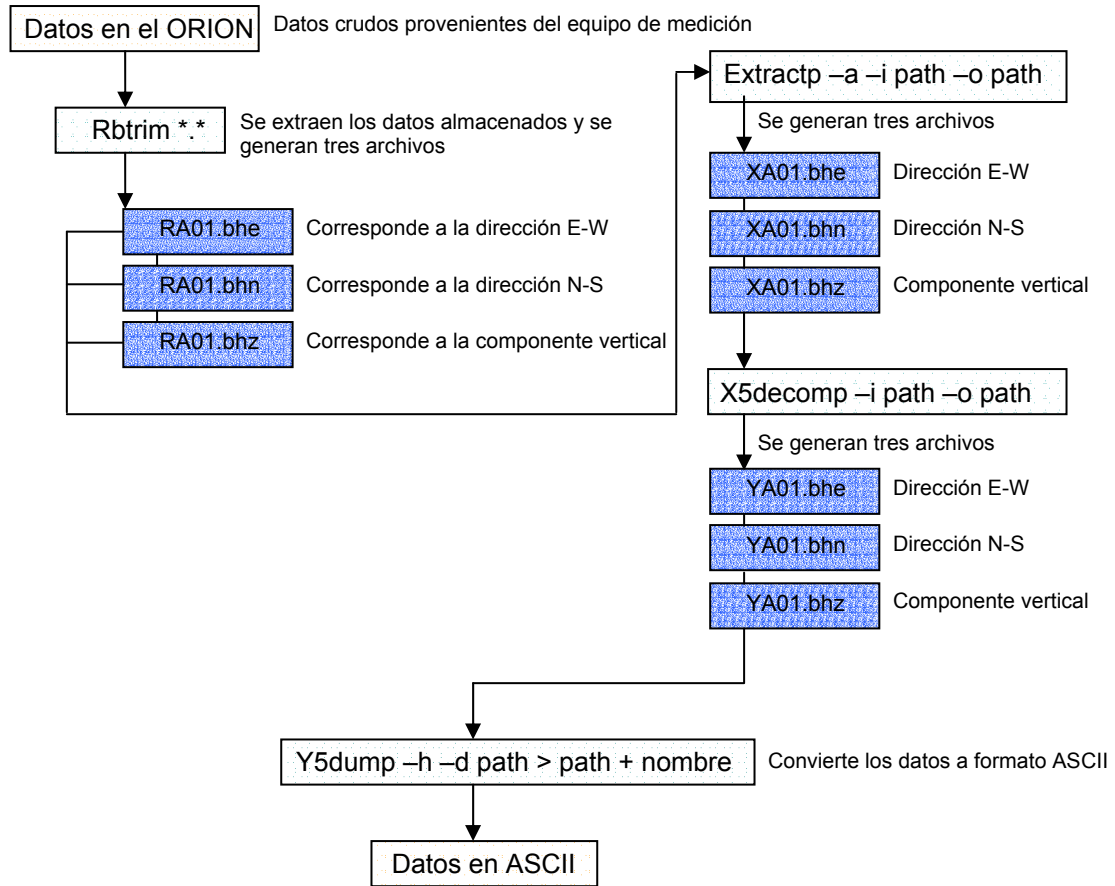


Figura 5.2 Secuencia de comandos para la conversión de los datos a formato ASCII

Una vez convertidos los datos a formato ASCII, se ejecutó otra secuencia de aplicación de programas para llegar al resultado final: el gráfico de H/V para la identificación de los valores de período y amplificación.

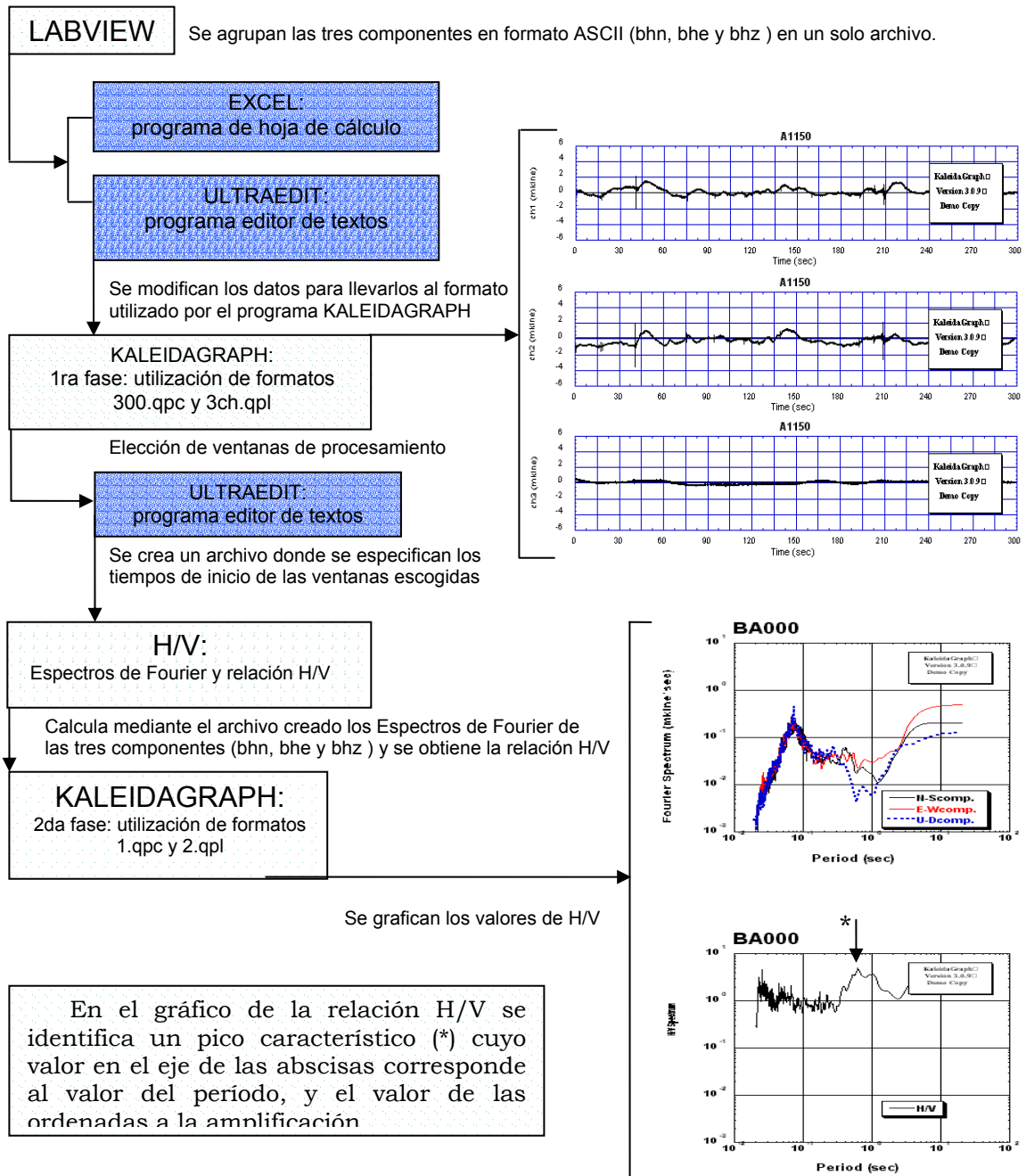


Figura 5.3. Secuencia de programas para la obtención de valores de Período.

5.3 RESULTADOS

A través de la primera fase de utilización del programa Kaleidagraph, se obtuvieron los gráficos de las tres componentes N-S, E-W y vertical, para la elección de las ventanas de procesamiento de los diferentes puntos de medición. La figura 5.4 muestra este gráfico para un punto de medición A1550 ubicado en el perfil E-W coincidente con el tendido sísmico del Aeropuerto de Barquisimeto. Las mediciones del Aeropuerto y la Base Aérea suman 57 estaciones y sólo éstas fueron procesadas durante este proyecto. Dichas mediciones se encuentran en archivos digitales con extensión “.ps” en el disco compacto que acompaña a este libro, específicamente dentro de la carpeta RUIDO en la subcarpeta VENTANAS.

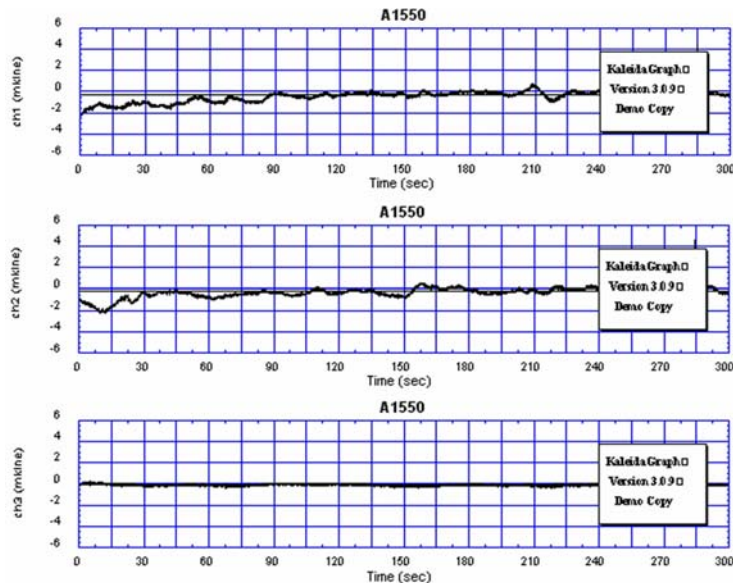


Figura 5.4 Representación gráfica de las componentes N-S, E-W y vertical en orden descendente de la señal de ruido sísmico grabada por el equipo ORION.

La figura 5.5 muestra el gráfico de relación H/V generada a partir de la elección de la ventana de 30 segundos del gráfico anterior, correspondiente al punto de medición A1550.

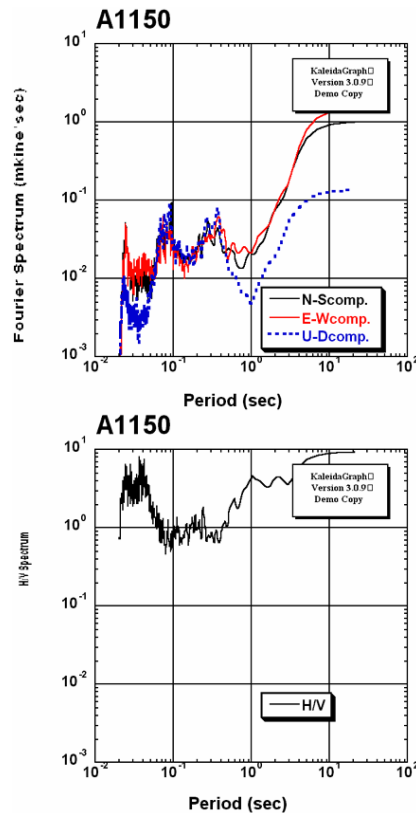
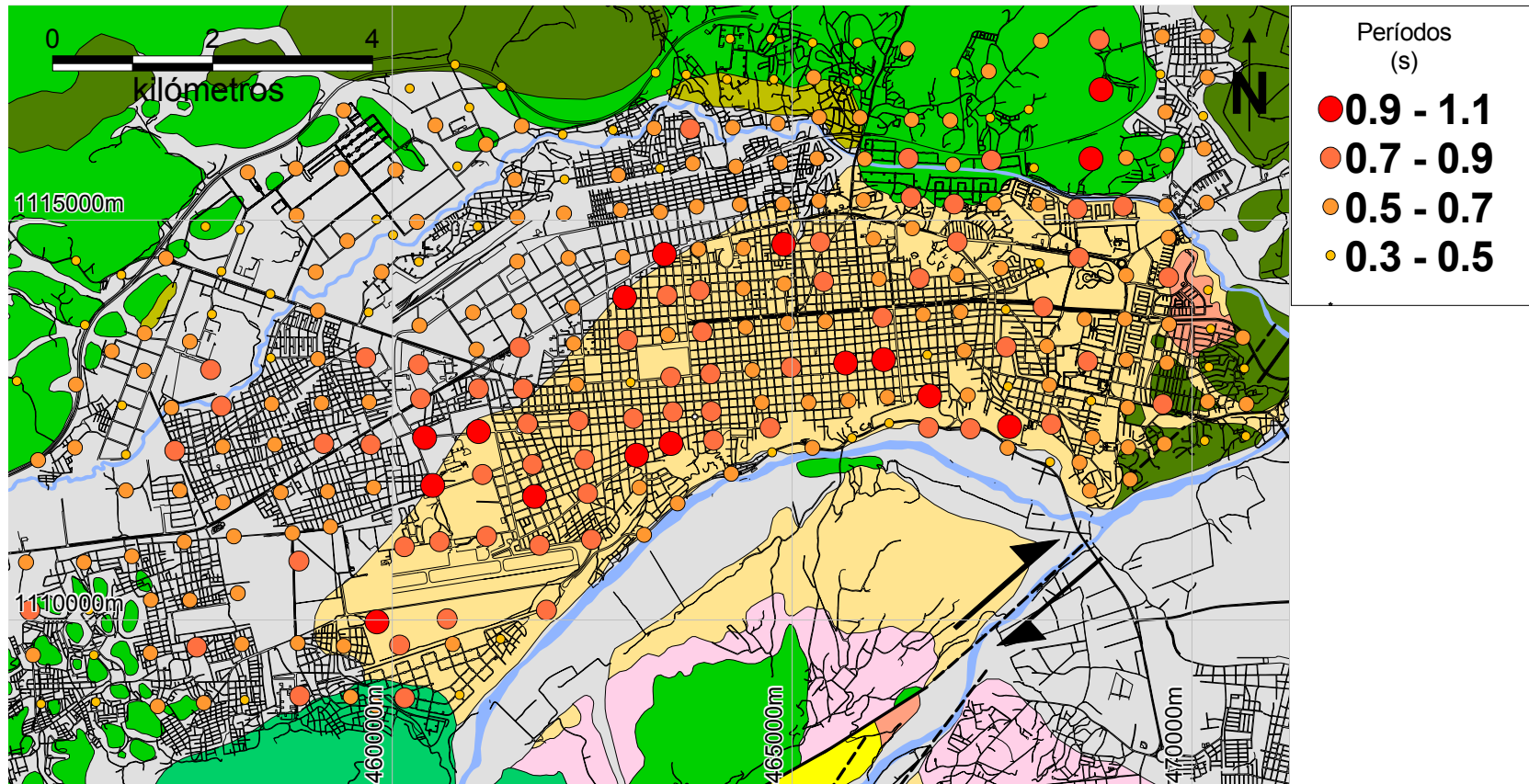


Figura 5.5 Representación gráfica de la relación H/V del punto de medición A1150

Al igual que los gráficos para la elección de ventanas de procesamiento, los 57 gráficos generados en la segunda fase de utilización del Kaleidagraph, correspondientes a la etapa de elección de los picos representativos de los valores de período, se encuentran archivados en la carpeta RUIDO en la subcarpeta H/V.

En el mapa 5.1, se muestran los puntos de medición con sus valores de período respectivos representados en forma de círculos, cuyo tamaño varía dependiendo de la magnitud del valor asignado a dicho punto. Los puntos sucesivos del aeropuerto y la base aérea fueron representados por el valor promedio de período más común en los perfiles respetando el espaciamiento de 500 metros entre estaciones.



Mapa 5.1 Distribución de los valores de períodos fundamentales en la Ciudad de Barquisimeto

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de período de la ciudad de Barquisimeto fluctúan en un rango comprendido entre 0,33 y 1,05 segundos, siendo estos dos últimos los valores máximo y mínimo respectivamente del grupo entero de datos.

Rocabado (2000), calculó una relación período vs. espesor de sedimentos apoyándose en el mapa de profundidad al basamento rocoso del valle de Caracas de Weston Geophysical (1969, mapa 5). Aunque destacó que dicha relación no es estrictamente lineal, sí establece márgenes de variación de los valores de período para diferentes espesores sedimentarios. Obtuvo que, para un rango de períodos comprendido entre 0,7 y 1,2 segundos, puede ser atribuido un rango de espesores entre 70 y 150 metros, y para períodos entre 0,2 y 0,7 segundos asigna espesores menores a 70 metros.

Las mediciones tomadas en la zona del aeropuerto en la fase de adquisición de este proyecto, mostraron un rango de variación entre 0,6 y 0,79 segundos en la mayoría de ellas. Estos valores se ajustan a los rangos estipulados por Rocabado (2000) para un espesor cercano a los 70 metros. Dicha deducción debe ser corroborada con el modelado 2D de las líneas sísmicas adquiridas sobre estos mismos puntos de medición de Ruido Sísmico Ambiental.

En la avenida Ribereña o Nectario Mejías (límite sur de la terraza de Barquisimeto), los valores de período oscilan entre 0,4 y 0,6 segundos, dichos valores se mantienen en general en toda la región sur de la ciudad. Esto es posiblemente debido a que justamente la avenida bordea extremo norte del río Turbio incorporándose a la terraza hacia el oeste, es decir el espesor sedimentario allí presente debe ser similar al del mismo río, al menos en el sector sureste de la ciudad.

Tanto en el extremo oriental como occidental de la ciudad, estos valores son también frecuentes pues, al igual que en la región sur, la terraza va disminuyendo su espesor. Los valores aquí encontrados oscilan entre 0,41 y 0,56 segundos. En el borde norte de Barquisimeto, prácticamente limitado por la avenida Circunvalación Norte, se registraron los valores de período más bajos, específicamente se obtuvo el valor

mínimo 0,33 segundos en esta zona, observándose además, valores cercanos a 0,4 segundos en toda la región norte de la ciudad.

Hacia la parte centro-sur de la ciudad se registraron los valores de período más altos, los mismos varían de 0,7 alcanzando valores superiores a 1 segundo, y se obtuvo el valor máximo de 1,05 segundos al este del cementerio de Barquisimeto.

CAPÍTULO VI

GRAVIMETRÍA

6.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DEL MÉTODO

El método gravimétrico es utilizado para medir las variaciones de la gravedad de un lugar a otro, es decir, su fundamento consiste en medir las variaciones laterales de la gravedad a través de la utilización de un instrumento de alta precisión denominado gravímetro; entendiéndose la gravedad como la atracción que ejerce la Tierra sobre los cuerpos.

Estas variaciones laterales de la gravedad son debidas a que los cuerpos rocosos no son homogéneos, su densidad varía de un lado a otro, por esto es posible decir que la gravedad en un punto depende de la densidad de los cuerpos de roca que infrayacen la superficie en dicho punto.

Para entender el fundamento de la prospección gravimétrica, se hace necesario introducir la expresión gravitacional de la Ley de Newton, la cual establece que la fuerza entre dos masas puntuales m_1 y m_2 se representa por

$$F = G \frac{m_1 * m_2}{r^2} \quad (6.1)$$

donde “r” corresponde a la distancia entre las dos masas y “G”, la constante de gravitación universal. La aceleración de una masa m_1 debida a la atracción de una masa m_2 , separadas por una distancia “r” se obtiene dividiendo la fuerza de atracción F por la masa m_2 :

$$a = \frac{F}{m_2} = G * \frac{m_1}{r^2} \quad (6.2)$$

6.1.1 Gravedad observada

Las estaciones gravimétricas son medidas en localizaciones precisadas previamente en la planificación de la logística de adquisición. Se debe procurar la creación de un mallado de estaciones equiespaciadas que cubra toda el área de

prospección. Cada punto de medición se encuentra afectado por diversos factores que deben ser tomados en cuenta al momento del procesamiento. Comúnmente, el valor que arroja el instrumento de medición es sometido a diversos factores de corrección, tales como la corrección por deriva diurna, por altitud, por mareas, entre otras, para obtener como resultado, el valor de la Anomalía de Bouguer de dicho punto.

6.1.2 Deriva gravimétrica

Los valores de gravedad están fuertemente afectados por varios factores como la posición de los astros que circundan a la Tierra, el movimiento de las mareas, etc. Éstos son parámetros que varían a lo largo del día, por esto, a los datos se les calcula la “deriva diurna”.

En general, la deriva se considera como la desviación de una medición respecto de un valor que es considerado normal. Para controlar este fenómeno, se realizan continuamente mediciones a lo largo de un día en un mismo punto de medición; esto proporciona una curva de comportamiento de la deriva durante el día en la región de estudio, luego se eligen los intervalos de tiempo de comportamiento lineal de la deriva, y será en estos intervalos cuando deban realizarse las mediciones, y posteriormente, hacer las correcciones correspondientes de manera que todas las mediciones tengan sus valores correspondientes tal como si hubieran sido tomadas en un mismo instante.

6.1.3 Corrección por altitud

La gravedad es afectada por la altitud, debido a que al aumentar la distancia al centro de la Tierra esta disminuye y viceversa. Dicha variación es tomada como 0,308652 miligales por metro, por esto se posiciona un punto como *datum* (generalmente el punto de amarre del circuito o el nivel del mar). Por lo tanto, la variación por altitud o variación de aire libre será

$$\text{Val} = 0,308652 * h \quad (6.3)$$

donde “h” representa la variación vertical en metros con respecto al punto base o datum, y al aumentar la altura con respecto a dicho punto base, esta última cantidad

se suma a las correcciones para compensar la disminución de los valores de gravedad por la altura y viceversa.

6.1.4 Gravedad teórica

La forma teórica de la Tierra se describe por medio de la superficie equipotencial normal de la Tierra coincidente con la superficie del mar y es denominada geoide. El geoide involucra las variaciones del potencial que originan entre otros, la distribución irregular de las masas en la corteza terrestre. El geoide se puede describir sólo de manera aproximada. La figura geométrica de la Tierra se aproxima a una esfera y con suficientemente exactitud a un elipsoide de rotación.

Las variaciones entre el geoide (forma teórica) y el elipsoide de rotación se llaman ondulaciones del geoide, y son una medida para la distribución irregular de las masas con respecto al elipsoide de rotación. Una vez establecida la forma elíptica de la Tierra, para calcular el valor de la gravedad teórica se utiliza la ecuación:

$$g_0 = 978031,846 * (1 + 0,005278895 \text{sen}\phi + 0,000023462 \text{sen}^2\phi) \text{mgals} \quad (6.4)$$

donde ϕ representa el valor de la latitud en el punto de interés. Esta última corresponde a la fórmula internacional de la gravedad adoptada en el Congreso Mundial de Geodesia en 1967. La ecuación anterior permite calcular la gravedad teórica o gravedad normal de cualquier punto situado sobre el elipsoide terrestre.

6.1.5 Corrección por mareas

Debido a su alta sensibilidad, los instrumentos de medición de la gravedad aptos para la prospección responden a la atracción gravitatoria del sol y de la luna, y registran las variaciones periódicas en la atracción causadas por los movimientos de la Tierra con respecto dichos astros. Estas fuerzas regularmente alzan y bajan las aguas terrestres en ciclos mareales previsibles. Las mismas fuerzas actúan en la superficie terrestre sólida, deformándola en la misma manera como el agua, aún en dimensiones más pequeñas.

El movimiento actual mareal de un punto ubicado en la superficie terrestre firme alcanza sólo unos centímetros. Este desplazamiento mismo causa pequeños cambios en la gravedad debido a la variación de la distancia con respecto al centro de la Tierra y debido a la nueva distribución de las masas en el interior de la Tierra. Estos cambios están superpuestos a las variaciones causadas por las fuerzas atractivas de los cuerpos del sistema Tierra - Sol - Luna. La magnitud de estos cambios varía con la latitud, con el día y el mes. El ciclo entero de las mareas está caracterizado por variaciones iguales y menores a 0,2 a 0,3mgal. Su variación media es +/-0,1mgal.

La corrección para la influencia de las mareas se puede realizar recurriéndose a diversos algoritmos computacionales que calculan la variación de la gravedad por este efecto de manera específica para cada territorio de interés.

6.1.6 Corrección de Bouguer

Existe también la llamada corrección de Bouguer, la cual elimina el efecto de las masas de rocas ubicadas entre el *datum* y el punto de medición ya que los cuerpos adyacentes también ejercen atracciones de los cuerpos cercanos. Este parámetro depende de la densidad y la altura y se calcula mediante la fórmula

$$CB = 0,04191 * h * \rho \quad (6.5)$$

donde ρ es la densidad del medio rocoso.

6.1.7 Cálculo y generación de mapas de Anomalías de Bouguer

Con todos estos parámetros se calcula la Anomalía de Bouguer mediante la siguiente fórmula:

$$AB = G_{obs} + C_{marea} + C_{deriva} \pm Cal. \mp C_{Bouguer} + CT - G_{teórica} \quad (6.6)$$

donde: G_{obs} es la gravedad observada, C_{marea} es la corrección por mareas, C_{deriva} corresponde a la corrección por deriva, C_{al} a la corrección de aire libre,

C.Bouguer es el valor de la corrección de Bouguer, C.T la corrección topográfica y $G_{\text{teórica}}$ es el valor de la gravedad calculado a partir de la latitud del punto.

Con los valores de Anomalía de Bouguer calculados en cada punto de medición, puede construirse un mapa de distribución de dicha anomalía, este valor es interpolado entre un punto y otro y se trazan curvas isoanómalas para su representación. A partir de éstas, pueden realizarse estimaciones acerca de la morfología de las estructuras presentes en el subsuelo, así como profundidades, etc.

Los mapas resultantes de estas anomalías pueden descomponerse en una componente regional y una residual, con la regional se pueden observar orientaciones y morfologías de estructuras profundas, y las anomalías residuales son causadas por efectos de cuerpos más someros. La primera muestra tendencias más suaves con orientaciones generalmente bien definidas y en grandes extensiones, mientras que las respuestas producidas por cuerpos someros presentan cambios más agudos con cierres isoanómalos más pequeños que las anteriores debidos a efectos de sitio.

6.1.8 Modelado Gravimétrico

En la fase de interpretación de los datos gravimétricos se deben construir perfiles en aquellas zonas que resulten de interés en el estudio, esto es, se eligen regiones del mapa de Anomalías de Bouguer donde la construcción de un modelo del subsuelo sobre la base de los gradientes de variación de las anomalías resulte representativa. Entonces, se escoge una orientación generalmente perpendicular a la tendencia general de las líneas isoanómalas (perpendicular al rumbo de la estructura rocosa) y, basándose en fundamentos teóricos y otras observaciones (de otros métodos aplicados, geología de superficie, etc.) se construye un modelo geológico-estructural y de densidades del subsuelo que se ajuste a la respuesta gravimétrica obtenida.

6.2 MARCO METODOLÓGICO

6.2.1 Metodología de adquisición

- La metodología de adquisición tanto de los datos obtenidos previamente a este proyecto (Rocabado *et al*, 2002b), como en la fase de adquisición llevada a cabo en mayo de 2003 fue la misma, exceptuando el espaciamiento entre estaciones de cada fase. El instrumento de medición utilizado fue un gravímetro digital marca SCINTREX modelo Autograv CG-3, programado para tomar 60 lecturas por minuto y el mismo da un valor promedio (en miligales) de todas las lecturas con su respectivo valor de desviación estándar de los datos, el cual no debía exceder el 0,1% del valor de dichos datos.
- El primer grupo de datos se adquirió por toda la ciudad de Barquisimeto, procurando mantener un espaciamiento de 500 metros entre estaciones, creando así, un mallado que cubre toda la región. El segundo grupo de datos tuvo como objetivo crear un perfil de estaciones alineadas, espaciadas 25 metros entre sí, y dispuestas justo sobre las posiciones de las líneas sísmicas del aeropuerto y la base aérea militar, a fin de correlacionar los resultados con los de los datos de ruido sísmico y con los de sísmica de refracción.
- En la primera fase de adquisición se utilizaron dos estaciones base. Una de ellas es un punto BM ubicado dentro del Aeropuerto con coordenadas E 460.573 N 1.110.495, y la segunda estación fue creada amarrando su valor de gravedad al BM del aeropuerto ubicada en el punto de coordenadas E 461.377 N 1.112.018.

6.2.2 Metodología de procesamiento

De manera esquemática, se puede representar el procedimiento para el procesamiento de los datos gravimétricos de la siguiente manera:

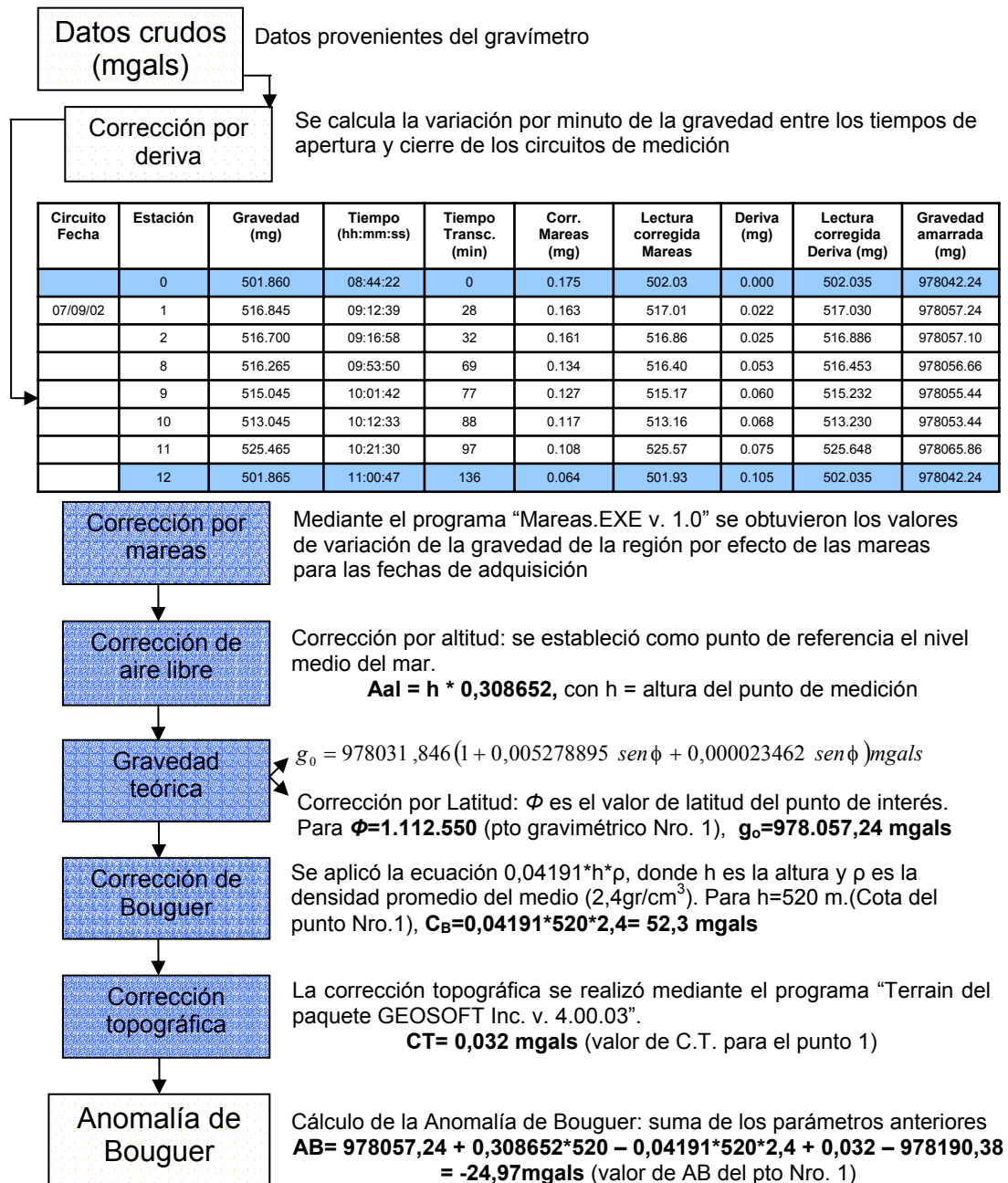


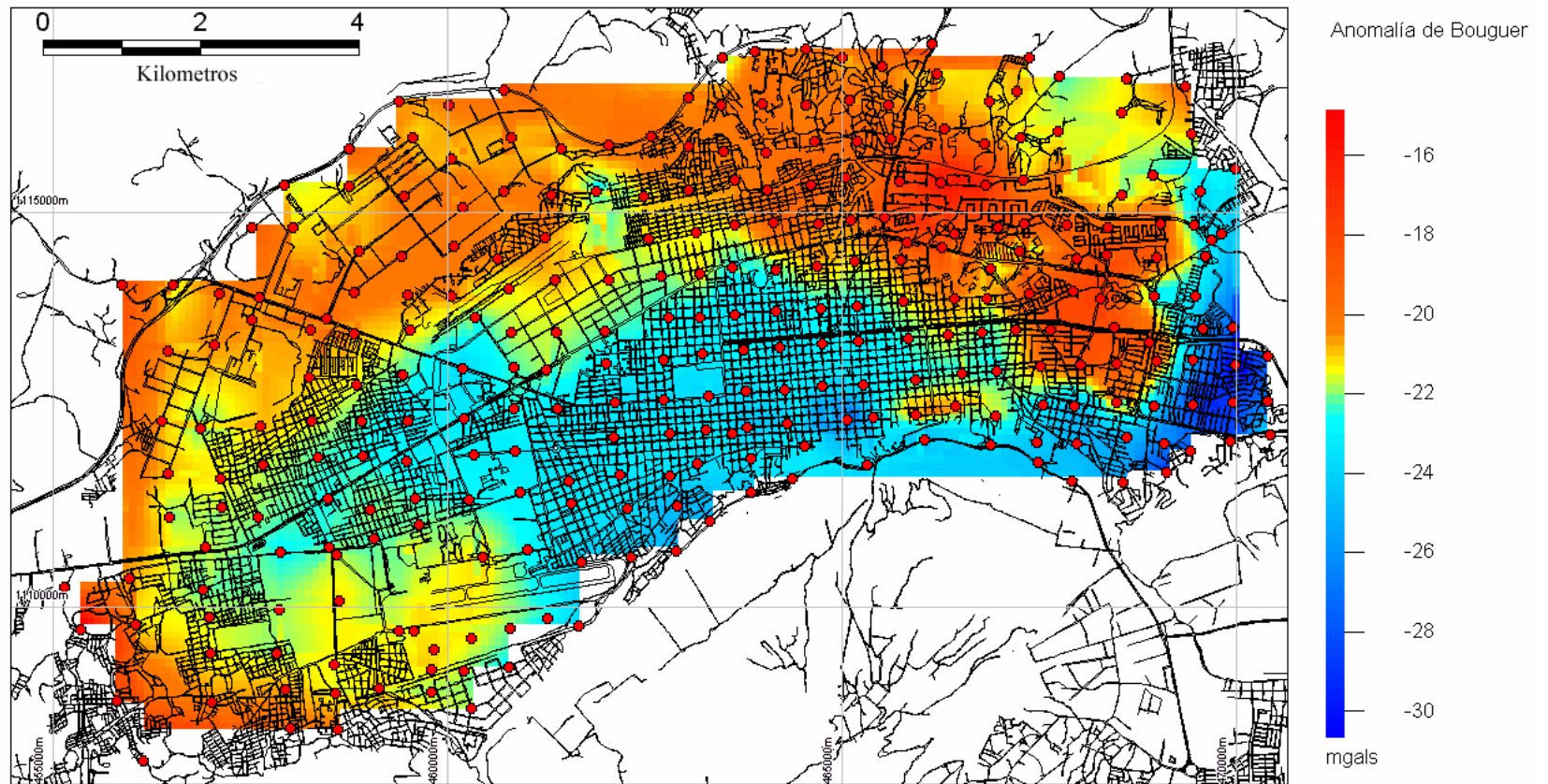
Figura 6.1 Secuencia de correcciones y cálculos realizados para obtener los valores de Anomalía de Bouguer

- Tanto la adquisición como el procesamiento del primer grupo de datos gravimétricos, fueron realizados por el Ingeniero Javier Sánchez (FUNVISIS). Los datos restantes se procesaron bajo la misma metodología de los datos previos durante el desarrollo de este proyecto.
- Mediante el programa SURFER se calcularon las componentes regional y residual de las respuestas gravimétricas, y fueron graficadas mediante la herramienta de regresión polinomial que ofrece dicho programa con diferentes grados polinómicos. Los resultados arrojados de dichas componentes se utilizaron para calcular la correlación de las mismas con los valores de Anomalía de Bouguer. Al graficar dicha correlación vs. el grado polinómico propio, se genera una curva que se estabiliza a partir del valor correspondiente al grado del polinomio que más se ajusta al comportamiento general de los datos.
- Con el soporte de la sección geológica construida en este proyecto, se construyeron mediante el programa GM-SYS dos perfiles gravimétricos que atraviesan la ciudad, uno en dirección N-S y otro en dirección N60E, aprovechando los datos extras que fueron medidos en las afueras de la ciudad.

6.3 RESULTADOS

De la integración de los datos previos adquiridos y procesados por el Ing. Javier Sánchez con los obtenidos en la fase de adquisición de este proyecto, se generó la tabla de datos que se muestra en el apéndice B. El mapa 6.1 corresponde al mapa de Anomalías de Bouguer generado a través del programa “Vertical Mapper” perteneciente al paquete “Map Info”, mediante la técnica de interpolación “Natural Neighbor”.

Para la elaboración de este mapa se discriminaron los datos levantados fuera de la ciudad de Barquisimeto, a fin de evitar errores de interpolación por parte del programa en zonas donde no existen mediciones. Estas lecturas que salen de la ciudad fueron utilizadas para generar los modelos gravimétricos a través del programa GM-SYS que se muestran más adelante.



Mapa 6.1 Mapa de Anomalías de Bouguer de las mediciones gravimétricas. Los puntos rojos representan las localizaciones de las mediciones gravimétricas

Con el programa SURFER se calcularon mediante la herramienta “polinomial regression” las componentes regional y residual del comportamiento de la gravimetría en la región para seis grados polinómicos, a fin de calcular la correlación de dichas componentes con los datos de Anomalía de Bouguer. El gráfico resultante se estabiliza en el punto que representa el grado del polinomio más adecuado para representar dichas componentes.

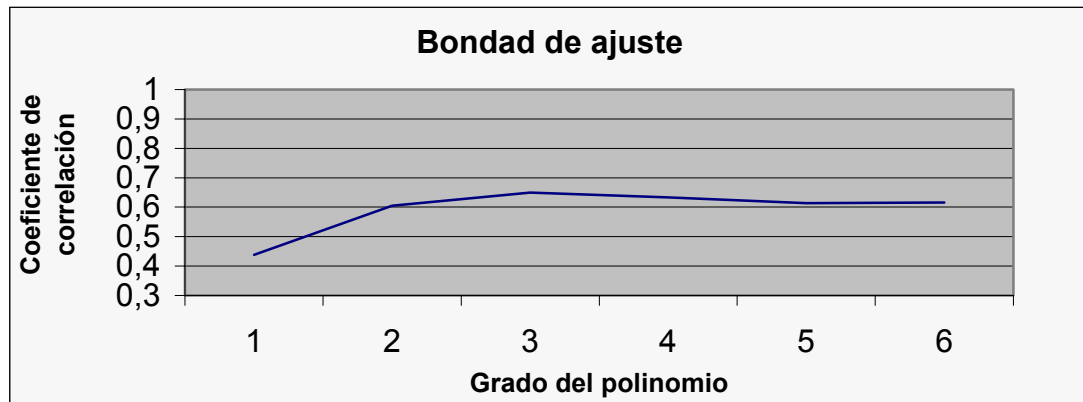
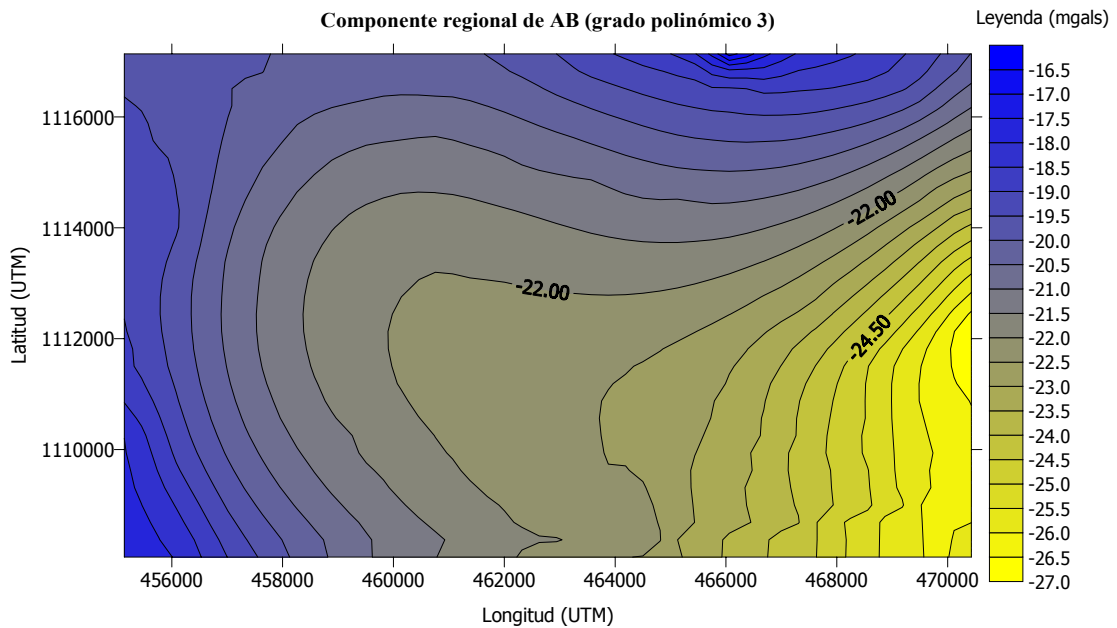


Figura 6.2 Bondad de ajuste de los datos de la componente regional de la respuesta gravimétrica con los datos de Anomalía de Bouguer.

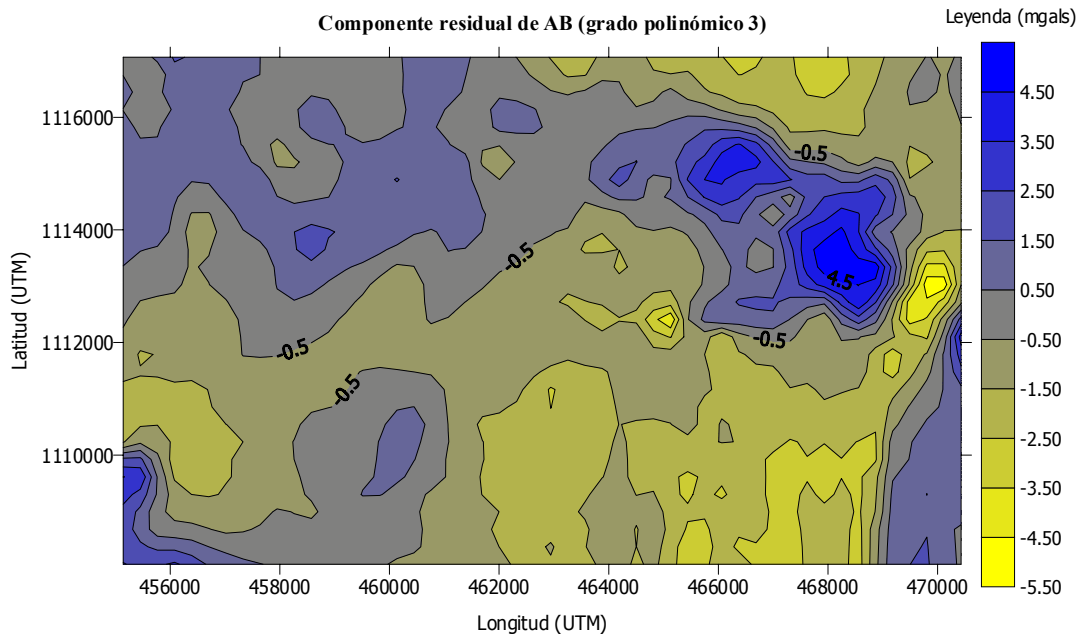
Tabla 6.1 Datos de la correlación de la componente regional de los datos gravimétricos con los datos de Anomalía de Bouguer.

Grado del polinomio	Coef. Correlación
1	0,438128532
2	0,604874943
3	0,649683646
4	0,632858076
5	0,613212567
6	0,615870626

Se escogió el número tres como el grado polinómico más adecuado para representar la componente regional de los datos gravimétricos. Los mapas que se muestran a continuación fueron generados en SURFER mediante la herramienta de interpolación “Polinomial Regression” con grado polinómico 3.



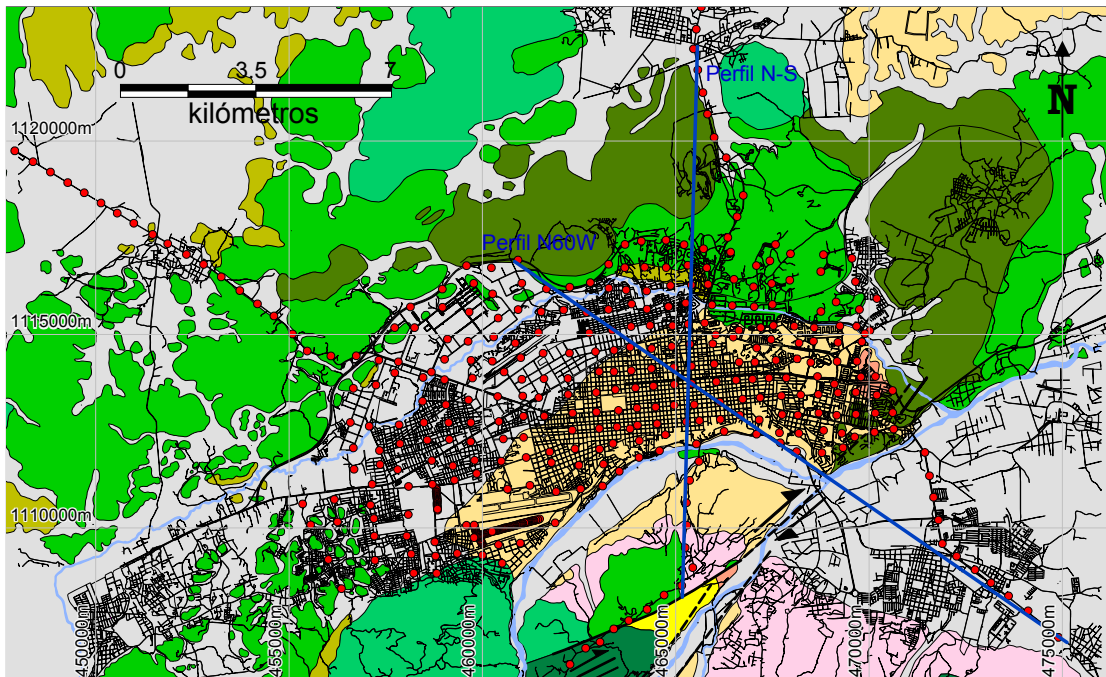
Mapa 6.2 Componente regional con grado polinómico 3 de los datos de Anomalia de Bouguer



Mapa 6.3 Componente residual con grado polinómico 3 de los datos de Anomalia de Bouguer

Con la construcción de un perfil geológico que engloba al comportamiento general de los rasgos geotectónicos de la región (mostrado en el marco geológico), además de la utilización de datos directos de densidades medidas a partir de los datos

geotécnicos, fue posible desarrollar dos modelos gravimétricos conservando dicho comportamiento.



Mapa 6.4 Disposición de los perfiles gravimétricos escogidos (líneas azules)

El perfil de orientación N60W, llega en su parte oriental hasta la localidad de Cabudare, y atraviesa a la falla de Boconó justo en la coincidencia de l perfil con la traza del río Turbio. A partir esta intersección, según Giraldo y Audemard (1997), el perfil gravimétrico se encuentra dentro de la cuenca de tracción o “pull-apart” de Cabudare. Por lo que del modelado gravimétrico de este perfil se muestra una primera aproximación acerca del espesor de los sedimentos en dicha cuenca, así como el buzamiento de su base. Pero esto corresponde a un estudio posterior que incluya una densificación de las mediciones gravimétricas, así como investigaciones bibliográficas de la región, con el objetivo de modelar con mayor precisión dicha estructura.

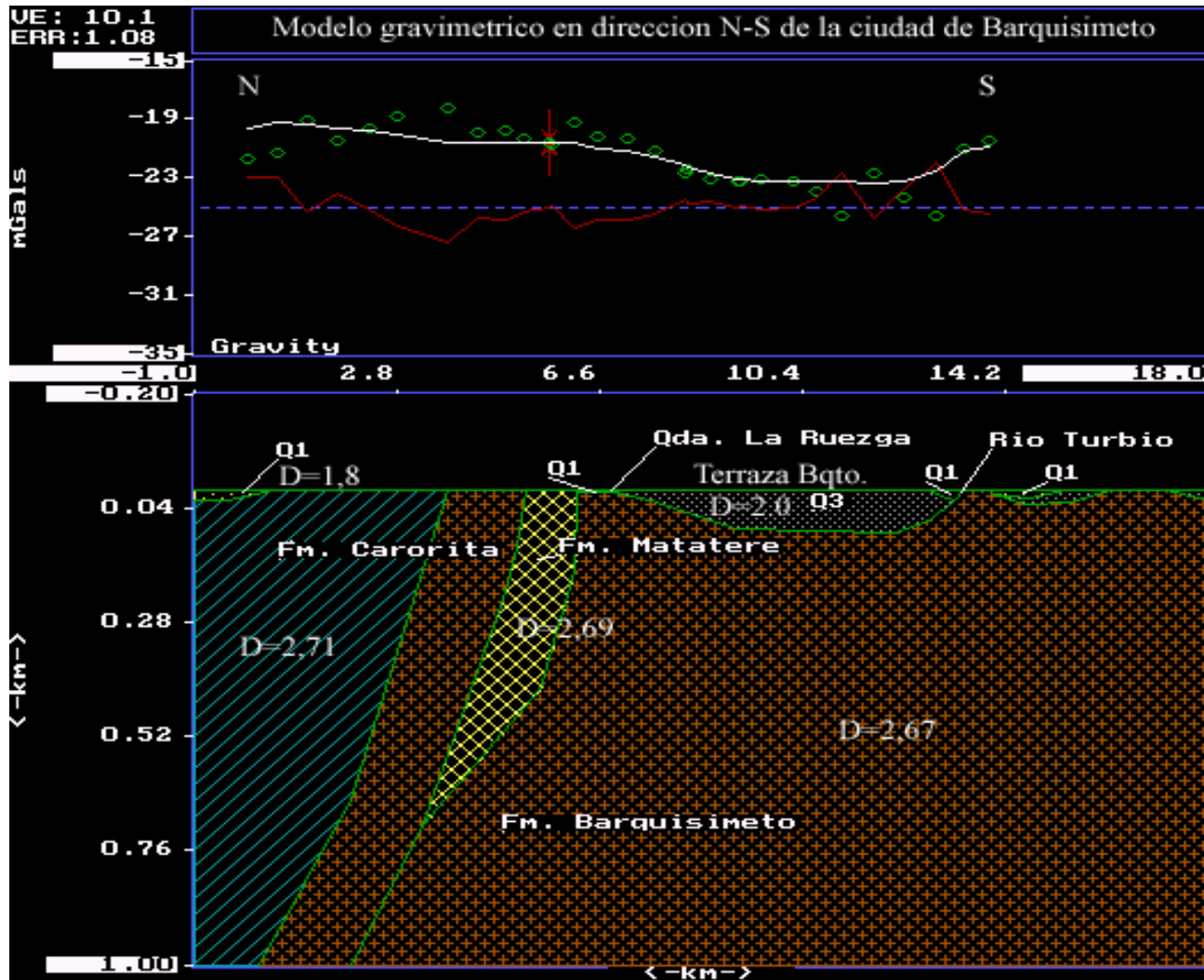


Figura 6.3 Modelo gravimétrico N-S de la ciudad de Barquisimeto

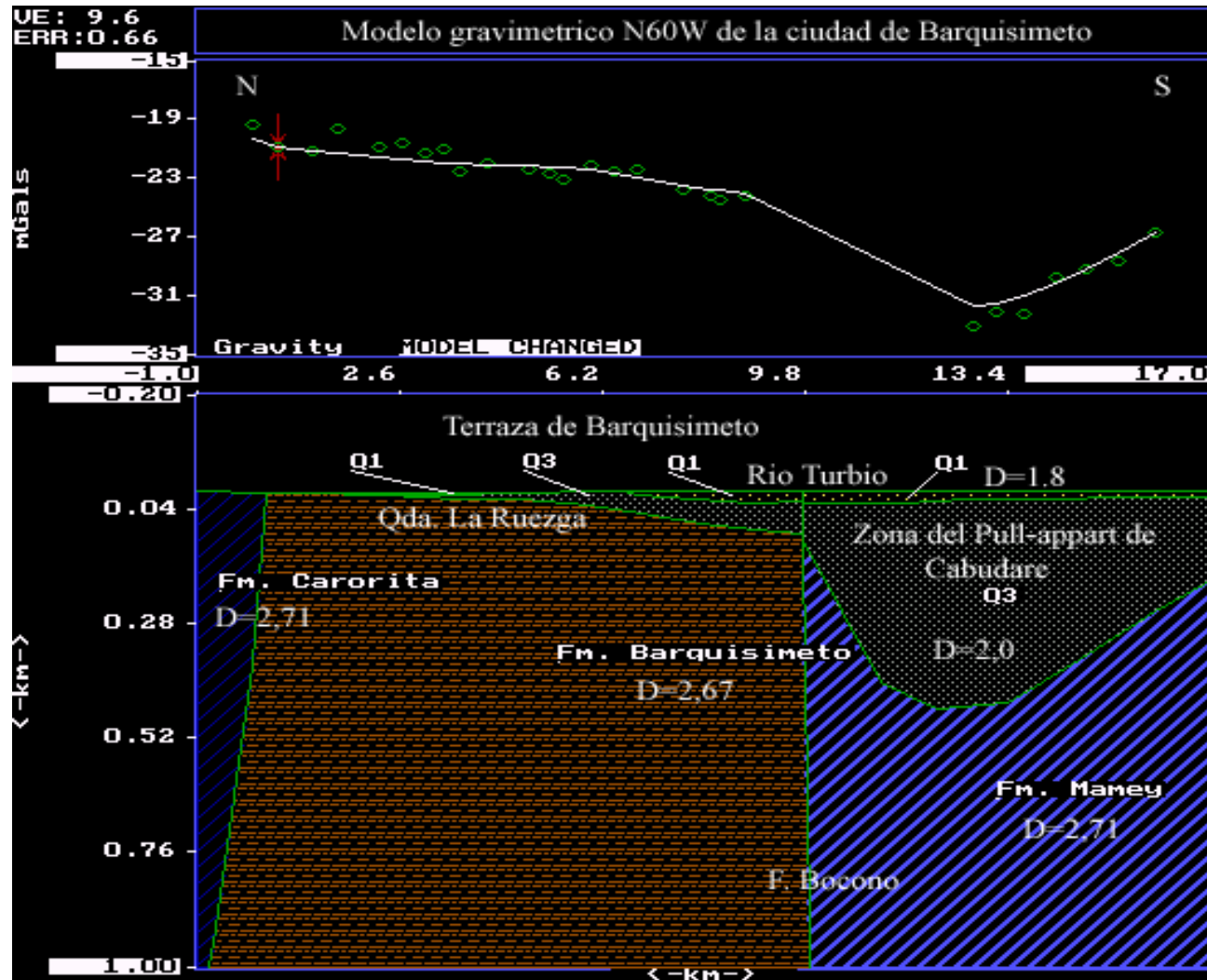


Figura 6.4 Modelo N60W de la ciudad de Barquisimeto

6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se utilizaron 462 estaciones gravimétricas entre las adquiridas y procesadas previamente por el Ing. Javier Sánchez y las obtenidas en la fase de adquisición de este proyecto para generar dicho mapa de contornos. Al sur-oeste de la ciudad se observan valores cercanos a -15 mgal. En las cercanías del Aeropuerto y la Base Aérea de Barquisimeto los valores se encuentran en el rango inferior a -20 mgal, fluctuando hasta alcanzar -22 mgal.

En todo el sector norte de la ciudad los valores se mantienen, al igual que en el sur-oeste, cercanos a los -20 mgal. Los valores de las anomalías del sector norte disminuyen hacia el lado oriental, registrándose menores a -22 mgal. En el área central de la ciudad, desde el norte inmediato del Aeropuerto, cubriendo la zona del cementerio y hasta el extremo centro-oriental de Barquisimeto, se registraron valores de anomalía gravimétrica menores a -23 miligales, reportándose hacia el este estaciones con valores inferiores a -29 mgals.

Sin embargo, los valores máximo y mínimo -12,48 y -33,28 mgals respectivamente, no fueron obtenidos dentro de la ciudad, estos se encuentran en las dos extensiones de mediciones que van hacia el sur, específicamente, el mínimo se halla en las mediciones que van hacia el área de Cabudare, donde se infiere que dicho valor corresponde al punto de mayor espesor de sedimentos de la cuenca de tracción de Cabudare. El valor máximo se encuentra hacia una zona al sur del Río Turbio donde el espesor de sedimentos es relativamente pequeño.

Estas tendencias se ven reflejadas en los modelos gravimétricos realizados para la ciudad. El perfil N-S se creó conservando el estilo con que se construyó la sección geológica mostrada en el marco geológico. Los contactos entre formaciones que se muestran en este perfil, se encuentran cartografiados y geo-referenciados en el mapa geológico creado por Bechtold (2004) que acompaña a la sección mencionada. Este perfil muestra hacia el norte a la Formación Carorita, la cual es una unidad alóctona de la Formación Mamey, por lo que las densidades utilizadas para modelar ambos cuerpos litológicos fue $2,71 \text{ gr/cm}^3$. La Formación Carorita se encuentra según

el perfil geológico, en contacto de falla inversa con la formación Barquisimeto, cuya densidad se estimó en $2,67 \text{ gr/cm}^3$, al ser éstas rocas lutíticas con metamorfismo de muy bajo grado, a veces reportadas como lutitas filíticas.

Se representa como un cuerpo alóctono dentro de la Formación Barquisimeto, un bloque perteneciente a la Formación Matatere, descrita según Stephan (1982), como perteneciente al conjunto Matatere II, y se le ha asignado un valor de densidad de $2,69 \text{ gr/cm}^3$ al tratarse de una unidad de areniscas y sedimentos pelíticos de edad Paleoceno superior-Eoceno inferior.

Entre la Quebrada La Ruezga y el Río Turbio se dispone la terraza de Barquisimeto objeto de estudio. Esta terraza aluvial fue caracterizada por Giraldo (1985) como intercalaciones de horizontes arenosos y arcillosos en los conglomerados de edad cuaternaria, y es representada por la nomenclatura Q_3 según su edad de depósito. Según datos de perforaciones geotécnicas se utilizó una densidad promedio de 2.0 gr/cm^3 para estos sedimentos. Del mismo autor se obtuvieron las características de los sedimentos Q_1 , es decir, conglomerados mal consolidados con intercalaciones de niveles arcillosos, más jóvenes que los sedimentos Q_3 pero con menores espesores, y se hallan en los bordes de la Quebrada La Ruezga y del Río Turbio, desplegándose hacia el sector de Cabudare en esta última localización. Según perforaciones geotécnicas realizadas sobre los sedimentos Q_1 , se ha establecido una densidad de 1.8 gr/cm^3 para el modelado gravimétrico de este tipo litológico.

En el modelo de orientación N60W se observa, al igual que en el anterior, la Formación Carorita en contacto de falla inversa con la Formación Barquisimeto en el sector norte de dicha sección.

El contacto sugerido tanto en el modelo gravimétrico como en el corte geológico para las formaciones Barquisimeto y Mamey es la falla de Boconó. Hacia el sur-este de esta falla se encuentra el llamado "Pull-Appart" de Cabudare descrito por Giraldo y Audemard (1997). La falta de mediciones gravimétricas en este sector, sólo permitió hacer una primera estimación acerca del espesor de sedimentos allí presentes, así como el buzamiento hacia el norte del basamento rocoso de dicha depresión.

Según los modelos anteriormente descritos, el espesor de la terraza varía prácticamente de 0 metros en las cercanías de la Quebrada La Ruezga al norte de Barquisimeto, a más de 80 metros en el límite sur. Justo sobre el Río Turbio el espesor de sedimentos disminuye y se observa el contacto entre los sedimentos Q_1 y Q_3 . La profundidad máxima en la zona del "Pull-Appart" de Cabudare supera los 400 metros. Dicho espesor se considera lógico al compararlo con los espesores de cuencas contemporáneas a ésta, tal como es el caso de la Depresión de Yaracuy, así como la Cuenca del Lago de Valencia, el Valle de Caracas, entre otros (Comunicación verbal Audemard, 2004).

Por otro lado, en el cálculo de las componentes regional y residual de los datos gravimétricos, la correlación de la componente regional calculada con 6 grados polinómicos diferentes con los datos de anomalía de Bouguer, sugiere en la bondad de ajuste al grado tres como el más adecuado para representar dichas componentes.

De estos mapas se observa que el comportamiento regional de la anomalía gravimétrica sugiere una orientación del basamento rocoso de la terraza o Formación Barquisimeto, aproximadamente N40E, en concordancia con los datos de rumbos de las estructuras de los mapas geológicos de Bellizia y Rodríguez (1968). Este mapa presenta sus mayores valores de anomalía (-16,5 mgal) en el extremo nor-occidental, observándose justo en el extremo opuesto o sur-este del mapa valores mínimos cercanos a -27 mgal.

El mapa de la componente residual de los datos no presenta una marcada tendencia de crecimiento o decrecimiento de los datos en ninguna orientación, esto se debe a que la respuesta del mapa de Anomalías de Bouguer se encuentra dominada por la estructura rocosa subyacente a la terraza, considerándose entonces, a los sedimentos de la terraza como homogéneos prácticamente en toda su extensión. Los mayores valores de anomalía gravimétrica residual se concentran hacia el nor-este de la ciudad, observándose cercanos a 4,5 mgal.

CAPÍTULO VII

ESTUDIO ESTADÍSTICO Y GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS

7.1 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DE LAS HERRAMIENTAS

Desde hace algún tiempo se ha hecho usual en Venezuela respaldar la confiabilidad de los datos gravimétricos mediante el uso de herramientas estadísticas que prueben normalidad de las poblaciones de datos, así como medidas de dispersión y de tendencia central, entre otros. Esto con el fin de discriminar valores anómalos o fuera del rango del comportamiento general de los datos que puedan “contaminar” la información, y así, tener una evaluación cuantitativa de la calidad de los mismos.

Las herramientas geoestadísticas son productos de la integración de técnicas estadísticas utilizadas para estimar la variabilidad espacial de los datos y, mediante la integración de los resultados obtenidos, se llega a la generación de un modelo teórico de distribución espacial, siendo la técnica de “kriging” una de las más comunes en este tipo de representación.

La técnica de ruido sísmico ambiental se ha venido aplicando en Venezuela por su practicidad en cuanto al método de adquisición, costos, además de los resultados que ofrece como herramienta para los estudios de microzonificación sísmica de ciudades y poblaciones en crecimiento demográfico (Rocabado *et al.*, 2001). Esta técnica, al igual que en la gravimetría, se lleva a cabo tomando mediciones puntuales en una región de estudio, procurando crear un mallado de mediciones acorde con las dimensiones del área y según el objetivo de prospección.

Los valores de período se incrementan con el aumento del espesor de sedimentos, tendencia contraria que existe para los datos gravimétricos: cuanto más lejos se encuentre la fuente densa de atracción gravimétrica (en este caso el cuerpo rocoso subyacente a los sedimentos), menor será el valor de gravedad correspondiente, y teniéndose en el caso del ruido sísmico ambiental, el hecho de que las ondas sísmicas sufren importantes amplificaciones al pasar de un medio rocoso a uno no consolidado. Es decir, a *grosso modo* podría hablarse de una proporcionalidad

inversa entre los resultados de ambas técnicas. Es por esto que ha surgido la motivación de realizar una correlación experimental para los datos gravimétricos y de ruido, como un primer avance en la estimación del comportamiento de una técnica a partir del apoyo proporcionado por otra que posee mayor densidad de información.

7.1.1 Definiciones de Estadística Clásica

Es llamado experimento (o fenómeno) a un conjunto de pruebas realizadas de la misma forma y con un fin determinado en las que, de alguna forma, se controlan los factores influyentes. El conjunto de todos los puntos muestrales de un experimento se llama espacio muestral.

7.1.2 Población y Muestra

Un conjunto de elementos con características comunes constituye una población o universo. Un subconjunto de una población es una muestra de esta población. En ocasiones, cuando se estudia una población, es imposible medir las características en cada elemento que pertenece a la misma. Es de esperar que mientras mayor sea el tamaño de la muestra, mayor eficiencia tendrá la observación, sin embargo, el aspecto económico de toda investigación obliga a que las muestras sean lo más pequeña posible y al mismo tiempo, no dejen de ser representativas de la población que se investiga.

7.1.3 Medidas de Tendencia Central y de Dispersión

Frecuentemente se hace necesario reemplazar todo un conjunto de datos por un simple número que represente la tendencia central o la dispersión respecto a esta medida de tendencia central. Se presentan a continuación tres de estas medidas: la media aritmética, la mediana y la moda; como medida de dispersión o variabilidad: la varianza muestral.

a) Media Aritmética: si se tiene un grupo de observaciones: x_1, x_2, \dots, x_n la media aritmética o promedio se expresa por:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (7.1)$$

Esta expresión de cálculo se usa con los datos originales siendo la más común y útil de todas las medidas de tendencia central.

b) Mediana: la mediana es también una medida de tendencia central, es por definición, el valor que ocupa la posición central cuando los valores muestrales se ordenan en forma creciente. Cuando “n” (número total de datos) es impar, la mediana está unívocamente determinada. En cambio, si el número de observaciones es par, todo punto del intervalo comprendido entre los dos valores centrales satisfacen la condición de ser mediana y por lo general, el promedio de estos valores se toma como mediana muestral.

c) Varianza Muestral: la varianza muestral, es una medida de dispersión o variabilidad de la variable, se denota por “s²” y se representa mediante la ecuación:

:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (7.2)$$

7.1.4 Distribuciones Muestrales

En la investigación de ciertas características de una población, tales como la media o tendencia central, la dispersión o varianza, la mediana, la distribución, etc., cuando se dice que la población tiene una distribución F(x), significa que se investiga una característica X, en los elementos de esta población y que esta característica es una variable aleatoria con distribución F(x).

La varianza y la desviación estándar son las medidas de variabilidad más frecuentemente empleadas. Al comparar dos o más conjuntos de datos cuyas unidades de medición son idénticas, se puede decir que una muestra tiene un menor grado de dispersión que otra si la primera tiene una menor varianza o desviación estándar.

Generalmente se tiene un conjunto de datos de una serie univariada que debe ser analizada, la estrategia a seguir puede poseer diferentes metodologías de trabajo,

pero una de las más utilizadas, es el estudio de las distribuciones de probabilidad. Dicho estudio no sólo se realiza con la finalidad de estimar el modelo que rige el fenómeno, también puede ser utilizada para detectar datos fuera de rango y es de gran utilidad para la construcción de filtros numéricos. De aquí surge el llamado histograma de frecuencias, el cual discrimina en intervalos las muestras según su valor o magnitud en el eje horizontal, y representa su frecuencia de aparición en el eje vertical.

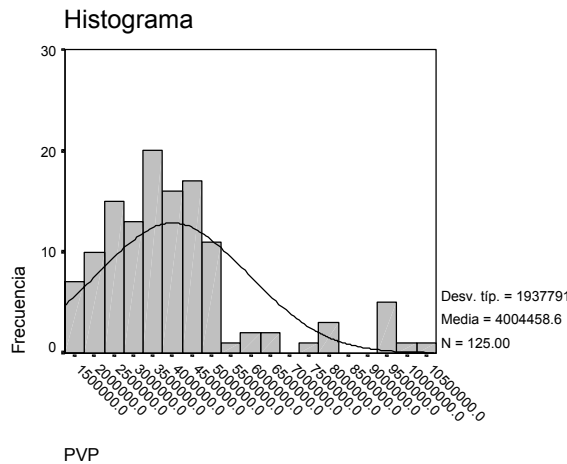


Figura 7.1 Ejemplo de histograma de frecuencias y su curva de probabilidades respectiva.

Otra representación gráfica de gran utilidad es el análisis gráfico de distribución normal, este procedimiento trata de estimar si los datos pueden proceder de una distribución de población normal, y para ello se utilizan dos gráficos y una parte analítica que son los que se muestran en la figura siguiente. Este recibe el nombre gráfico Q-Q (cuartiles reales y teóricos de una distribución normal). Los Cuartiles dividen a la muestra en una serie de grupos de igual tamaño.

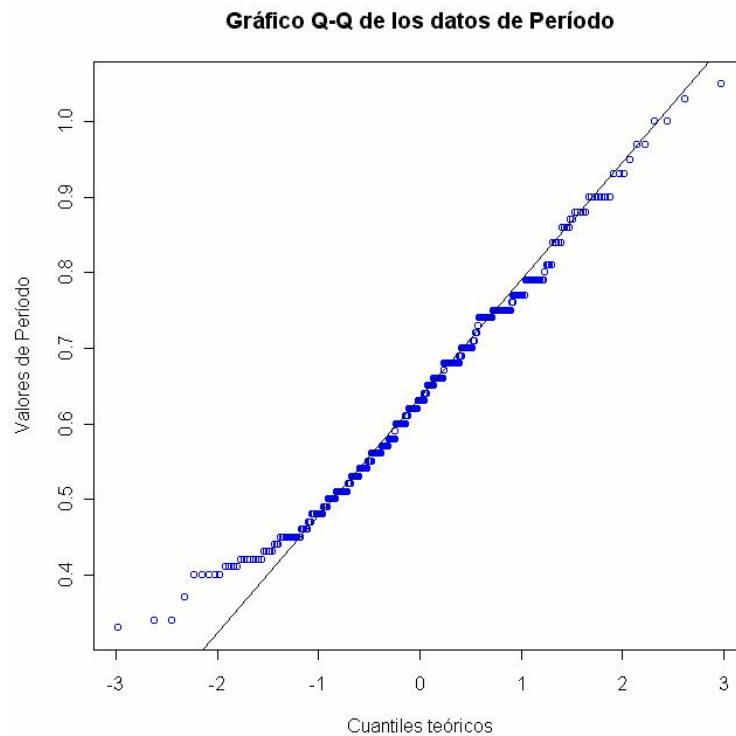


Figura 7.2 Ejemplo de gráfico de cuantiles reales y teóricos de una población de datos de ruido sísmico ambiental

En el gráfico mostrado se puede observar cómo los valores se ajustan a una distribución normal teórica, la cual viene representada por una línea recta y los puntos corresponden a las diferentes puntuaciones de los sujetos en la distribución empírica. Si los puntos están próximos a la recta, quiere decir que el ajuste es aceptable y viceversa, cuanto más se alejen estos de la misma (Apuntes de clase Geoestadística, Meza, 1999).

7.1.5 Elementos de Geoestadística

La geoestadística es una colección de métodos estadísticos que fueron utilizados tradicionalmente en geociencias. Estos métodos describen la autocorrelación espacial entre datos de la muestra y lo utilizan en varios tipos de modelos espaciales. La autocorrelación espacial se puede analizar usando correlogramas, funciones de la covariación y variogramas (semivariogramas). La idea

principal de los métodos geoestadísticos es relacionar la variación espacial entre densidades demográficas con la distancia (Apuntes de clase Geoestadística, Meza, 1999).

7.1.6 Variogramas

Tres de las funciones más utilizadas para la estimación de la continuidad espacial entre datos son: la función de covarianza $C(h)$, la función de correlación $\rho(h)$ y el variograma $\gamma(h)$. Estas funciones son útiles para describir cómo la continuidad espacial cambia en función de la distancia y de la dirección de observación. Sin embargo, el variograma es el más comúnmente escogido (Srivastava, 1989).

Se hace oportuno entonces introducir los conceptos de los rasgos más significativos en el análisis de variogramas:

a) Rango: Como la distancia de separación entre pares de datos se incrementa, el valor correspondiente del variograma generalmente también crece. Eventualmente sin embargo, un incremento en la distancia de separación no muy grande, causa un incremento correspondiente en la diferencia cuadrada promedio entre pares de valores y el variograma alcanza una “meseta”. La distancia a la cual el variograma alcanza dicha meseta es llamada “Rango”.

b) Efecto pepita: El valor del variograma para $h = 0$ es estrictamente cero; muchos factores, tales como el error de muestreo y la variabilidad a corta escala, pueden causar diferencias entre valores muestrales separados por distancias tan extremadamente pequeñas como para ser completamente disímiles. Esto causa una discontinuidad en el origen del variograma. El salto vertical entre el valor cero del origen al valor del variograma a distancias de separación extremadamente pequeñas es llamado “efecto pepita” (Srivastava, 1989).

Típicamente, el análisis de continuidad espacial comienza con un variograma omnidireccional, para el cual la tolerancia direccional es suficientemente grande como para que la dirección de cualquier vector de separación particular se considere despreciable. Con todas las posibles direcciones combinadas en un único variograma, sólo la magnitud de dicho vector es importante. Un variograma omnidireccional

puede ser tratado entonces como el promedio de una serie de variogramas direccionales.

El cálculo de un variograma omnidireccional no implica la suposición de que la continuidad espacial es la misma en todas las direcciones; éste únicamente sirve como un punto de inicio para establecer algunos de los parámetros requeridos para el cálculo de variogramas muestrales. Ya que la dirección no juega un papel importante en los variogramas omnidireccionales, el interés en éstos se puede concentrar en la búsqueda de los parámetros de distancias que producen la estructura más clara.

Otra razón para comenzar el análisis de continuidad espacial con cálculos omnidireccionales, es que los mismos pueden proporcionar informaciones previas para variogramas direccionales erráticos. El variograma omnidireccional contiene más pares de muestras que cualquier variograma direccional y, por lo tanto, muestra con mayor facilidad una estructura claramente interpretable. Si el variograma omnidireccional no muestra una estructura clara, no deberían esperarse resultados satisfactorios con los variogramas direccionales.

Una vez que el variograma direccional tiene un comportamiento adecuado, se puede proceder a explorar el patrón de anisotropía con distintos variogramas direccionales. Un mapa de contornos de los valores muestrales puede brindar algunos indicios sobre las direcciones de mínima y máxima continuidad.

Al determinar las direcciones de máxima y mínima continuidad, se hace necesario elegir una tolerancia direccional suficientemente grande para permitir la obtención de pares de datos que proporcionen un variograma claro, pero suficientemente pequeña como para que el reconocimiento de las características del variograma no sea confuso. Si el patrón de muestreo es notablemente anisotrópico, con el espaciamiento entre muestras haciéndose mucho menor en unas direcciones que en otras, los parámetros de distancia dependerán de la dirección.

Una vez encontrados los ejes o direcciones de máxima y mínima continuidad, sólo queda por determinar la tolerancia angular o direccional. Cuando se calculan los variogramas direccionales, una tolerancia angular muy pequeña toma muy pocos pares de datos, y el variograma resulta muy errático (Srivastava, 1989).

7.1.7 Kriging

Kriging es el proceso de estimar el valor de una variable espacial distribuida de valores adyacentes. El proceso de kriging implica la construcción de una ecuación media móvil cargada que se utiliza para estimar el valor verdadero de una variable regionalizada en las localizaciones específicas. Esta ecuación es diseñada para reducir al mínimo el efecto de altas variaciones de los valores de la muestra involucradas, incluyendo el conocimiento de la covariación de los puntos estimada y otros puntos de la muestra dentro del rango. Los aspectos principales a considerar en entender la teoría de kriging son el error de la valoración y el cálculo de los coeficientes que cargan.

Las características adicionales del Kriging se describen a continuación:

- **Imparcialidad Condicional:** Este término significa que, en promedio, el grado de todos los bloques igualará al grado estimado. Esto es solamente cierto para los valores con una distribución normal. Si los valores no son normalmente distribuidos entonces la mejor aproximación será la condicionada.

- **El Efecto de suavizado:** Kriging da como resultado un efecto de suavizado marcado en los valores altos originales que tienden a ser subestimados y los valores bajos a ser sobrestimados.

- **La aditividad de Kriging:** Es el único método en el cual la adición de las estimaciones de bloques más pequeños iguala la estimación de una sola unidad más grande. Esto permite la recombinación de bloques más pequeños en unidades más grandes. Esto es solamente cierto si los mismos puntos de referencias se utilizan para ambos cálculos. También se aplica solamente a los valores estimados, no a las precisiones o a las variaciones.

- **La interpolación exacta:** Kriging es un método exacto de interpolación, ya que la interpolación pasa a través de los puntos de referencias más que en la cercanía de los mismos, el punto de kriging puede ser utilizado para estimar o referenciar un punto. Esto dará una estimación igual al valor real (Apuntes de clase Geoestadística, Meza, 1999).

7.2 MARCO METODOLÓGICO

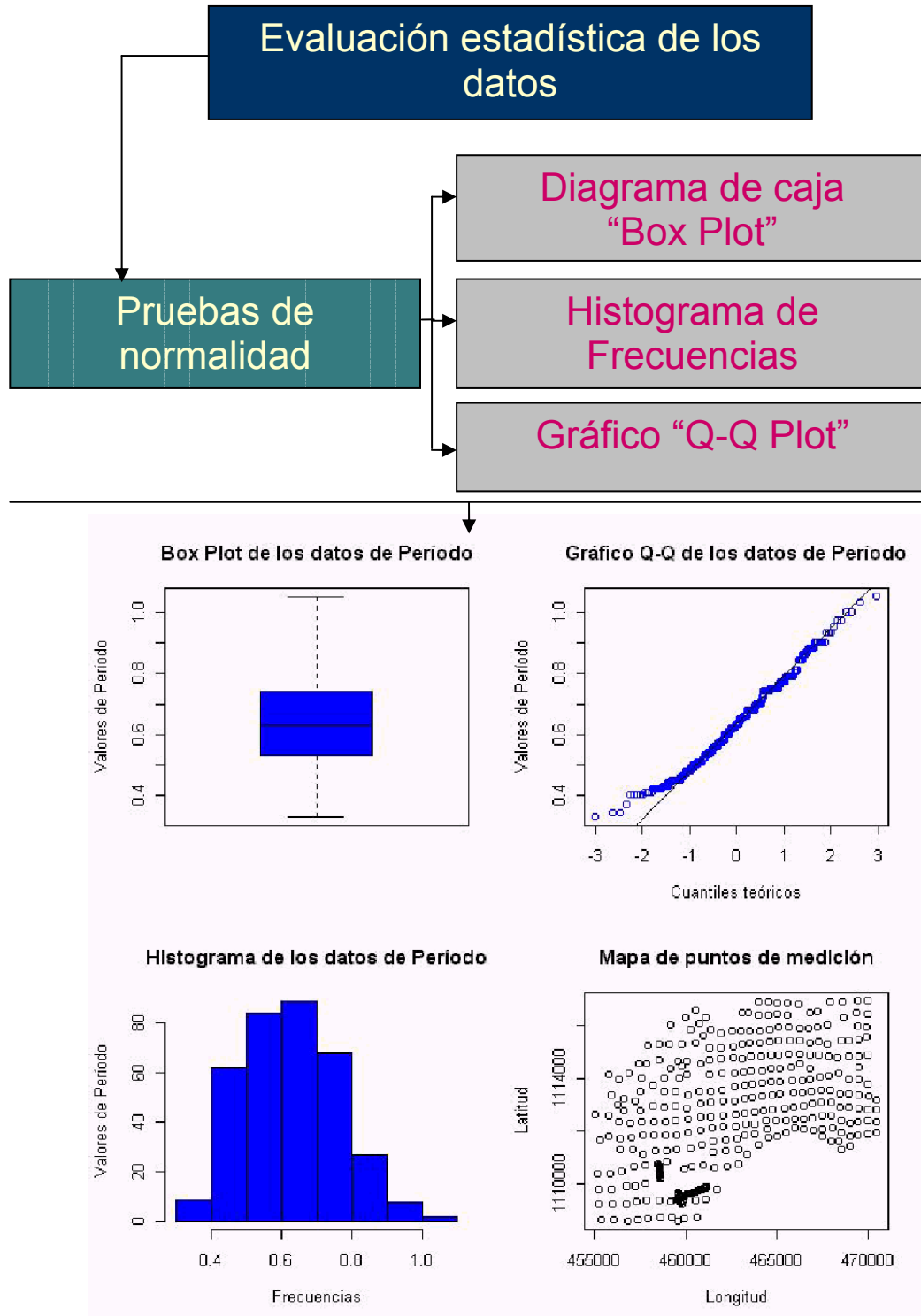


Figura 7.3 Resumen diagramático de la metodología empleada para el tratamiento estadístico de los datos gravimétricos y de Ruido Sísmico Ambiental.

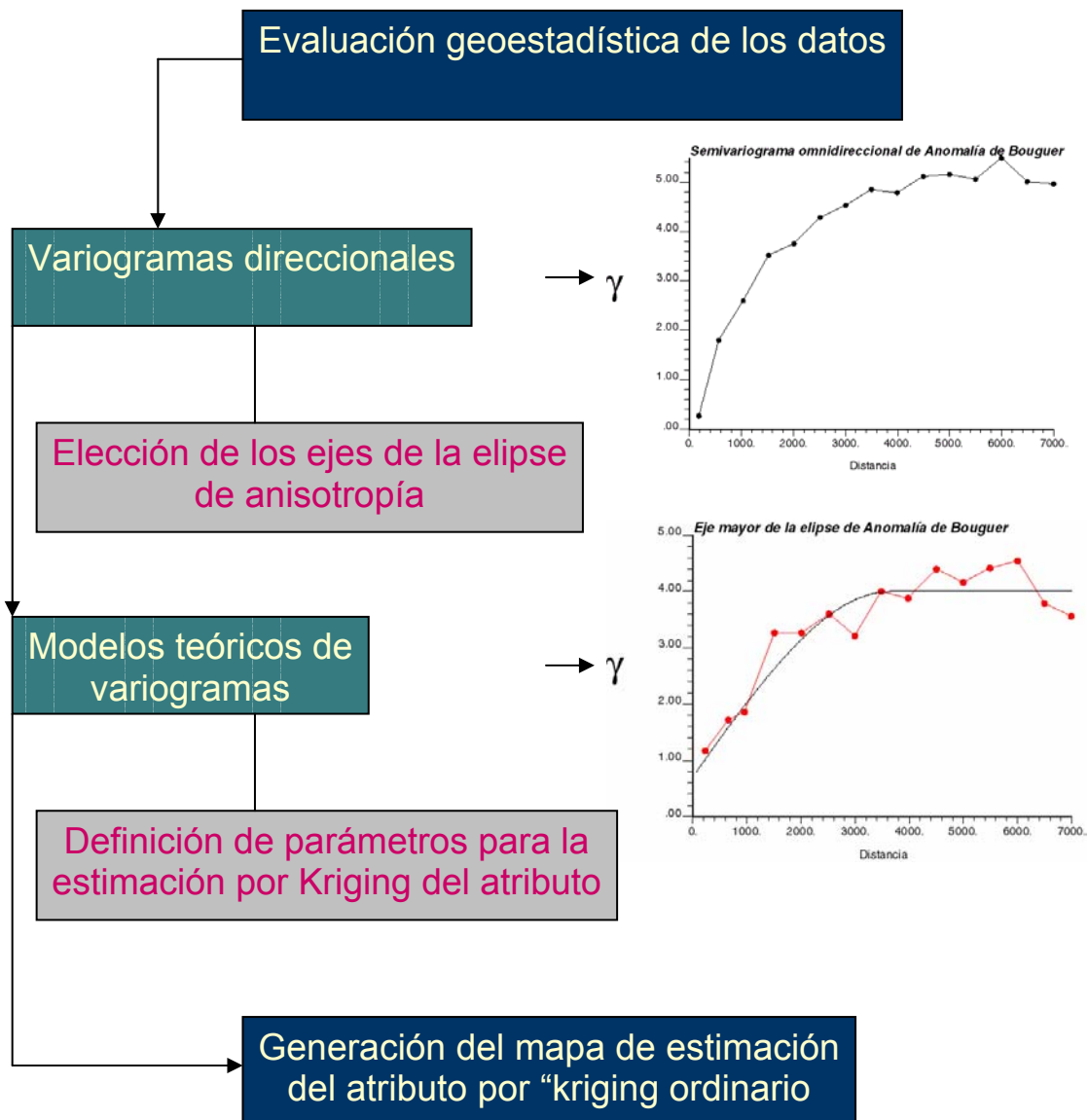


Figura 7.4 Resumen diagramático de la metodología empleada para el tratamiento geoestadístico de los datos gravimétricos y de Ruido Sísmico Ambiental.

De manera experimental, se pretendió realizar un estudio de estimación del atributo de Ruido Sísmico Ambiental a partir de los datos gravimétricos, en vista de que existe cierta correlación espacial inversa entre ambas técnicas, esto es, los valores gravimétricos disminuyen en aquellas zonas de la ciudad donde el espesor de sedimentos es mayor; tendencia contraria se observa para los datos de período, los cuales aumentan conformes al aumento del espesor de los sedimentos.

7.3 RESULTADOS

7.3.1 Análisis estadístico de los atributos

7.3.1.1 Resultados estadísticos de los datos gravimétricos

Diagrama de caja (boxplot) de los datos de Anomalia de Bouguer

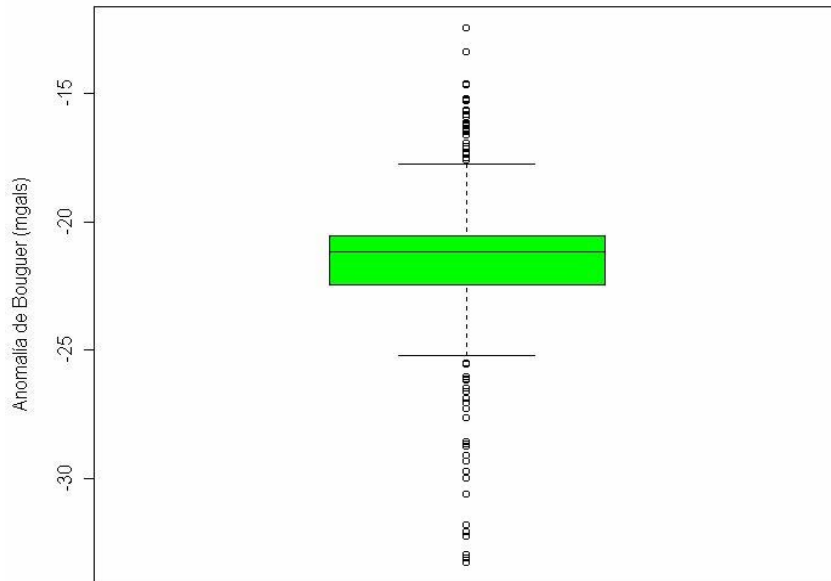


Figura 7.5 Diagrama de caja o “Box Plot” de los datos gravimétricos

Tabla 7.1 Tabla descriptiva de los datos obtenidos del diagrama de caja o “box plot”

Datos del Box Plot	AB (mgals)	% Datos por cuartil
Cuartil externo superior	-17,75	18,39
Cuartil interno superior	-20,56	
Mediana	-21,16	50
Cuartil interno inferior	-22,47	
Cuartil externo inferior	-25,21	19,04
Datos fuera de los extremos externos	57 ptos	12,33

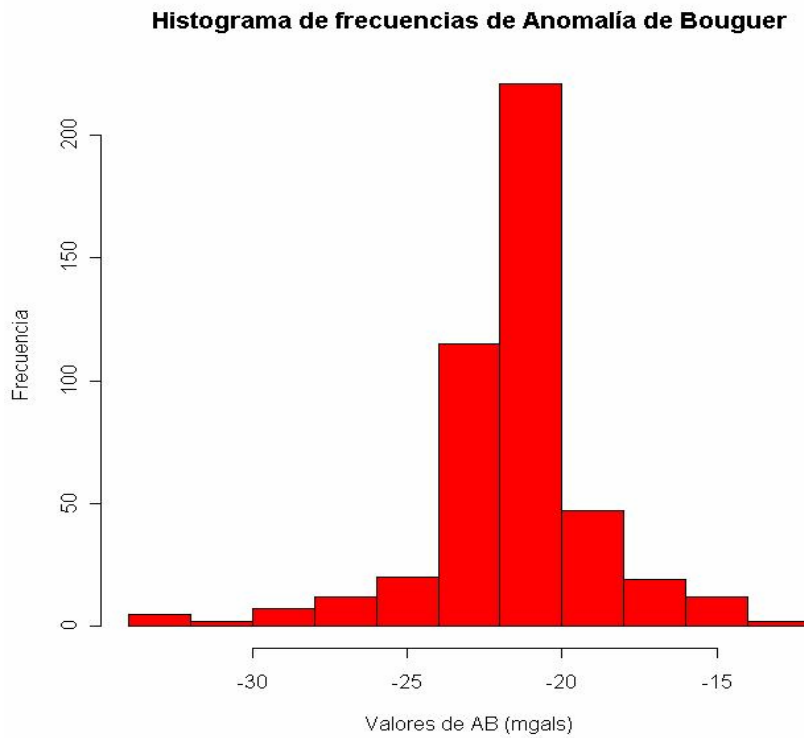


Figura 7.6 Histograma de frecuencias de los datos de Anomalía de Bouguer

Tabla 7.2 Tabla descriptiva de los datos del Histograma de Frecuencias de AB

Datos del histograma	Límites de barras (s)	# Muestras por barra
Información de barras	-34	5
	-32	2
	-30	7
	-28	12
	-26	20
	-24	115
	-22	221
	-20	47
	-18	19
	-16	12
	-14	2
	-12	

Gráfico Q-Q de normalidad de los datos de Anomalía de Bouguer

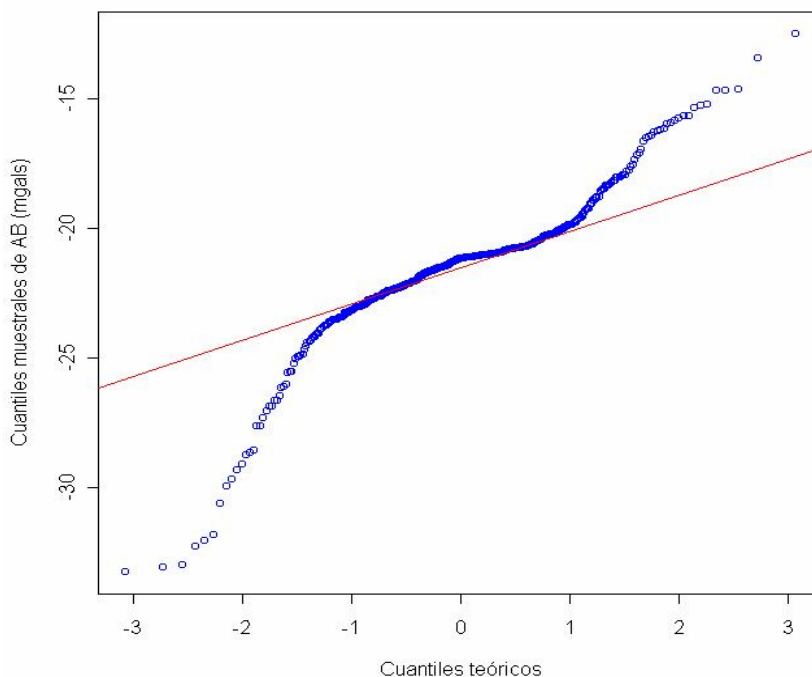


Figura 7.7 Gráfico “Q-Q plot” de los datos de Anomalía de Bouguer

De la integración de los resultados obtenidos a partir de las herramientas estadísticas aplicadas a los datos de Anomalía de Bouguer, se construyó una tabla resumida de los parámetros estadísticos más comunes.

Tabla 7.3 Resumen estadístico de los datos de Anomalía de Bouguer

Tabla descriptiva	
Media (mgals)	-21,5163
Desviación estándar	2,698782
Valor mínimo (mgals)	-33,28
Valor máximo (mgals)	-12,48
Número de datos	462

7.3.1.2 Resultados estadísticos de los datos de ruido sísmico ambiental

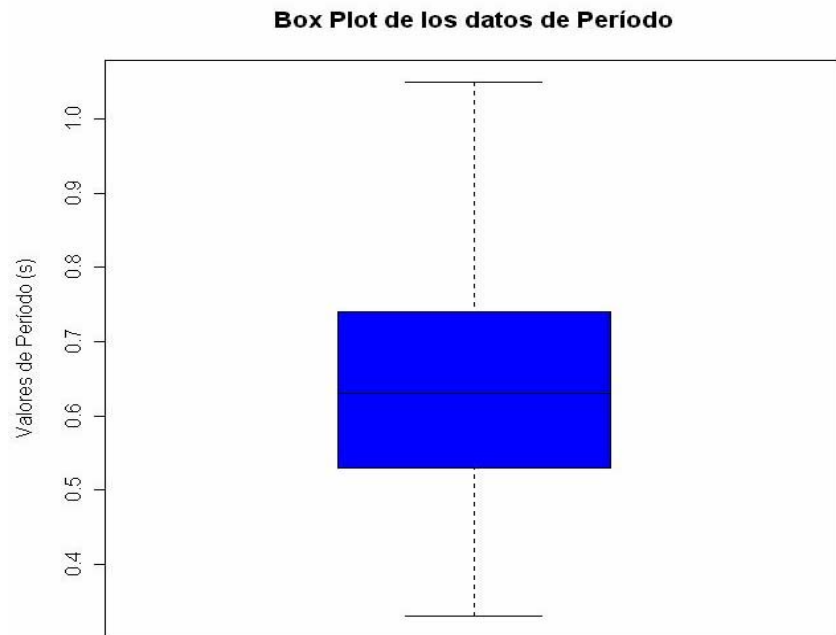


Figura 7.8 Diagrama de caja o “Box Plot” de los datos de Períodos

Tabla 7.4 Tabla descriptiva de los datos obtenidos del diagrama de caja o “box plot”

Datos del Box Plot	Período (s)	% Datos por cuartil
Cuartil externo superior	1,05	23,49
Cuartil interno superior	0,74	
Mediana	0,63	51,59
Cuartil interno inferior	0,53	
Cuartil externo inferior	0,33	24,92

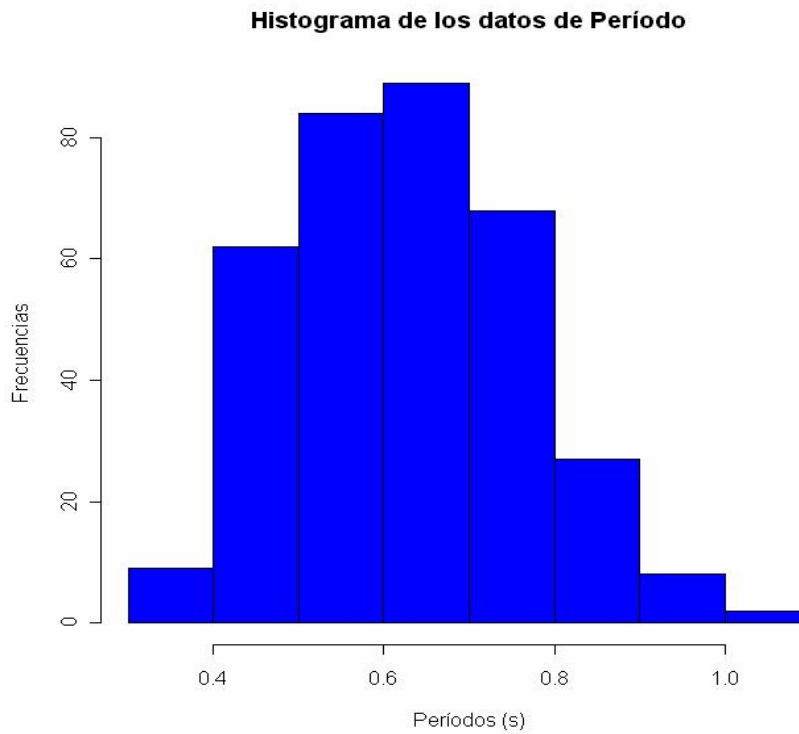


Figura 7.9 Histograma de frecuencias de los datos de Período

Tabla 7.5 Tabla descriptiva de los datos del Histograma de Frecuencias de Ruido

Datos del histograma	Límites de barras (s)	# Muestras por barra
Información de barras	0,3	9
	0,4	62
	0,5	84
	0,6	89
	0,7	68
	0,8	27
	0,9	8
	1	2
	1,1	

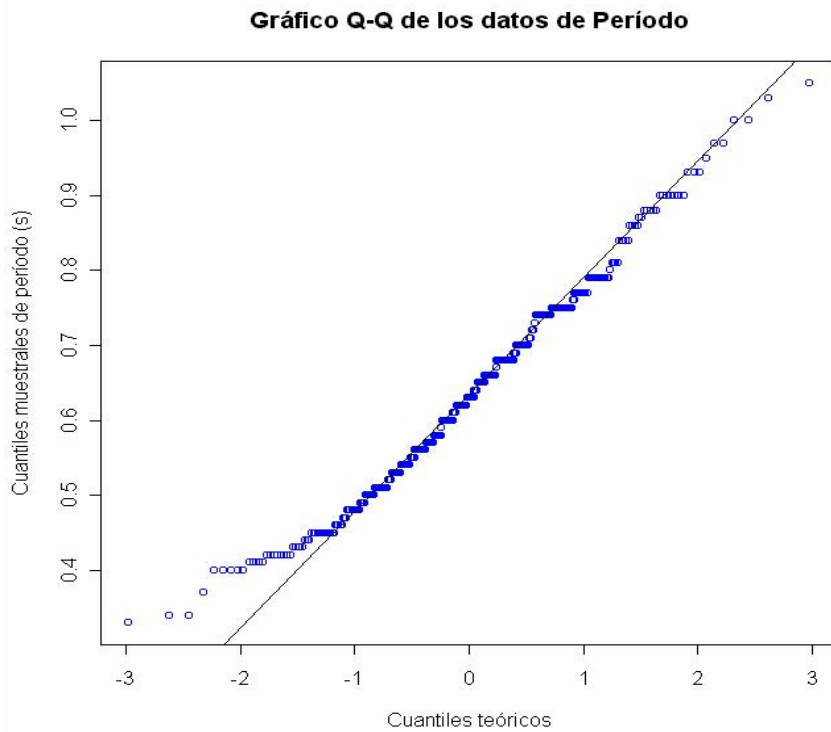


Figura 7.10 Gráfico “Q-Q plot” de los datos de Ruido Sísmico Ambiental

De la integración de los resultados obtenidos a partir de las herramientas estadísticas aplicadas a los datos de Ruido Sísmico Ambiental, se construyó la siguiente tabla resumida de los parámetros estadísticos más comunes.

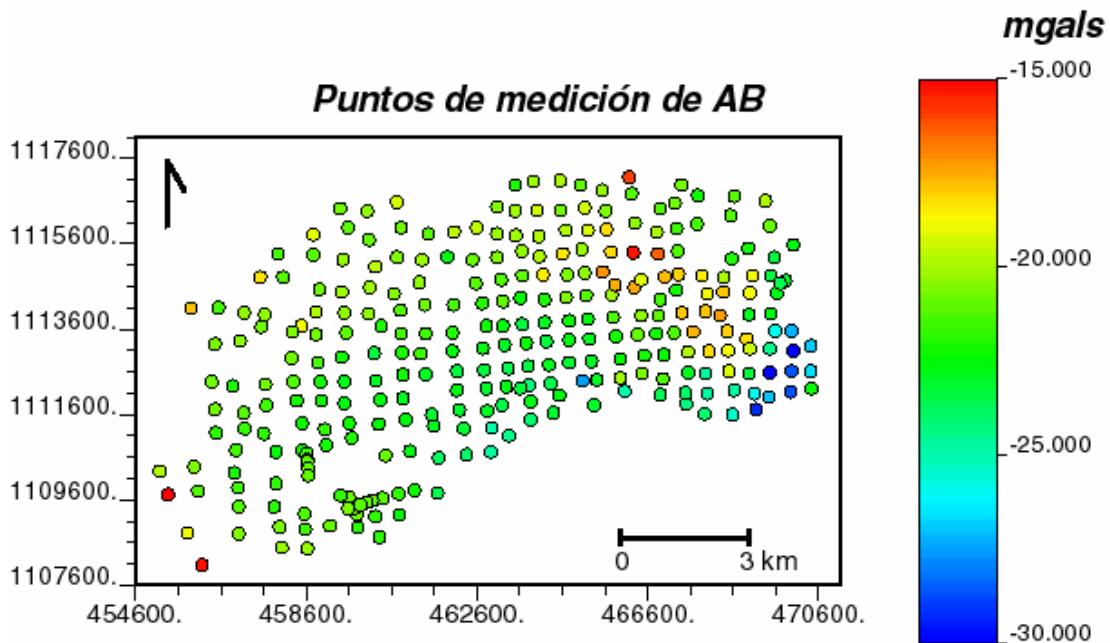
Tabla 7.6 Resumen estadístico de los datos de Período

Tabla descriptiva	
Media (s)	0,634298
Desviación estándar	0,1421687
Valor mínimo (s)	0,33
Valor máximo (s)	1,05
Número de datos	349

7.3.2 Análisis geoestadístico de los datos

La variabilidad espacial de los datos gravimétricos y de ruido sísmico fue estimada en ambos casos mediante la utilización del paquete geoestadístico GsLIB, con la generación de variogramas direccionales de los datos a fin de conocer las orientaciones de mayor y menor correlación espacial de los datos, obteniéndose con esto, los ejes de la llamada “elipse de anisotropía”. Conociendo estos parámetros, se generaron los modelos de variogramas ajustados a los datos reales, con la finalidad de establecer los parámetros adecuados para la realización de las estimaciones por “kriging ordinario” de los valores de ambas técnicas en puntos sin mediciones. Todo esto fue posible gracias a la colaboración prestada por el profesor (U.C.V.) Dr. Reinaldo González.

7.3.2.1 Resultados de la evaluación geoestadística de los datos gravimétricos



Mapa 7.1. Localización de los puntos de mediciones gravimétricas y sus valores en miligales

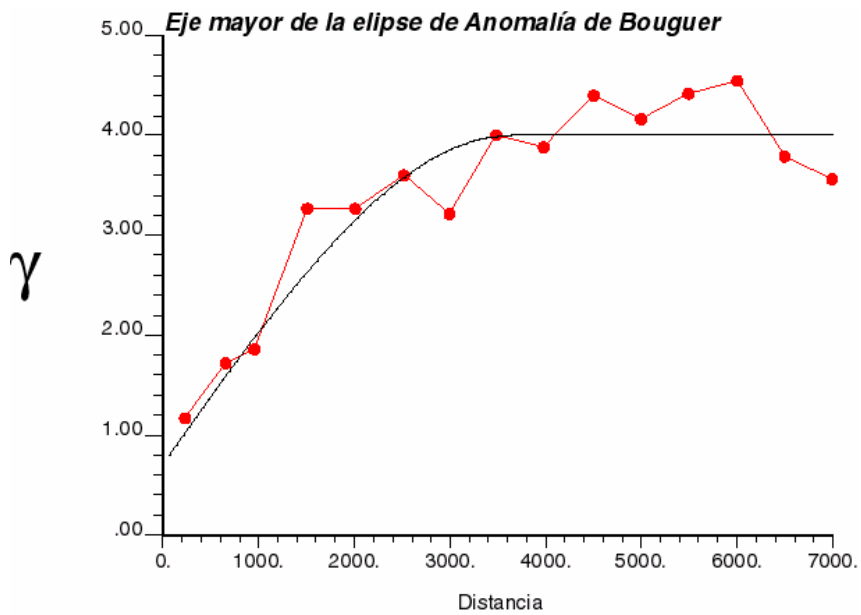


Figura 7.11 Variograma direccional (45°) de máximo rango de Anomalías de Bouguer

En la figura anterior, la línea roja representa el variograma obtenido para la dirección de estudio, la línea negra corresponde al variograma teórico generado con los parámetros de la tabla 7.7 (*idem* para la figura siguiente).

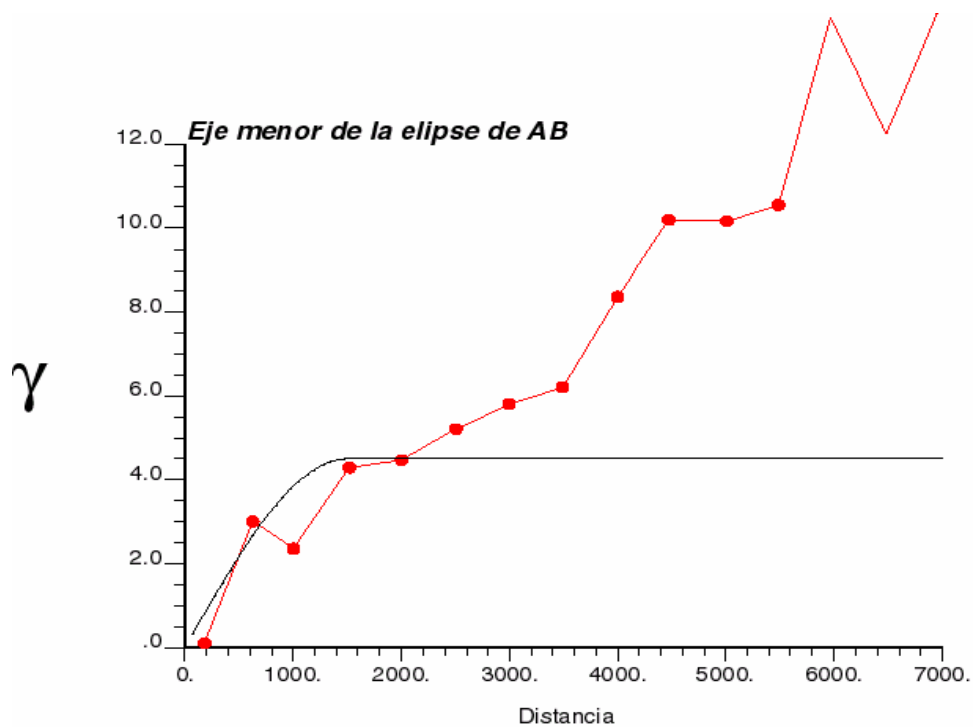
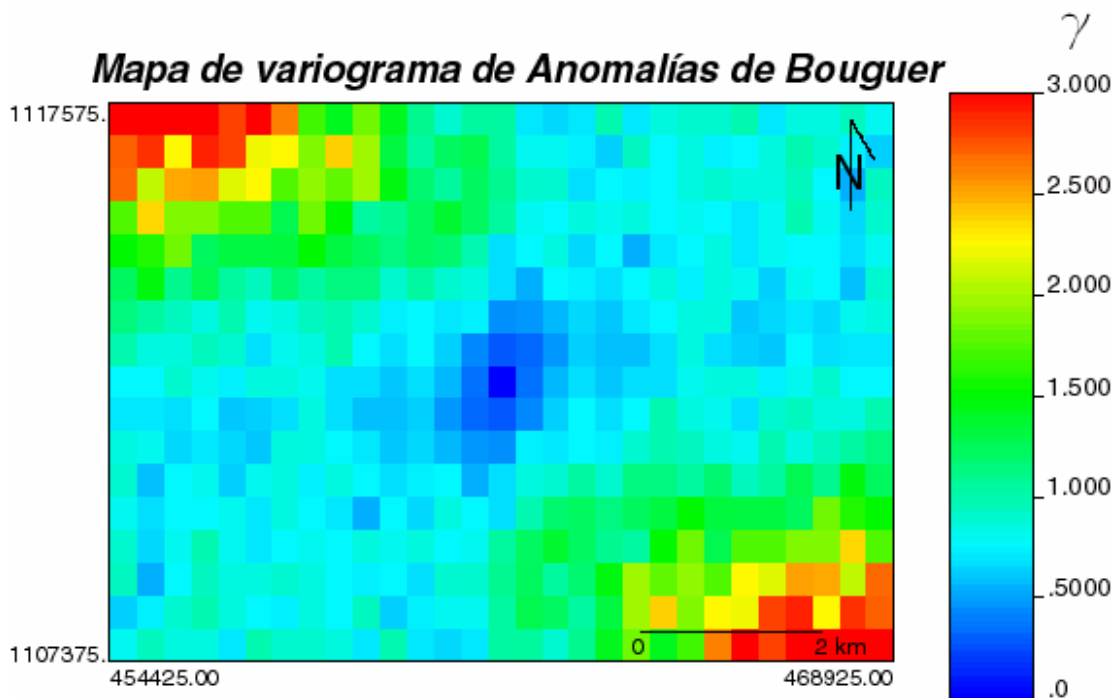


Figura 7.12 Variograma direccional (135°) de mínimo rango de Anomalías de Bouguer

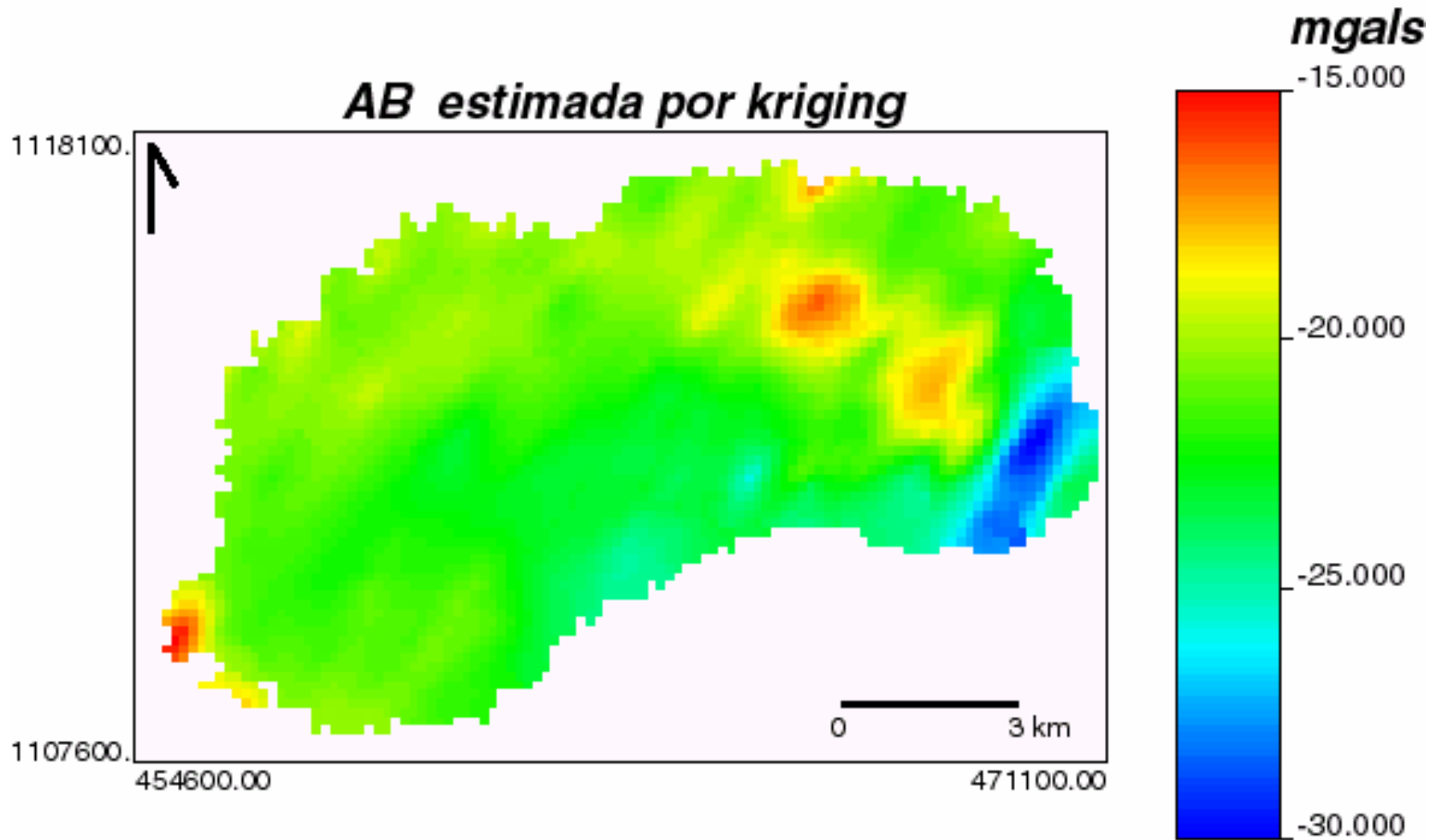
Los variogramas direccionales se construyeron con una banda de 600 metros de ancho, desplazamiento de 150 metros y tolerancia acimutal de 12,5°.

Tabla 7.7 Parámetros introducidos al programa GsLIB para la generación de los modelos teóricos de los variogramas direccionales máximo y mínimo

Variogramas direccionales de AB			
Máximo			
Dirección (°)	Rango	Meseta	Efecto pepita
45	3650	3,3	0,7
Mínimo			
Dirección (°)	Rango	Meseta	Efecto pepita
135	1500	4,5	0

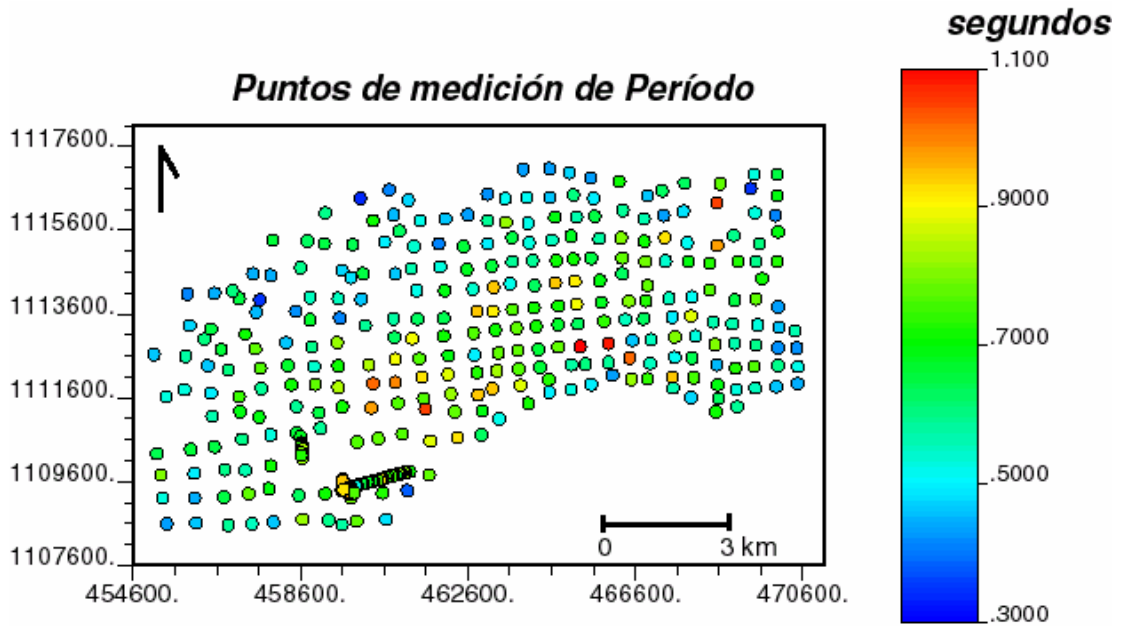


Mapa 7.2 Mapa de variograma de Anomalías de Bouguer



Mapa 7.3 Mapa de Anomalías de Bouguer estimadas por “Kriging ordinario” a través de los datos de los variogramas direccionales

7.3.2.2 Resultados de la evaluación geostatística de los datos de Período



Mapa 7.4 Localización de los puntos de mediciones de Ruido y sus valores en segundos

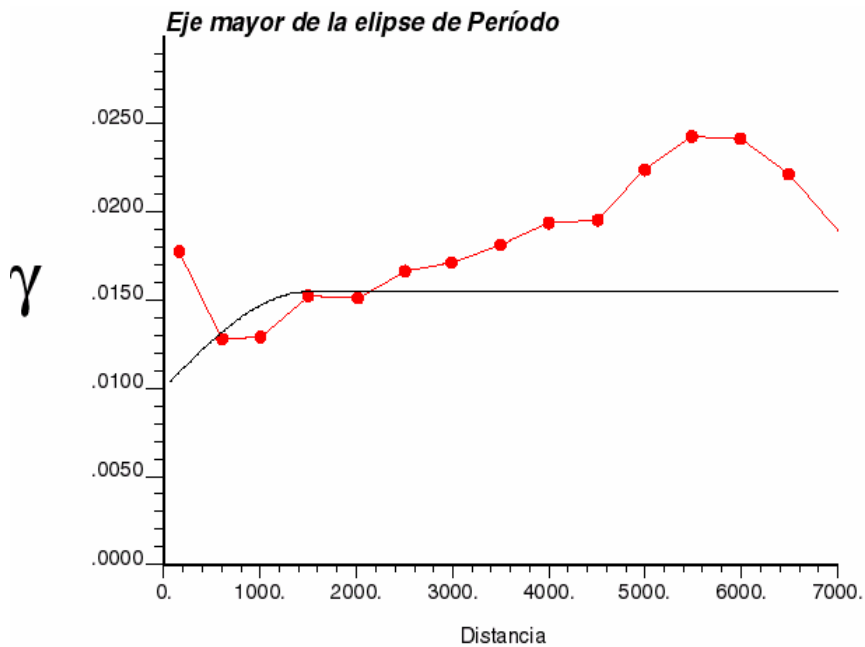


Figura 7.13 Variograma direccional (35°) de máximo rango de Ruido Sísmico

En ambos casos, la línea roja corresponde al variograma real y la línea negra representa el modelo teórico

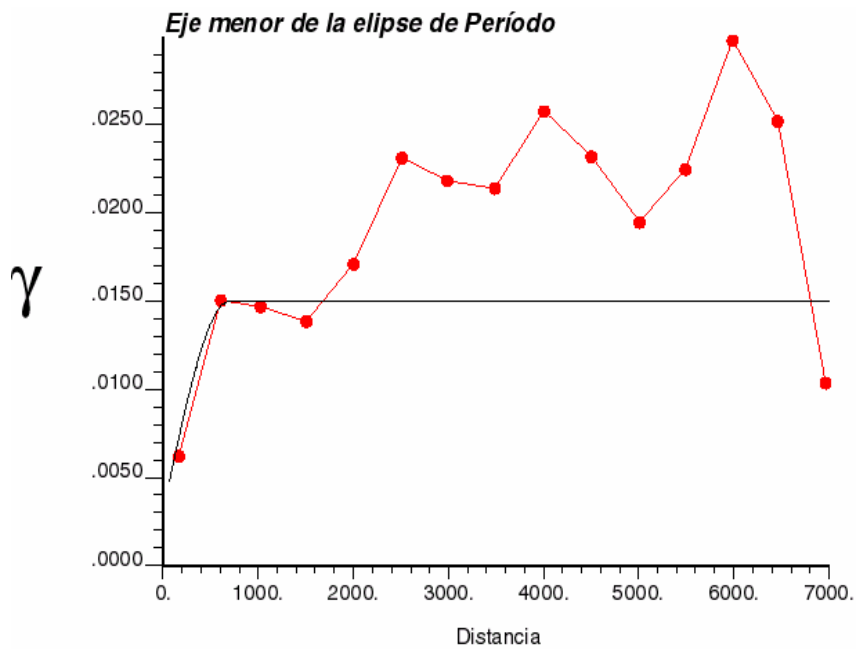
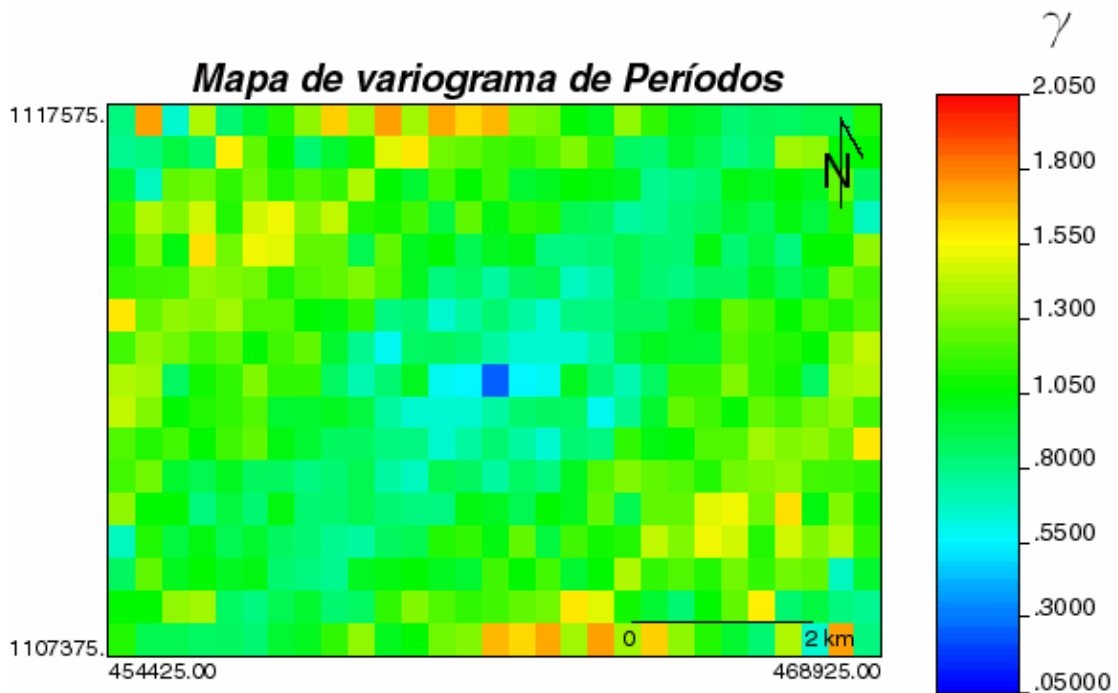


Figura 7.14 Variograma direccional (130°) de mínimo rango de Ruido Sísmico

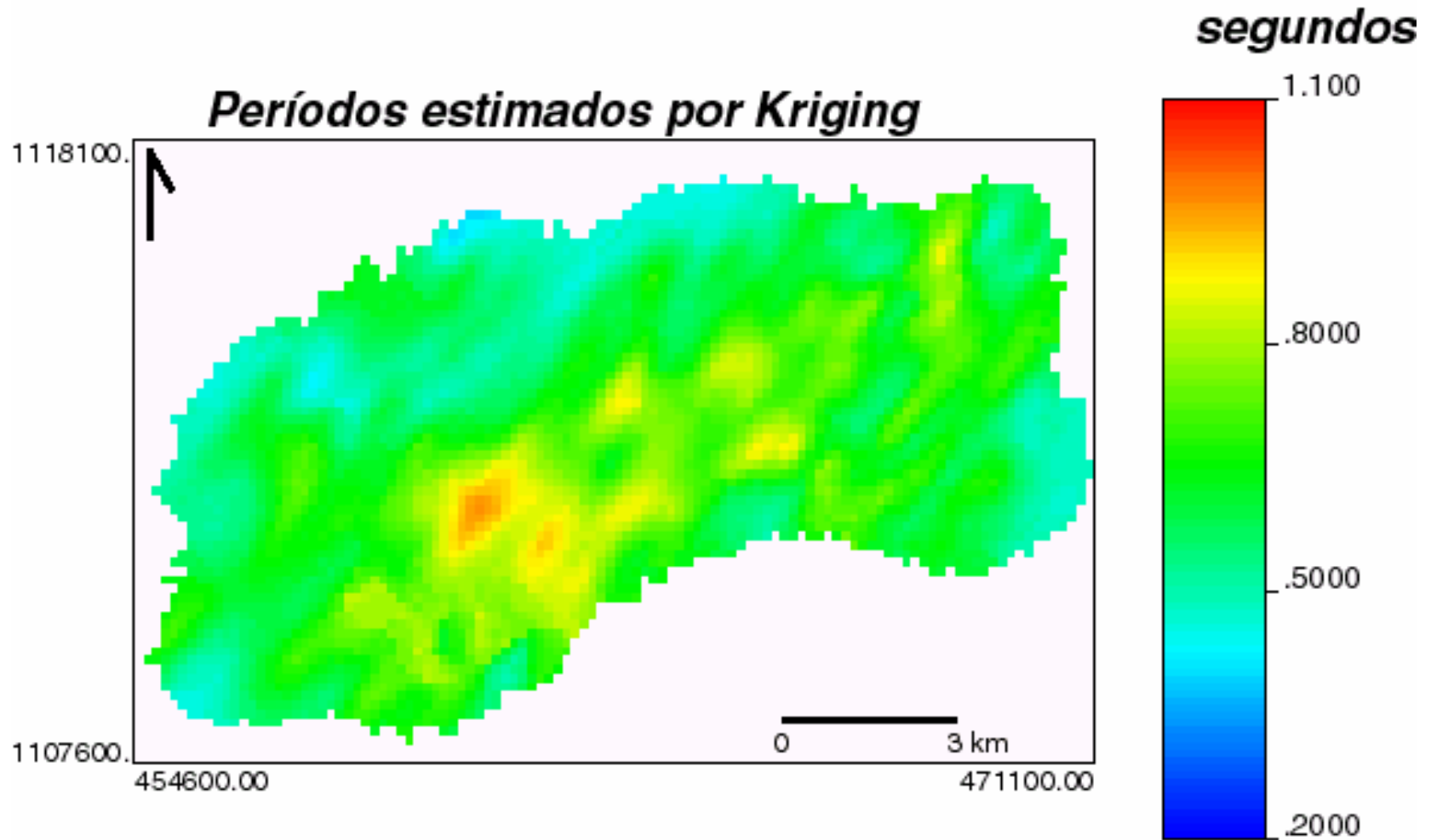
Tabla 7.8 Parámetros introducidos al programa GsLIB para la generación de los modelos teóricos de los variogramas direccionales máximo y mínimo

Variogramas direccionales de Período			
Máximo			
Dirección (°)	Rango	Meseta	Efecto pepita
35	1500	0,01	0,0055
Mínimo			
Dirección (°)	Rango	Meseta	Efecto pepita
130	700	0,012	0,0030



Mapa 7.5 Mapa de variograma de Períodos fundamentales

El mapa 7.6 corresponde a la representación de los valores de Períodos estimados por Kriging ordinario a partir de los datos proporcionados por los variogramas direccionales, así como el mapa de variograma anterior.



Mapa 7.6 Mapa de Períodos fundamentales estimados por “Kriging ordinario” a través de los datos de los variogramas direccionales

7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El diagrama de caja o “Box Plot”(Figura 7.5), muestra una alta dispersión con respecto a la mediana (-21,16 mgal) por parte de los datos gravimétricos, esto es, de los 462 datos analizados 57 mediciones se encuentran fuera de los extremos externos de dicho gráfico. Por lo tanto, cerca de un 37 % de los datos se encuentra contenido en los cuartiles externos del diagrama, y el 50 % restante corresponde a los cuartiles internos. Mientras tanto, el histograma de frecuencias de Anomalías de Bouguer (Figura 7.6) se observa simétrico con respecto al rango de -22 a -20 mgals, en el cual se encuentran contenidas 221 mediciones. Este último gráfico, apoyado del “Q-Q Plot” (Figura 7.7), en el cual las mediciones comprendidas dentro del rango de -24 a -20 mgals se ajustan a la línea teórica, permiten aseverar el comportamiento normal de los datos gravimétricos. Los valores máximo y mínimo fueron -12,48 y -33,28 mgals respectivamente y el valor correspondiente a la media fue -21,51 mgals.

En un análisis similar para los datos de Ruido Sísmico Ambiental, el diagrama de caja (Figura 7.8) no muestra valores atípicos o fuera de los extremos externos, es decir, dichos extremos externos se encuentran definidos por los valores máximo y mínimo de 1,05 y 0,33 segundos respectivamente. El histograma de frecuencias para este atributo (Figura 7.9) se observa con menos simetría que el anterior, de hecho, existen cuatro rangos o barras dentro de las cuales se concentra la mayor parte de los datos, mostrándose además con sesgadura positiva o “cola hacia la derecha”. Los datos de período se ajustan casi en su totalidad a la línea teórica del gráfico “Q-Q” (Figura 7.10), por lo que la normalidad de este grupo de datos se encuentra igualmente evidenciada a través de estas últimas dos herramientas.

Los variogramas direccionales generados para los datos de Anomalías de Bouguer, mostraron que el acimut de mayor rango o correlación espacial es aproximadamente 45° , siendo éste 3650 metros, por lo que en el modelo teórico del variograma (Figura 7.11) se introdujo este último parámetro más la meseta con $\gamma = 3,3$ y efecto pepita con $\gamma = 0,7$. El modelo para la dirección perpendicular (Figura 7.12) posee un rango de 1500 metros, sin efecto pepita y la meseta con $\gamma = 4,5$. Al

generar el mapa de variograma de este atributo (Mapa 7.2), se corrobora lo antes descrito, en la dirección aproximada de 40° se observan continuamente la tendencia de los valores de γ entre 0,3 y 1, esto quiere decir que los variogramas con esta orientación crecen lentamente, presentando rangos más altos permitiendo la formación de mesetas bien diferenciadas, mientras que en la dirección perpendicular, los variogramas crecen rápida y continuamente con respecto a la primera. Esto último puede observarse por el paso en la dirección 135° de valores cercanos a 0 a valores cercanos a 1 (colores azules y verdes) luego superiores a $\gamma = 2$ (amarillos) y finalmente, a los valores máximos cercanos y superiores a tres (colores rojos). Esto último significa que los variogramas con esta orientación no poseen una meseta definida y los rangos son menores.

La dirección de mayor correlación espacial para el atributo de Ruido Sísmico Ambiental resultó 35° aproximadamente, cuyo modelo teórico de variograma (Figura 7.13) se generó con un rango de 1500 metros, la meseta con $\gamma = 0,01$ y el efecto pepita $\gamma = 0,0055$. La dirección de menor correlación (Figura 7.14) posee un rango de 700 metros, y la meseta se estimó en $\gamma = 0,01$ aunque no lo represente el gráfico, ya que la poca correlación espacial del atributo en esta orientación, en ocasiones genera impresiones erróneas acerca del comportamiento del variograma. El mapa de variograma de este último atributo (Figura 7.5) se observa similar al correspondiente de los datos de Anomalías de Bouguer; el acimut de mayor crecimiento de los variogramas es corroborada por este mapa en la orientación aproximada 40° (colores azul claro y verde) con valores comprendidos en el intervalo 0,55-0,8 siendo, como es de esperar, la dirección perpendicular la que muestra el crecimiento acelerado y continuo de los variogramas, con valores que parten desde el γ mínimo, hasta valores superiores a $\gamma = 2$.

El mapa de estimación de Anomalías de Bouguer (Mapa 7.3) muestra una zona pronunciada de valores bajos cercanos a -30 mgals justo en el extremo sureste. En la zona centro sur de la ciudad y más aún en el límite de la terraza se observan valores Anomalías de Bouguer cercanos a -25 mgals, corroborando el aumento del

espesor sedimentario hacia esta región. El mapa de períodos (Mapa 7.6), por el contrario, muestra en esta última localización valores mayores a 0,8 segundos, manteniéndose con estas características en la región central de la ciudad. Hacia el borde norte, los colores verdes y amarillos en el mapa de Anomalías de Bouguer corresponden a valores cercanos o mayores a -20 mgals y los valores de Períodos se presentan inferiores a 0,5 segundos.

Se esperaba que la relación inversa planteada para ambos atributos resultara mucho más evidente en los mapas de Kriging ordinario, de manera que no se consideró apropiado en este experimento, estimar un atributo a partir de los datos del otro mediante Cokriging. No obstante, la existencia de esta relación es cierta y podría ser estudiada con más detalle bajo condiciones más apropiadas como por ejemplo, en levantamientos con menor espaciamiento entre estaciones de los atributos, así como zonas donde la variabilidad de los espesores sedimentarios sea más uniforme, etc.

CAPÍTULO VIII

INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS

8.1 ANÁLISIS INTEGRADO DE RESULTADOS

Del modelado sísmico 2D de los tendidos adquiridos en el Aeropuerto de Barquisimeto y la Base Aérea Militar, se establecieron tres capas principales para la configuración general del subsuelo de la ciudad, más una primera capa de poco espesor y de bajas velocidades compuesta de sedimentos no compactados. A partir de 5 a 10 metros de profundidad se observa en los perfiles del Aeropuerto una capa de velocidades P y S cercanos a 1400 y 950 m/s respectivamente, cuyo límite con la capa subyacente se observa en 60 metros de profundidad en el punto de coordenadas E 459.719 N 1.109.445, en el cual se cruzan el perfil N-S y el perfil principal del Aeropuerto, y 80 metros de profundidad en el extremo este del perfil principal. Este cambio litológico se observa en el perfil de la Base Aérea Militar a una profundidad cercana a los 40 metros. Dicho límite se ha considerado como el contacto entre la terraza aluvial y el basamento rocoso de la Formación Barquisimeto.

La siguiente capa litológica posee velocidad en el Aeropuerto de 2400 m/s para las ondas P y 1250 m/s para las S, el cambio de velocidades correspondiente a la tercera capa se observó cercano a los 155 metros de profundidad. En la Base Aérea Militar este último cambio litológico se observa entre 90 y 100 metros, con velocidades P y S en la capa suprayacente de 2150 y 950 m/s respectivamente. La capa subyacente en ambos casos posee valores de velocidad de ondas P superiores a los 3000 m/s y no fue posible identificarla en el análisis de ondas S. Sin embargo, esta capa no es considerada como un contacto litológico, ya que el contacto de la terraza con la Formación Barquisimeto se encuentra definido en la interface anteriormente definida, por lo que la profundidad indicada se encuentra dentro de la formación rocosa. Interpretándose entonces como la parte de la Formación Barquisimeto que no ha sido afectada por la meteorización debida a la capa freática.

Las velocidades promedio de ondas S de los primeros 30 metros de profundidad de la terraza, se observan entre 700 y 850 m/s en el área del Aeropuerto y la Base Aérea Militar. En el área central de la ciudad se observan valores de velocidades Vs30 dentro del rango de 500 a 600 m/s.

Los valores de Anomalías de Bouguer de la región centro-sur de la ciudad se encuentran en el rango -23 a -29 mgals. Mientras tanto, los datos de períodos en esta área, corresponden a los valores máximos del grupo entero de datos. Se observó un rango de 0,7 segundos a valores mayores a 1 segundo en dicha región, evidenciando el aumento del espesor de la terraza hacia esta región.

Considerando la validez de la relación período/espesor de sedimentos establecida por Rocabado (2000) para los sedimentos de la ciudad de Caracas, se ha utilizado la misma como apoyo en la estimación de los espesores de la terraza. En dicha correlación, Rocabado (2000) asigna un rango de espesores entre 70 y 150 metros para valores de períodos entre 0,7 y 1,2 segundos, lo cual concuerda con la descripción de Giraldo (1985) para los sedimentos Q₃, y además, con los datos de sísmica de refracción en el extremo este del perfil principal, donde se observa un cambio litológico cercano a los 80 metros de profundidad.

Los valores de período del aeropuerto oscilan entre 0,5 y 0,95 segundos, observándose en línea general, menores a los valores de la zona justo al norte de dicho aeropuerto.

Hacia la parte nororiental de la ciudad se observan valores de anomalías de Bouguer y período cercanos a -19 mgals y 0,55 segundos respectivamente. Al suroeste del aeropuerto (extremo sur-occidental) se encuentran los mayores valores de anomalía de Bouguer, cercanos a -15 mgals y acompañados de bajos valores de período en el orden de 0,45-0,55 segundos.

El valor de Anomalía de Bouguer más bajo (-33,28 mgals) se ubica en el punto de coordenadas E 471.462 N 1.110.428 en la vía hacia Cabudare y no es representado en el mapa de contornos. El mismo puede ser atribuido a la parte más profunda de la estructura descrita por Giraldo y Audemard (1997): el "pull-appart" de Cabudare. Hacia esta zona no han sido adquiridos datos de Período.

La sección geológica construida en este proyecto (Fig 2.2), se creó como apoyo para la generación de los modelos gravimétricos anteriormente descritos. La misma se basa en el modelo de napas con que los autores Bellizzia y Rodríguez (1968), Stephan (1982) y Skerlek (1979), describen el marco geodinámico de la región.

La Cuenca de Tracción de Cabudare, según el modelo gravimétrico N60W (Fig. 6.4), posee más de 400 de espesor de sedimentos en su parte más profunda, y su basamento rocoso corresponde a la Formación Mamey, compuesta de esquistos de edad Cretácico inferior y cuya densidad se estimó en $2,71 \text{ gr/cm}^3$. La Falla de Boconó constituye el contacto entre el último conjunto litológico mencionado y la Formación Barquisimeto, la cual se compone de rocas lutíticas con metamorfismo de muy bajo grado (Bellizzia y Rodríguez, 1967), por lo que su densidad se estimó en 2.67 gr/cm^3 . La Formación Barquisimeto constituye el basamento rocoso de la terraza cuaternaria de Barquisimeto. En el perfil N-S se observa un cuerpo alóctono perteneciente al conjunto Matatere II descrito por Stephan (1982), al cual se le ha asignado una densidad de $2,69 \text{ gr/cm}^3$. Más al norte, la Formación Barquisimeto se encuentra en contacto de falla inversa con la Formación Carorita, la cual, al ser ésta un conjunto rocoso alóctono de la Formación Mamey, se estimó su densidad con el mismo valor de la última. En los perfiles gravimétricos 6.3 y 6.4, de las unidades cuaternarias sólo se representan los sedimentos Q_1 y Q_3 . Los primeros se ubican en las trazas de la Quebrada La Ruezga y el Río Turbio, al ser éstos los más jóvenes con densidad $1,8 \text{ gr/cm}^3$. Los sedimentos Q_3 constituyen la terraza de Barquisimeto y su densidad se estimó en 2 gr/cm^3 .

Los sedimentos de la terraza de Barquisimeto se componen según los datos geotécnicos, de materiales arcillosos en las zonas de menor espesor. El manto rocoso o rocas de la Formación Barquisimeto, es reportado a profundidades poco mayores a los 10 metros por las perforaciones geotécnicas de los perfiles 4.6 y 4.7, ubicadas en el lado este de la ciudad. En esta zona predominan los materiales de granularidad arcillosa, por lo general con más de 80% de contenido de arcillas y limos según las

muestras de suelo analizadas en los ensayos geotécnicos. Hacia el oeste de la ciudad, los materiales de la terraza van haciéndose más granulares, se conforma básicamente por materiales arenosos-gravosos, y los índices N_{SPT} para los suelos aquí presentes se muestran superiores a los 80 golpes. Mientras que en las perforaciones del lado este, los altos valores de N_{SPT} registrados corresponden a profundidades donde las descripciones litológicas de los mismos mencionan lutitas con buenas evidencias de estratificación.

De los diagramas de caja generados en el análisis estadístico para los datos de Anomalías de Bouguer y Períodos, el correspondiente al primer atributo (Fig. 7.5) señaló una alta dispersión de los datos con respecto a la mediana, mientras que el de Período (Fig. 7.8), se encontraba limitado en sus extremos por los valores máximo y mínimo del grupo de datos. Ambos atributos evidenciaron comportamientos normales por la simetría de los histogramas de frecuencias y gráficos “Q-Q” (Fig. 7.7 para los datos gravimétricos y Fig. 7.10 para los datos de ruido). Específicamente, 221 mediciones gravimétricas de las 462 analizadas, se concentran según el histograma (Fig. 7.6) dentro del intervalo -22 a -20 mgals, y los datos de período se concentran en 4 barras del histograma (Fig. 7.9), con menos simetría y sesgadura positiva.

En cuanto al análisis geoestadístico, tanto los datos gravimétricos como los de ruido ambiental mostraron el acimut 40° como la dirección de mayor correlación espacial. En los mapas de variograma (Mapa 7.2 para los datos gravimétricos y Mapa 7.5 para los datos de ruido), la dirección señalada muestra un crecimiento definido de los variogramas de ambos atributos y por ende, rangos más altos. Mientras que en la orientación perpendicular, los variogramas tienden a crecer indefinidamente o mostrando comportamientos que pueden generar confusiones en la identificación de sus parámetros principales. Los mapas de estimación de los atributos por Kriging ordinario corroboran la hipótesis de la correspondencia inversa entre los mismos. En la zona centro sur de la terraza, el mapa de anomalías de Bouguer (Mapa 7.3) muestra bajos valores, mientras que en el de Períodos (Mapa 7.5), los valores aumentan. Pero dicha correlación no se mostró lo suficientemente definida como para utilizar la herramienta de Cokriging para estimar un atributo a partir del otro.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los perfiles sísmicos del aeropuerto y la base aérea militar mostraron tres capas principales en los modelos sísmicos 2D (mas una primera capa delgada de bajas velocidades):

- Para la primera capa se obtuvo un rango de 1250-1400 m/s para las velocidades de onda P. La onda S en la misma capa presentó un rango de velocidades de 750 a 950 m/s.
- Esta capa posee su límite con la capa subyacente a 40 metros de profundidad en el perfil de la base aérea. En el punto de intersección del perfil principal o E-W con el perpendicular, dicha interface se observó en 60 metros de profundidad. Mientras tanto, hacia el extremo este, la profundidad de la terraza se estimó en 80 metros para este perfil.
- Estos valores de profundidad concuerdan con el rango de espesores sedimentarios asignados por Rocabado (2000) para valores de período cercanos a 0,7 segundos en los sedimentos del Valle de Caracas. Por lo tanto, las profundidades anteriormente señaladas constituyen el contacto entre la terraza aluvial y el basamento rocoso de la Formación Barquisimeto.

En la zona centro-sur de la ciudad, se registraron los valores de período más altos de todo el grupo de datos, en concordancia además, con la tendencia de los valores gravimétricos a decrecer en esta región. Esto permite observar una correlación inversa entre los datos de ruido sísmico ambiental y los datos gravimétricos:

- Los valores gravimétricos en la zona centro-sur de la ciudad (justo al norte del aeropuerto) oscilan en el rango -23 a -29 mgals, en correspondencia con los máximos valores de períodos registrados en el orden de 0,7 a 1 segundo. Por lo tanto, esta es la zona de mayor espesor de la terraza aluvial.
- En los modelos gravimétricos, la Formación Barquisimeto constituye el basamento rocoso de la ciudad, con una densidad estimada en $2,67 \text{ gr/cm}^3$, y

una velocidad de onda P en el rango de 2150-2400 m/s y de onda S 950-1.250 m/s, dichos valores de velocidades corresponden a la segunda capa de los modelos sísmicos 2D, la cual comienza a partir de los límites litológicos mencionados (60-80 metros).

- En los disparos de onda P se identificó una tercera interface litológica, a profundidades entre 90 y 100 metros en la base aérea, y cercanas a 155 metros en el aeropuerto con velocidades superiores a 3000 m/s. Este cambio de velocidades corresponde a la sección de la Formación Barquisimeto que no se encuentra afectada por la meteorización debida a la capa freática y no puede ser representado en los modelos gravimétricos ya que no se tiene información suficiente acerca de la distribución de dicho espesor, así como de valores precisos de densidades.

Por la actividad mencionada de la falla de Boconó, debido a su cercanía con respecto a la ciudad de Barquisimeto, se ha clasificado a esta región como Zona 5 sobre 7 con un valor de aceleración de 0,25 g, en cuanto al riesgo sísmico que presenta según la norma COVENIN 1756-98 de edificaciones sismorresistentes.

Los sedimentos de la terraza aluvial de Barquisimeto han sido descritos según Giraldo (1985) como materiales conglomeráticos en las partes de grandes espesores, tal como es el caso de la región oeste de la ciudad. La composición predominante en las zonas de poca profundidad de la terraza la constituyen materiales arcillosos provenientes directamente de la descomposición de las lutitas filíticas pertenecientes a la Formación Barquisimeto.

El acimut de mayor correlación espacial de los datos gravimétricos y de ruido sísmico, corresponde a la dirección 45°. Los mapas de Kriging ordinario evidencian la correspondencia inversa entre ambas técnicas, observándose altos valores de Período y bajos valores de Anomalías de Bouguer en la zona centro-sur de la ciudad, así como tendencias contrarias hacia el norte.

Se sugiere realizar tendidos sísmicos para ondas S en diversos puntos de la ciudad, a fin de crear un mapa de velocidades V_{s30} más completo y preciso que permita realizar una caracterización adecuada del subsuelo de la ciudad. Así como para el modelado dinámico de la terraza, el cual se encuentra actualmente en desarrollo por el Ing. Jorge Gonzalez (FUNVISIS) como parte del proyecto de microzonificación sísmica de la región.

Debe hacerse un estudio gravimétrico detallado y de ruido sísmico ambiental en la zona de Cabudare ya que, al igual que Barquisimeto, esta región presenta un gran espesor de sedimentos y se encuentra directamente afectada por el conjunto de fallas localizadas en las cercanías de dichas localidades.

La existencia de la relación de correspondencia inversa entre los atributos de Anomalía de Bouguer y Período es cierta aunque no estrictamente lineal, ya que los datos gravimétricos se ven más afectados por efectos regionales mientras que los de Ruido Sísmico dependen mucho más de los efectos de sitio. Por lo tanto, esta relación puede ser estudiada con más detalle; bajo el hecho de que el rango de máxima correlación espacial de los datos de Anomalías de Bouguer es aproximadamente 3500 metros, y el rango de los datos de Período se acerca a la mitad, podría densificarse el mallado de estaciones de ruido sísmico con un espaciamiento de 250 metros entre estaciones como ensayo para aumentar dicha correlación espacial, y nuevamente estudiar la correspondencia entre ambos atributos.

BIBLIOGRAFÍA

Atlas de Venezuela en línea - Educación, geografía, Folklore (1999). Cartografía Nacional. Ediciones Multimedia.

Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?. Manuscript for proc. Of 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, Japan, 1-3.

Bechtold, M. (2004). Mapa geológico digital de Barquisimeto y alrededores con énfasis cuaternario. Informe inédito. FUNVISIS.

Bellizzia G., A. y D. Rodríguez G. (1966). Guía de la excursión a la región de Duaca-Barquisimeto-Bobare. Asoc. Ven. Geol., Min. y Petrol., Guía de excursión N°4, 23pp. Reimpreso (1967) en Bol. Geol., Caracas, 8 (16): 289-309.

Bellizzia G., A. y D. Rodríguez G. (1968). Consideraciones sobre la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo. Bol. Geol., Caracas, 9 (18): 515-563.

Berry, P. y D. Reid (1997). Mecánica de suelos. Edit. McGraw-Hill, Colombia, 415p.

Beltrán, C. (1993). Mapa Neotectónico de Venezuela. Escala 1:2.000.000. FUNVISIS, Departamento de Ciencias de la Tierra. Mapa neotectónico

Bushman, J. R. (1958). Geology of the Barquisimeto area, Venezuela. Tesis doctoral mimeografiada. Dept. Geol., Univ de Princeton, 169p.

Bushman, J. R. (1959). Geology of the Barquisimeto area. A summary report. *Asoc. Venez. Geol., Min. y Petrol.*, Bol. Inform., 2(4): 65-84.

Bushman, J. R. (1964). Geología del área de Barquisimeto, Venezuela. *Bol. Geol.*, Caracas, 6(11): 3-111.

Campos V., S. Osuna, y V. Guédez, (1979). Geología de la Serranía de Portuguesa, Estados Portuguesa y Lara. *Bol. Geol.*, 13(25): 3-49

Casas-Sainz, Antonio M. (1992). A neotectonic model for the northern sector of the Bocono fault (southern boundary of the Caribbean plate, Venezuela). 13th Caribbean Geological Conference. Pinar del Río, Cuba. 1-19.

Casas-Sainz, A. M. y H. Diederix (1992). El valle de Yaracuy (límite S de la placa Caribe, Venezuela): Ejemplo de una cuenca cuaternaria asociada a una curvatura de falla. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología, Salamanca, 4: 269-274. España.

Cantos, F. (1969). Tratado de Geofísica Aplicada. Instituto Geológico de España. Madrid, España, 505 p.

Coronel, G. y O. Renz (1960). Deslizamientos submarinos al noroeste de Barquisimeto, Estado Lara. Cong. Geol. Venez. III, Caracas, 1959, Mem., t. II, p. 743-759.

COVENIN (1998). Norma 1756-98. Edificaciones sismo-resistentes. Fondonorma, Caracas, 113p.

De Marco, P. (2002). Determinación de la forma tipificada del terreno de acuerdo a la norma venezolana COVENIN 1756-98. XVI Seminario Venezolano de Geotecnia, SVDG, Caracas, 363:374, Venezuela.

Decourt, L., T. Muromanchi, I. K. Nixon, J. H. Schertmann, S. Thorburn, E. Zolkov (1988). "Standard Penetration Test (SPT): International Reference Test Procedure," *Penetration Testing* 1988, J. DeRuiter, Ed., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 3-26.

Dobrin, M. (1961). *Introducción a la Prospección Geofísica*. Ediciones Omega. Barcelona, España, 485 p.

Dobrin, M. B. y C.H. Savit (1988). *Introduction to geophysical prospecting*. Mc Graw- Hill Book Company. New York, p 750.

Giraldo, C. (1985). *Neotectonique et sismotectonique de la region d'El Tocuyo-San Felipe (Vénézuéla centro-occidental)*. Tesis doctoral. Universite des Sciences et Techniques du Languedoc, Languedoc, Francia.

Giraldo, C y F. Audemard (1997). *The traction basin of Cabudare, west-central Venezuela (La Cuenca de Tracción de Cabudare, Venezuela centro-occidental)*. VIII Congreso Geológico Venezolano, Porlamar, 1: 351-357.

Griem-Klee, S (2003). *Apuntes compilados por Susanne Griem-Klee*. Universidad de Acatama, Departamento de Minas, Copiapó, Chile. [Documento en línea], disponible: <http://plata.uda.cl>, [Consulta: 2003, Mayo 16].

Jefferson, C. (1964). *Post-Eoceno entre Quíbor y Sanare, Estado Lara*. *Bol. Asoc. Ven. Geol. Min. y Petr.*, 7(7): 218-223.

Lermo, J. y F.J. Chavez-Garcia (1994). *Are the microtremors useful in site response evaluation?*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84: 1350-1364.

Lozano L. y S. Yépez (2003). Mediciones gravimétricas y de ruido ambiental, Barquisimeto, Estado Lara. Informe de pasantía, FUNVISIS, Caracas, 24 p

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No. 1.

Nettleton, L. L. (1942). Gravity and magnetic calculations: *Geophysics*, 7, 293-310

Pacheco G. y R. Terán (1999). Caracterización microsísmica de suelos. Caso de estudio. Trabajo Especial de Grado. Decanato de Ingeniería Civil, UCLA, Barquisimeto, 159 p.

Renz, O., R. Lakeman y E. Van Der Meulen (1955). Submarine sliding in western Venezuela. *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, 39 (10): 2053-2067.

Rocabado, V. (2000). Períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Caracas a partir de mediciones de ruido ambiental. Tesis de grado, U.C.V. Caracas: 87p

Rocabado, V., M. Schmitz, G. Malavé y T. Enomoto (2001). Períodos fundamentales y amplificación del suelo de la ciudad de Caracas utilizando la técnica de Nakamura. International Workshop “Study on Countermeasures for Earthquake Disaster in Caracas (1999-2001)”, Caracas, Venezuela, August 24-August 25, 2000, Serie Técnica, FUNVISIS, Caracas, 130-139.

Rocabado V., M. Schmitz (2002a). Estudio de ruido ambiental y sísmica de refracción. Zona industrial, Barquisimeto, Estado Lara. FUNVISIS, Caracas, 19 p

Rocabado V., M. Schmitz, J. Sánchez, J. González y L. Andrade (2002b). Estudio de microzonificación sísmica para la mitigación del riesgo sísmico en el Municipio

Iribarren, Barquisimeto, Estado Lara. Informe complementario de avances. FUNVISIS, Caracas. UCLA, Barquisimeto, 25 p

Rocabado V., J. Sánchez, M. Schmitz y L. Andrade (2003). Estudios de microzonificación sísmica en Barquisimeto. Mediciones de ruido ambiental, sísmica de refracción y gravimetría. VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Barquisimeto. FUNVISIS, Caracas. UCLA, Barquisimeto. 10 p.

Rod, E. y W. Maync (1954). Revision of Lower Cretaceous stratigraphy of Venezuela. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., Vol. 38, N° 2, p. 193-283.

Rojas C. y D. Rojas (2003). Caracterización microsísmica de los suelos de la zona industrial ubicada al oeste de Barquisimeto – Edo. Lara. Trabajo Especial de Grado. Decanato de Ingeniería Civil, UCLA, Barquisimeto, 89 p.

Rosset, P., A. De La Puente, L. Chouinard, D. Mitchell y J. Adams (2003). Site effect assessment at small scales in urban areas: a tool for preparedness and mitigation.

Scher, W., J. Manrique y M. Mancilla (1999). Léxico Estratigráfico Electrónico. [Documento en línea], disponible: www.pdvsa.com/lexico, [Consulta: 2003, Mayo 21].

Schmertmann, J. y A., Palacios (1979). Energy dynamics of SPT. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105 (GT 8): 909-926.

Schubert, C. (1980). Morfología neotectónica de una falla rumbo-deslizante e informe preliminary sobre la Falla de Boconó, Andes merideños. Acta Científica Venezolana, 31: 98-111.

Soulas, J., C. Rojas y C. Schubert (1985). Geotectónica de las fallas Boconó, Valera, Tuñame y Mene Grande. IV Congreso Geológico Venezolano, Caracas, 6962-6999.

Srivastava, R. M. y E. Isaaks (1989). An introduction to applied geostatistics. Edit. Oxford University Press, Inc. New York, Oxford. 561p.

Stephan, J. F., (1982). Evolution géodynamique du domaine Caraïbe Andes et chaîne Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Vénézuéla). *Tesis PhD., Univ. Pierre y Marie Curie*, Paris: 512 p.

Urbina D., Villalobos J. (2000). Caracterización microsísmica de suelos en una zona específica de Barquisimeto, Estado Lara. Continuación. Trabajo Especial de Grado. Decanato de Ingeniería Civil, UCLA, Barquisimeto, 70 p.

Valle, R. (1976). Carreteras, calles y autopistas. Edit. Ateneo, Buenos Aires, 476p.

Von Der Osten, E. y D. Zozaya (1957). Geología de la parte suroeste del Estado Lara, Región de Quibor (Carta 2308). Bol. Geol., Caracas, Vol. 4, N° 9, p. 3-52

APÉNDICE A

Tablas de datos de los modelos sísmicos 2D y velocidades Vs30

Tabla A.1 Modelo 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la Base Aérea Militar

CAPA 1	Distancia (m)	0	100	150	200	250	280	300	400	480	500
	Velocidad tope (km/s)	0.60	0.50	0.65	0.55	0.65	0.55	0.65	0.65	0.60	0.60
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	280	300	400	470	500
	Velocidad base (km/s)	0.60	0.65	0.65	0.65	0.80	0.85	0.85	0.80	0.80	0.80
CAPA 2	Distancia (m)	0	50	100	150	200	240	300	425	470	500
	Profundidad (m)	2.00	2.10	4.60	6.00	7.60	6.40	6.40	7.05	6.00	6.00
	Distancia (m)	0	50	110	200	250	300	350	425	450	500
	Velocidad tope (km/s)	1.00	1.00	1.00	1.10	1.25	1.25	1.15	1.05	1.05	1.05
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	1.25	1.25	1.25	1.35	1.40	1.25	1.15	1.20	1.15	1.20
CAPA 3	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Profundidad (m)	36	37	40	40	40	42	40	39	33	34
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	440	500
	Velocidad tope (km/s)	2.20	2.20	2.20	2.20	2.25	2.25	2.15	2.20	2.10	2.10
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	2.40	2.40	2.40	2.40	2.30	2.35	2.45	2.45	2.45	2.45
CAPA 4	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Profundidad (m)	100	100	100	100	100	100	94	92	91	90
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95

Tabla A.2 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la Base Aérea Militar

CAPA 1	Distancia (m)	0	100	150	200	250	280	300	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	0.13	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.15	0.15
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	280	300	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	0.14	0.13	0.18	0.20	0.20	0.15	0.12	0.14	0.22	0.22
CAPA 2	Distancia (m)	0	50	100	150	200	250	300	425	470	500
	Profundidad (m)	2.00	2.10	4.60	6.00	7.60	6.90	5.80	7.05	6.00	6.00
	Distancia (m)	0	50	110	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	0.55	0.45	0.50	0.60	0.55	0.65	0.60	0.55	0.65	0.65
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	0.65	0.55	0.60	0.75	0.80	0.85	0.65	0.55	0.65	0.65
CAPA 3	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Profundidad (m)	36	37	40	40	40	42	40	39	33	34
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	425	500
	Velocidad tope (km/s)	0.80	0.65	0.60	0.95	1.05	1.00	0.65	0.70	0.70	0.75
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	0.95	0.95	0.95	0.95	1.05	1.05	0.95	0.95	0.95	0.95
CAPA 4	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Profundidad (m)	100	100	100	100	100	100	94	92	91	90
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.15	1.15	1.15	1.15
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.15	1.25	1.25	1.25	1.25

Tabla A.3 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la línea N-S del Aeropuerto

CAPA 1	Distancia (m)	0	50	150	200	250	280	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	0.90	1.05	1.10	1.10	1.10	1.20	1.35	1.20	1.15	1.15
	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	1.25	1.10	1.25	1.15	1.15	1.20	1.35	1.35	1.25	1.25
CAPA 2	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Profundidad (m)	3.05	5.40	4.90	6.00	6.15	5.70	3.85	4.95	5.00	5.10
	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	1.25	1.25	1.30	1.30	1.35	1.35	1.55	1.45	1.40	1.42
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	1.35	1.45	1.35	1.45	1.45	1.45	1.50	1.65	1.75	1.55
CAPA 3	Distancia (m)	0	50	100	200	250	300	350	400	450	500
	Profundidad (m)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50

Tabla A.4 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la línea N-S del Aeropuerto

CAPA 1	Distancia (m)	0	50	150	200	250	280	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.10	0.15	0.20	0.20
	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	0.15	0.25	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30
CAPA 2	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Profundidad (m)	3.05	5.40	4.90	6.00	6.15	5.70	3.85	4.95	5.00	5.10
	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	0.80	0.95	1.05	1.10	1.05	1.05	1.05	1.15	1.00	1.00
	Distancia (m)	0	50	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	1.10	1.10	1.15	1.15	1.25	1.25	1.10	1.15	1.10	1.15
CAPA 3	Distancia (m)	0	50	100	200	250	300	350	400	450	500
	Profundidad (m)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad tope (km/s)	1.20	1.20	1.25	1.25	1.25	1.35	1.25	1.25	1.25	1.25
	Distancia (m)	0	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	Velocidad base (km/s)	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.35	1.30	1.30	1.30	1.30

Tabla A.5 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas P de la línea principal del Aeropuerto

CAPA 1	Distancia (m)	0	200	400	750	960	1200	1440	1650	1900	2000
	Velocidad tope (km/s)	0.80	0.85	1.05	0.90	1.00	0.80	0.70	1.00	1.05	1.05
CAPA 1	Distancia (m)	0	150	350	600	800	1100	1400	1550	1800	2000
	Velocidad base (km/s)	0.90	1.00	1.05	1.05	1.15	0.95	1.00	1.15	1.15	1.15
CAPA 2	Distancia (m)	0	200	400	600	800	960	1100	1400	1600	2000
	Profundidad (m)	5.00	4.00	3.00	5.00	2.00	6.00	15.00	14.00	7.00	5.00
	Distancia (m)	0	200	480	750	960	1200	1440	1650	1750	2000
	Velocidad tope (km/s)	1.15	1.20	1.35	1.45	1.40	1.20	1.30	1.35	1.45	1.35
	Distancia (m)	0	100	350	600	800	1100	1300	1550	1800	2000
	Velocidad base (km/s)	1.25	1.30	1.55	1.45	1.55	1.35	1.55	1.50	1.55	1.50
CAPA 3	Distancia (m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
	Profundidad (m)	78	78	79	80	80	75	70	65	60	60
	Distancia (m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
	Velocidad tope (km/s)	2.40	2.40	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.50	2.50	2.50
	Distancia (m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
	Velocidad base (km/s)	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.60	2.65	2.65
CAPA 4	Distancia (m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
	Profundidad (m)	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155
	Distancia (m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
	Velocidad tope (km/s)	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
	Distancia (m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
	Velocidad base (km/s)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2

Tabla A.6 Modelo sísmico 2D de velocidades y espesores del perfil sísmico de ondas S de la línea principal del Aeropuerto de Barquisimeto

CAPA 1	Distancia (m)	0	200	400	750	960	1200	1440	1650	1900	2000
	Velocidad tope (km/s)	0.40	0.45	0.40	0.40	0.40	0.55	0.50	0.25	0.30	0.30
	Distancia (m)	0	150	350	600	800	1100	1400	1550	1800	2000
	Velocidad base (km/s)	0.50	0.50	0.45	0.45	0.40	0.65	0.55	0.40	0.40	0.40
CAPA 2	Distancia (m)	0	200	400	600	800	960	1100	1400	1600	2000
	Profundidad	5	4	3	5	2	6	15	14	7	5
	Distancia (m)	0	220	480	690	960	1125	1440	1650	1920	2000
	Velocidad tope (km/s)	0.95	0.95	0.95	0.85	0.95	1.15	1.15	0.95	1.00	1.00
	Distancia (m)	0	240	340	590	760	1025	1240	1390	1720	2000
	Velocidad base (km/s)	1.30	1.35	1.20	1.10	1.10	1.20	1.20	1.20	1.15	1.10
CAPA 3	Distancia (m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
	Profundidad	78	78	78.50	80	80	75	70	65	60	60
	Distancia (m)	0	220	340	500	760	900	1000	1300	1500	2000
	Velocidad tope (km/s)	1.55	1.45	1.55	1.55	1.40	1.25	1.30	1.25	1.25	1.25
	Distancia (m)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000
	Velocidad base (km/s)	1.65	1.65	1.65	1.60	1.45	1.40	1.35	1.30	1.30	1.30

Tabla A.7 Resumen de distribución de velocidades V_{s30} en el Aeropuerto, Base Aérea, zona industrial y zona central de la ciudad.

Perfil/Archivo	Latitud	Longitud	V_{s30}
1	1114042	468410	1039
2	1113562	468316	1199
3	1114000	466995	1159
4	1113983	466599	
5	1112421	466477	
6	1112098	466681	
7	1114118	466142	
8	1114343	463974	
9	1114966	460051	1003
10	1113968	459597	1000
11	1113025	457568	1041
BA-Norte	1110622	458599	715
BA-Sur	1110347	458620	723
AP-E-Norte	1109691	459620	859
Ap-E-Sur	1109143	459789	841
AP0000	1109909	461445	847
AP0480S	1109793	460981	841
AP0960	1109674	460523	873
AP1440S	1109546	460043	844
AP1920	1109394	459596	854

Estas velocidades se calcularon a partir de la proyección en profundidad de las velocidades aparentes que ofrecen los modelos 1D del programa REFLEX, por lo que las velocidades reales deben ser un tanto menores a las observadas.

APÉNDICE B
Tabla de datos gravimétricos

Tabla B.1 Tabla de datos de Anomalías de Bouguer con sus componentes regional y residual

Estación	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Altura (m)	C. Top. (mgal)	A. Bouguer (mgal)	Residual3 (mgal)	Regional3 (mgal)
1	467951	1112550	520	0.032	-24.966	-1.533	-23.433
2	467976	1112081	520	0.108	-24.903	-1.008	-23.895
3	467476	1112094	532	0.32	-24.128	-0.643	-23.485
4	467545	1112562	536	0.052	-23.034		-23.034
5	468616	1112155	514.5	0.057	-24.881	-0.438	-24.443
6	468571	1111578	516.5	0.082	-25.523	-0.546	-24.978
7	469120	1111708	504	0.226	-29.325	-3.796	-25.529
8	469087	1112080	516.5	0.053	-26.119	-1.047	-25.072
9	469420	1111986	517	0.197	-27.066	-1.443	-25.622
10	469932	1112108	519	0.126	-28.756	-2.522	-26.235
11	470429	1112188	490	0.053	-22.465	4.491	-26.956
13	467919	1111605	475	0.131	-24.218		-24.218
14	467497	1111834	485	0.246	-24.413	-0.697	-23.716
15	466883	1112057	500	0.117	-23.800	-0.670	-23.129
16	466044	1112130	500	0.238	-25.210	-2.528	-22.682
17	465328	1111804	505	0.213	-23.174	-0.546	-22.627
18	464372	1111628	510	0.188	-23.260	-0.778	-22.482
19	463845	1111455	520	0.179	-24.258	-1.811	-22.447
20	463332	1111097	525	0.211	-24.567	-2.116	-22.451
21	462901	1110717	537	0.168	-24.948	-2.520	-22.428
22	462333	1110643	603	0.368	-24.071	-1.731	-22.340
23	461698	1110570	608	0.059	-23.944	-1.706	-22.238
24	461022	1110733	612	0.025	-22.637	-0.501	-22.136
25	460442	1110635	620	0.028	-20.943	1.063	-22.007
28	468954	1112547	520	0.025	-23.457	0.933	-24.390
29	469452	1112572	517.6	0.03	-29.983	-5.024	-24.959
30	469954	1112603	513.5	0.033	-28.685	-3.060	-25.625
31	470403	1112613	520	0.02	-26.644	-0.329	-26.315
32	469993	1113067	513	0.017	-31.835	-6.779	-25.056
33	470398	1113187	520	0.025	-26.894	-1.405	-25.489
34	469451	1113139	521.3	0.04	-24.705	-0.449	-24.256
35	468990	1113126	537.2	0.09	-19.475	4.288	-23.764
36	468479	1113087	544.5	0.061	-18.943	4.382	-23.325
37	468492	1112604	541.2	0.21	-19.227	4.623	-23.850
39	461534	1111597	599	0.027	-23.270	-1.046	-22.224
40	461576	1111323	604	0.041	-22.946	-0.709	-22.238
41	460924	1111455	605	0.031	-22.736	-0.573	-22.163
42	460280	1111358	606	0.044	-22.487	-0.431	-22.056
43	459070	1110873	609	0.013	-22.184	-0.546	-21.638
44	459645	1111040	611	0.024	-21.890		-21.890
45	459591	1111383	606.5	0.03	-22.201	-0.307	-21.895
46	459490	1111862	603.1	0.025	-22.784	-0.879	-21.904
47	459029	1111237	609	0.026	-21.639		-21.639
48	460852	1112520	598	0.024	-22.210	-0.113	-22.097
49	460219	1112387	596.5	0.028	-23.028	-0.981	-22.047
50	460334	1111933	601.3	0.033	-22.765	-0.682	-22.082
51	460858	1111973	599.2	0.026	-23.096	-0.950	-22.146
54	468897	1113352	540	0.348	-18.358	5.047	-23.405
55	468025	1113072	550.2	0.035	-18.304	4.679	-22.982
56	467525	1113050	556.8	0.124	-19.793	2.885	-22.678

Estación	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Altura (m)	C. Top. (mgal)	A. Bouguer (mgal)	Residual3 (mgal)	Regional3 (mgal)
57	466974	1113001	545	0.065	-22.438		-22.438
58	466523	1112963	550	0.039	-22.310		-22.310
59	465938	1112888	560	0.06	-22.487	-0.321	-22.166
60	465270	1112820	565	0.059	-23.136	-1.060	-22.076
61	464753	1112806	570	0.049	-23.255	-1.230	-22.025
62	464273	1112757	574.8	0.041	-22.949	-0.928	-22.021
63	463790	1112733	578	0.042	-23.449	-1.426	-22.023
64	463312	1112672	580	0.027	-23.759	-1.708	-22.051
65	462742	1112630	585.8	0.029	-23.487	-1.409	-22.078
66	462125	1112601	590	0.025	-23.538	-1.437	-22.101
67	461392	1112522	595.2	0.038	-23.157	-1.039	-22.118
69	469812	1114733	520	0.018	-23.215	-0.700	-22.515
70	469685	1114656	520	0.024	-23.765	-1.266	-22.499
71	469442	1116002	520	0.059	-20.900	-0.537	-20.363
72	469994	1115562	520	0.056	-22.599	-1.122	-21.477
73	469543	1115279	520	0.03	-23.468	-1.982	-21.485
74	469469	1114846	520	0.035	-23.505	-1.479	-22.027
75	469580	1113536	518	0.02	-26.034	-2.132	-23.901
76	469955	1113548	518	0.019	-27.305	-2.953	-24.352
77	469605	1114446	522	0.018	-22.621		-22.621
78	469479	1113942	523	0.035	-22.716	0.537	-23.253
79	468967	1113937	523	0.028	-22.987	-0.216	-22.772
81	458815	1113993	588	0.059	-19.802	1.662	-21.464
82	459421	1114456	582.5	0.036	-20.151	1.324	-21.475
83	460082	1114570	576.5	0.046	-20.171	1.348	-21.519
84	460717	1115278	571.5	0.07	-20.504	0.685	-21.190
85	461449	1115815	572.5	0.328	-21.146	-0.359	-20.786
86	460811	1115959	588	0.139	-20.850		-20.850
87	460026	1116361	603.5	0.12	-20.273	0.241	-20.514
88	460058	1115684	582.5	0.111	-20.932		-20.932
89	459568	1115958	600	0.118	-21.078	-0.333	-20.745
90	458758	1115337	604	0.117	-21.152	-0.244	-20.908
91	459449	1115216	589.8	0.061	-20.203	0.946	-21.149
92	460201	1115060	580	0.057	-19.697	1.609	-21.305
93	458888	1114514	590.4	0.046	-20.768	0.551	-21.319
112	465405	1112408	567.8	0.162	-23.031	-0.699	-22.332
113	465946	1112440	569.5	0.768	-20.085	2.372	-22.457
114	466449	1112553	555	0.375	-20.638	1.922	-22.559
115	466952	1112426	550	0.585	-21.224	1.662	-22.886
116	465066	1112379	547	0.075	-27.645	-5.364	-22.281
117	464310	1112324	570	0.072	-23.791	-1.579	-22.211
118	463803	1112289	575	0.084	-24.379	-2.191	-22.189
120	463273	1112244	584.1	0.055	-22.757	-0.573	-22.184
121	462816	1112204	585	0.033	-23.202	-1.013	-22.189
122	462113	1112161	592.8	0.038	-22.847	-0.659	-22.189
125	468988	1114431	540.5	0.274	-18.825	3.348	-22.174
126	468355	1114461	546.7	0.244	-17.932	3.765	-21.697
127	469038	1114856	540	0.317	-18.800	2.866	-21.666
128	468372	1114809	536.5	0.306	-19.928	1.369	-21.297
129	467980	1114416	547.3	0.061	-18.825	2.716	-21.541

Estación	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Altura (m)	C. Top. (mgal)	A. Bouguer (mgal)	Residual3 (mgal)	Regional3 (mgal)
130	467857	1114847	545.5	0.124	-18.544	2.463	-21.007
131	467317	1114865	556.2	0.08	-18.162	2.645	-20.807
132	466991	1114812	560	0.358	-17.801	2.985	-20.785
133	466279	1114565	567	0.053	-17.534	3.385	-20.919
134	466426	1114741	552	0.059	-19.061	1.712	-20.773
136	465542	1114933	568.5	0.222	-17.200	3.395	-20.595
137	465826	1114625	557	0.039	-17.636	3.209	-20.845
138	466821	1115351	559	0.151	-16.500	3.716	-20.216
139	466255	1115381	564	0.096	-15.326	4.838	-20.164
140	465728	1115398	550	0.106	-18.325	1.847	-20.171
142	458937	1111923	602	0.021	-22.408	-0.679	-21.729
143	458920	1112356	600	0.026	-22.139	-0.405	-21.734
144	458849	1112817	589.8	0.035	-21.355	0.333	-21.687
145	458812	1113466	587.5	0.029	-20.751	0.835	-21.585
146	459434	1112940	593	0.031	-22.120	-0.272	-21.848
147	459493	1112356	598	0.021	-22.935	-1.027	-21.907
149	462009	1113082	590	0.025	-22.766	-0.783	-21.983
150	462735	1113136	586.4	0.024	-22.765	-0.847	-21.918
151	463231	1113209	581	0.03	-23.155	-1.301	-21.854
152	463752	1113256	578.4	0.026	-22.397	-0.595	-21.802
153	464216	1113300	570	0.033	-23.513	-1.754	-21.759
154	464752	1113341	570	0.041	-22.731	-0.997	-21.734
155	465204	1113366	565	0.028	-23.049	-1.310	-21.740
156	465843	1113411	560	0.027	-22.092	-0.309	-21.783
157	466352	1113455	551	0.032	-20.935	0.918	-21.853
158	466777	1113479	545	0.027	-22.328	-0.369	-21.960
159	467205	1113510	544	0.032	-21.339	0.758	-22.098
160	467652	1113513	555.3	0.031	-17.754	4.555	-22.309
161	460837	1113042	596.4	0.026	-22.059		-22.059
162	460813	1113476	592.1	0.02	-21.514	0.396	-21.910
163	461364	1114151	586	0.028	-20.736	0.933	-21.669
164	462044	1114153	583	0.04	-21.367	0.229	-21.596
165	462005	1113498	587.5	0.017	-21.992	-0.139	-21.853
166	461384	1113489	591	0.021	-21.525	0.371	-21.896
171	464525	1112043	575.3	0.556	-22.651	-0.303	-22.348
172	463169	1111816	587.3	0.105	-23.625	-1.334	-22.291
173	463851	1111888	574.7	0.347	-22.866	-0.542	-22.324
174	462823	1111672	595	0.061	-23.036	-0.737	-22.299
175	462924	1111282	585	0.133	-25.064	-2.696	-22.369
178	468459	1113549	547	0.025	-18.176	4.629	-22.805
179	468286	1113912	551	0.023	-17.346	4.930	-22.276
180	467933	1114004	553	0.047	-18.005	3.956	-21.961
181	467385	1113968	560	0.024	-18.027	3.714	-21.741
182	466839	1113919	545	0.025	-21.035	0.564	-21.598
183	466431	1113919	554	0.029	-20.296	1.201	-21.497
184	467258	1114506	537.5	0.032	-22.202	-1.041	-21.161
185	466888	1114285	546	0.026	-21.556	-0.281	-21.276
186	464739	1113780	565	0.035	-22.417	-0.942	-21.475
187	465197	1113818	565	0.031	-22.615	-1.170	-21.445
188	465787	1113872	561	0.034	-21.234	0.204	-21.438

Estación	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Altura (m)	C. Top. (mgal)	A. Bouguer (mgal)	Residual3 (mgal)	Regional3 (mgal)
189	465751	1114395	559	0.025	-20.091	0.938	-21.029
190	465161	1114384	565	0.026	-21.134		-21.134
191	464164	1113755	570	0.036	-22.979	-1.458	-21.521
192	464691	1114327	565	0.023	-20.500	0.623	-21.123
193	464169	1114271	570	0.025	-22.012	-0.795	-21.217
194	463612	1114309	573	0.054	-22.505	-1.228	-21.276
195	462813	1113672	581.5	0.024	-22.376	-0.671	-21.705
196	463195	1113674	579.1	0.026	-22.737	-1.077	-21.659
197	463645	1113702	574	0.03	-23.429	-1.832	-21.597
199	462289	1111252	600	0.068	-23.367	-1.057	-22.309
200	462187	1111680	597	0.042	-23.255	-0.994	-22.261
201	463612	1112196	583.1	0.069	-23.509	-1.299	-22.210
204	468613	1116699	538	0.33	-21.146	-2.209	-18.938
205	468543	1116261	544	0.445	-21.163	-1.646	-19.517
206	469349	1116603	520	0.072	-19.847	-0.435	-19.412
207	468941	1115475	520	0.06	-22.121	-1.343	-20.778
208	468547	1115228	540	0.15	-22.008	-1.138	-20.870
210	467292	1115413	538.6	0.073	-21.255	-1.043	-20.212
211	467273	1115953	560	0.259	-21.573	-1.972	-19.601
212	467742	1116039	587.5	0.516	-21.422	-1.847	-19.575
213	467761	1116723	530	0.562	-22.148	-3.434	-18.715
214	467373	1116960	560	0.682	-20.744	-2.362	-18.382
215	467226	1116539	578	0.201	-20.719	-1.814	-18.905
216	466879	1116417	570	0.278	-21.282	-2.234	-19.049
217	466804	1115868	560	0.099	-19.947	-0.281	-19.666
218	466299	1116062	560	0.412	-20.394	-0.923	-19.471
219	466211	1116765	620	0.579	-21.212	-2.495	-18.716
220	465512	1116850	580	0.148	-20.245	-1.473	-18.773
221	465594	1116359	558.4	0.127	-20.516	-1.248	-19.268
222	465627	1115932	557.5	0.112	-18.332	1.352	-19.684
223	465196	1115912	550	0.094	-19.226	0.555	-19.781
226	459535	1113509	590	0.02	-21.043	0.732	-21.775
227	459498	1113966	582	0.043	-20.332	1.321	-21.654
228	460048	1113944	585.5	0.029	-20.243	1.496	-21.738
229	460641	1114410	580	0.028	-20.447	1.153	-21.600
230	461242	1114685	586	0.039	-20.273	1.176	-21.449
231	461311	1115222	570.5	0.149	-20.046	1.120	-21.166
232	461895	1115269	570	0.097	-22.670	-1.621	-21.049
233	462486	1115204	576	0.089	-20.896		-20.896
234	463053	1115282	572.5	0.071	-20.595	0.194	-20.790
235	463652	1115421	552.5	0.112	-20.265	0.281	-20.547
236	463510	1115786	559.5	0.11	-20.099	0.213	-20.311
237	463062	1115834	558	0.223	-20.154	0.246	-20.400
238	463148	1114746	573	0.063	-21.293	-0.187	-21.106
239	462556	1114672	578	0.047	-21.135	0.128	-21.263
240	463638	1114839	572	0.04	-21.033		-21.033
241	464128	1114869	574.3	0.045	-18.565	2.267	-20.832
242	464049	1115289	560.5	0.039	-19.895	0.654	-20.549
244	461252	1113003	597.7	0.021	-21.593	0.432	-22.025
245	464711	1114860	565	0.034	-20.618	0.124	-20.742

Estación	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Altura (m)	C. Top. (mgal)	A. Bouguer (mgal)	Residual3 (mgal)	Regional3 (mgal)
246	464607	1115354	568.4	0.056	-18.480	1.900	-20.380
247	465050	1115448	555	0.046	-20.201		-20.201
248	465112	1114903	560	0.051	-20.314	0.342	-20.656
249	463196	1114227	583	0.031	-21.094	0.293	-21.387
250	462717	1114191	579.8	0.026	-21.881	-0.399	-21.482
251	460352	1113667	588.4	0.024	-22.062	-0.220	-21.842
252	460784	1114035	586	0.036	-21.296	0.444	-21.740
255	458474	1113665	598	0.029	-18.785	2.630	-21.414
256	457618	1113929	605.3	0.051	-20.259	0.633	-20.892
257	457930	1115347	632.5	0.317	-21.520	-0.991	-20.529
258	458757	1115808	620	1.208	-19.051	1.590	-20.642
259	459383	1116414	600	0.296	-20.732	-0.329	-20.403
260	460713	1116559	610	0.166	-19.262	1.092	-20.354
261	462052	1115857	600	0.824	-19.621	1.020	-20.640
262	462584	1115975	590	0.504	-19.577	0.847	-20.425
263	463057	1116451	590	0.569	-20.485	-0.571	-19.914
264	463476	1116363	585	0.239	-20.029	-0.173	-19.856
265	464040	1115761	551.2	0.093	-19.866	0.322	-20.188
266	463987	1116374	578.3	0.105	-19.330	0.357	-19.687
267	463902	1117046	598.5	0.112	-20.054	-0.964	-19.090
268	464539	1117073	600	0.078	-19.934	-1.096	-18.838
269	465007	1116957	620	0.518	-21.061	-2.256	-18.805
270	464547	1116365	598	0.441	-20.673	-1.149	-19.524
271	465105	1116426	580	0.188	-19.427	-0.115	-19.312
272	464658	1115898	552.4	0.089	-19.781	0.134	-19.915
273	463481	1116964	590	0.63	-22.063	-2.744	-19.318
275	458499	1110760	608	0.014	-22.213	-0.857	-21.356
276	457883	1110704	602	0.01	-22.505	-1.515	-20.989
277	457876	1109979	612	0.015	-21.669	-0.931	-20.738
278	458017	1108463	639	0.065	-20.203	-0.132	-20.071
279	457953	1108956	629	0.032	-20.624	-0.313	-20.311
280	457836	1109423	617	0.054	-21.828	-1.362	-20.466
281	458561	1109273	616	0.058	-21.266	-0.411	-20.855
282	458611	1108459	637.3	0.056	-20.213	0.249	-20.462
283	458582	1108905	617.5	0.047	-21.435	-0.748	-20.687
284	459142	1108973	624	0.067	-20.952	0.070	-21.022
285	459794	1108929	627	0.045	-21.825	-0.525	-21.300
286	460208	1109200	629	0.051	-21.704	-0.136	-21.568
287	460304	1108721	634.8	0.1	-21.720	-0.298	-21.422
288	460775	1109240	627.5	0.091	-22.573	-0.799	-21.774
289	461673	1109763	614	0.891	-23.723	-1.579	-22.144
292	458037	1114811	611.5	0.108	-21.154	-0.314	-20.840
293	457522	1114812	640	0.322	-18.480	2.043	-20.522
294	458259	1113523	592.5	0.031	-20.541	0.806	-21.347
295	457526	1113643	602	0.038	-20.722	0.173	-20.895
296	457116	1113970	620	0.058	-20.251	0.260	-20.511
297	457041	1113328	610	0.033	-20.409	0.176	-20.585
298	456454	1113243	621	0.026	-20.657	-0.609	-20.048
299	456378	1112361	612.5	0.018	-20.817	-0.797	-20.020
300	456454	1111702	609	0.017	-20.798	-0.757	-20.040

Estación	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Altura (m)	C. Top. (mgal)	A. Bouguer (mgal)	Residual3 (mgal)	Regional3 (mgal)
301	456866	1112263	600	0.028	-22.057	-1.570	-20.486
302	457131	1111634	605.8	0.014	-21.131	-0.480	-20.651
305	457661	1111812	601	0.018	-21.528	-0.458	-21.070
306	457640	1112297	601	0.034	-20.713	0.377	-21.090
307	458279	1112357	595.3	0.024	-21.285	0.175	-21.461
308	458246	1112908	593.9	0.022	-20.798	0.626	-21.423
309	458368	1111905	595	0.04	-22.082	-0.599	-21.483
310	457144	1111270	608	0.018	-21.635	-1.039	-20.595
311	456472	1111150	612	0.024	-21.818	-1.866	-19.952
312	456942	1110760	612	0.014	-21.506	-1.213	-20.292
313	457601	1111141	602	0.027	-21.693	-0.779	-20.914
314	458482	1111375	603	0.028	-22.398	-0.923	-21.475
316	455964	1110368	633	0.032	-20.576	-1.432	-19.144
317	456045	1109786	643	0.023	-21.209	-2.218	-18.991
318	455810	1108815	671	0.057	-18.917	-0.757	-18.160
319	456147	1108062	714	0.155	-15.269	2.780	-18.049
320	455350	1109712	688	0.051	-13.431	4.624	-18.055
321	455144	1110253	642	0.034	-19.766	-1.760	-18.006
337	466140	1117141	618	0.261	-15.954		-15.954
387	455874	1114078	668.9	0.048	-17.992	1.203	-19.195
388	456530	1114084	645	0.053	-21.491	-1.550	-19.941
403	456900	1110225	615	0.048	-22.075	-2.005	-20.070
404	456987	1109875	622	0.033	-21.481	-1.478	-20.004
405	456996	1109422	630	0.033	-21.316	-1.522	-19.795
406	457012	1108796	646	0.086	-20.527	-1.068	-19.458
407	459381	1109701	623	0.03	-21.724	-0.294	-21.430
408	460188	1113032	588.8	0.024	-23.561	-1.594	-21.967
401	458598	1110671	608	0.018	-21.574	-0.191	-21.383
402	458600	1110647	608	0.018	-21.641	-0.263	-21.378
403	458604	1110622	608	0.018	-21.682	-0.309	-21.373
404	458601	1110597	608	0.024	-21.613	-0.247	-21.366
405	458600	1110574	608	0.024	-21.340		-21.340
406	458605	1110550	608.3	0.024	-21.255	0.100	-21.355
407	458609	1110520	608.3	0.03	-21.140	0.208	-21.348
408	458612	1110495	608.3	0.031	-21.106	0.236	-21.342
409	458613	1110469	608.3	0.038	-21.101	0.234	-21.335
410	458615	1110446	608.5	0.038	-21.086	0.242	-21.329
411	458618	1110421	608.5	0.038	-21.103	0.220	-21.322
412	458619	1110395	608.5	0.028	-21.120	0.196	-21.315
413	458625	1110372	609	0.028	-21.003	0.308	-21.311
414	458624	1110347	609	0.028	-21.075	0.228	-21.303
415	458624	1110322	609.5	0.038	-21.058	0.238	-21.295
416	458626	1110299	610	0.038	-21.016	0.274	-21.289
417	458619	1110274	610	0.039	-21.057	0.222	-21.279
418	458621	1110242	610.5	0.038	-21.025	0.244	-21.270
419	458623	1110218	610.5	0.038	-21.117	0.145	-21.263
420	458621	1110192	611	0.048	-21.070	0.182	-21.253
421	458627	1110167	611	0.048	-21.117	0.130	-21.247
422	458630	1110144	611.5	0.048	-21.090	0.151	-21.241
423	458631	1110118	611.5	0.037	-21.158		-21.158

Estación	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Altura (m)	C. Top. (mgal)	A. Bouguer (mgal)	Residual3 (mgal)	Regional3 (mgal)
424	458633	1110090	612	0.038	-21.099	0.124	-21.223
426	459795	1109211	629	0.047	-20.926	0.489	-21.415
427	459784	1109231	629	0.039	-20.883	0.536	-21.418
428	459772	1109253	629	0.039	-20.863	0.559	-21.422
429	459764	1109275	629	0.038	-20.788	0.639	-21.427
430	459752	1109298	629	0.034	-20.752	0.680	-21.432
431	459742	1109321	628.5	0.034	-20.786	0.651	-21.436
432	459727	1109339	628.5	0.033	-20.758	0.679	-21.437
434	459720	1109366	628.5	0.031	-20.720	0.724	-21.444
435	459707	1109388	628	0.031	-20.779	0.669	-21.447
436	459698	1109412	628	0.03	-20.745	0.708	-21.453
437	459688	1109433	628	0.033	-20.707	0.750	-21.457
438	459679	1109456	627.5	0.033	-20.756	0.706	-21.462
439	459665	1109477	627.5	0.032	-20.722	0.742	-21.464
440	459652	1109498	627	0.032	-20.751	0.716	-21.466
441	459636	1109520	627	0.052	-20.666	0.802	-21.468
442	459626	1109541	626.5	0.052	-20.729	0.742	-21.472
443	459620	1109565	626	0.052	-20.809	0.669	-21.478
444	459609	1109589	626	0.048	-20.762	0.720	-21.482
445	459600	1109612	625.5	0.047	-20.797	0.690	-21.487
446	459595	1109636	625	0.047	-20.851	0.642	-21.493
447	459591	1109661	624.5	0.029	-20.928	0.572	-21.500
448	459585	1109684	624	0.028	-20.968	0.537	-21.505
449	459580	1109709	623.5	0.027	-21.048	0.464	-21.512
452	461272	1109866	621	0.089	-22.278	-0.213	-22.065
453	461226	1109848	621	0.084	-22.415	-0.364	-22.051
454	461176	1109837	621.5	0.076	-26.501	-4.464	-22.037
454	461155	1109832	621.5	0.066	-22.396	-0.365	-22.030
455	461128	1109824	622	0.064	-22.330	-0.308	-22.022
456	461104	1109820	622	0.061	-22.315	-0.301	-22.014
457	461078	1109814	622.5	0.058	-22.276	-0.270	-22.006
458	461052	1109808	622.5	0.056	-22.345	-0.347	-21.998
459	461029	1109800	623	0.055	-22.279	-0.289	-21.991
460	461006	1109796	623	0.059	-22.263	-0.279	-21.984
461	460988	1109789	623.5	0.058	-22.217	-0.239	-21.978
462	460964	1109782	624	0.057	-22.142	-0.171	-21.971
463	460938	1109778	624	0.056	-22.150	-0.186	-21.963
464	460913	1109771	624.5	0.055	-22.009		-22.009
465	460887	1109765	624.5	0.054	-22.013		-22.013
466	460864	1109758	624.5	0.056	-21.984		-21.984
467	460839	1109752	625	0.055	-21.828	0.102	-21.930
468	460814	1109746	625	0.054	-21.797	0.125	-21.922
469	460789	1109742	625	0.049	-21.749	0.165	-21.914
470	460766	1109734	625	0.047	-21.689	0.217	-21.906
471	460744	1109729	625	0.046	-21.666	0.232	-21.898
472	460720	1109720	625	0.039	-21.737	0.153	-21.890
473	460696	1109712	625	0.038	-21.719	0.162	-21.881
474	460674	1109703	625.5	0.042	-21.635	0.238	-21.873
475	460646	1109695	625.5	0.037	-21.617	0.246	-21.863
476	460625	1109690	625.5	0.036	-21.606	0.249	-21.855

Estación	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Altura (m)	C. Top. (mgal)	A. Bouguer (mgal)	Residual3 (mgal)	Regional3 (mgal)
477	460601	1109685	626	0.036	-21.480	0.367	-21.847
478	460576	1109680	626	0.048	-21.475	0.363	-21.838
479	460553	1109672	626	0.047	-21.502	0.327	-21.829
480	460529	1109662	626	0.044	-21.537	0.282	-21.819
481	460504	1109659	626	0.043	-21.486	0.325	-21.811
482	460478	1109650	626	0.043	-21.517	0.284	-21.801
483	460452	1109644	626.5	0.041	-21.407	0.385	-21.792
484	460427	1109639	626.5	0.053	-21.512	0.271	-21.783
485	460400	1109633	626.5	0.052	-21.425	0.347	-21.772
486	460375	1109629	627	0.05	-21.155	0.608	-21.763
489	460375	1109629	627	0.05	-21.116	0.647	-21.763
490	460350	1109623	627	0.05	-21.164	0.589	-21.753
491	460327	1109613	627	0.049	-21.123	0.620	-21.743
492	460299	1109609	627	0.05	-21.150	0.583	-21.733
493	460275	1109597	627	0.05	-21.198	0.523	-21.722
494	460250	1109595	627	0.049	-21.027	0.686	-21.713
495	460226	1109583	627	0.048	-21.026	0.676	-21.702
496	460208	1109579	627	0.048	-21.009	0.686	-21.695
497	460185	1109574	627	0.047	-20.963	0.723	-21.686
498	460161	1109570	627	0.04	-20.968	0.708	-21.676
499	460136	1109563	627	0.047	-20.999	0.667	-21.665
500	460113	1109557	627	0.046	-21.023	0.633	-21.655
501	460088	1109551	627	0.058	-21.019	0.625	-21.645
502	460062	1109545	627	0.058	-21.022	0.611	-21.634
503	460041	1109541	627	0.057	-20.966	0.659	-21.625
504	460017	1109533	627	0.047	-20.954	0.660	-21.614
505	459993	1109526	627	0.047	-20.967	0.636	-21.603
506	459970	1109520	627	0.047	-20.960	0.633	-21.593
507	459945	1109507	627	0.043	-20.991	0.589	-21.580
508	459925	1109499	627	0.043	-21.014	0.556	-21.570
509	459903	1109492	627	0.042	-21.098	0.462	-21.559
510	459877	1109486	627	0.051	-21.092	0.456	-21.548
511	459854	1109477	627	0.051	-21.119	0.417	-21.536
512	459829	1109470	627	0.039	-21.104	0.420	-21.524
513	459804	1109462	627	0.039	-21.042	0.470	-21.512
514	459779	1109450	627	0.039	-21.024	0.473	-21.498
515	459756	1109441	627	0.033	-21.013	0.473	-21.486
516	459732	1109437	627	0.033	-20.976	0.499	-21.475
517	459706	1109431	627	0.033	-20.924	0.539	-21.463
518	459683	1109421	627	0.034	-20.905	0.545	-21.450
519	459661	1109415	627	0.034	-20.863	0.576	-21.439
520	459634	1109406	627	0.034	-20.825	0.599	-21.425
521	459610	1109398	627	0.034	-20.763	0.649	-21.412
522	459585	1109390	627	0.034	-20.751	0.648	-21.399
523	459575	1109380	627	0.034	-20.654	0.737	-21.391

APÉNDICE C
Tabla de datos de Ruido Sísmico Ambiental

Tabla C.1 Tabla de datos de Períodos Fundamentales del Suelo

Archivos	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Período
BA000	458598	1110671	0.65
BA050	458604	1110622	0.58
BA100	458600	1110574	0.79
BA150	458609	1110520	0.86
BA200	458613	1110469	0.77
BA250	458618	1110421	0.72
BA300	458625	1110372	0.81
BA350	458624	1110322	0.79
BA400	458619	1110274	0.77
BA450	458623	1110218	0.70
BA500	458627	1110167	0.79
AB000	459795	1109211	0.76
AB050	459772	1109253	0.79
AB100	459752	1109298	0.70
AB150	459727	1109339	0.93
AB200	459707	1109388	0.75
AB250	459688	1109433	0.77
AB300	459665	1109477	0.75
AB350	459636	1109520	0.74
AB400	459620	1109565	0.77
AB450	459600	1109612	0.90
AB500	459591	1109661	0.68
A0000	461202	1109844	0.68
A0050	461155	1109832	0.65
A0100	461104	1109820	0.81
A0150	461052	1109808	0.79
A0200	461006	1109796	0.68
A0250	460964	1109782	0.77
A0300	460913	1109771	0.79
A0350	460864	1109758	6.47
A0400	460814	1109746	0.74
A0450	460766	1109734	0.72
A0500	460720	1109720	0.79
A0550	460674	1109703	0.70
A0600	460625	1109690	0.71
A0650	460576	1109680	0.84
A0700	460529	1109662	0.79
A0750	460478	1109650	0.88
A0800	460427	1109639	0.74
A0850	460375	1109629	0.70
A0900	460327	1109613	0.65
A0950	460275	1109597	0.65
A1000	460226	1109583	0.68
A1050	460185	1109574	0.65
A1100	460136	1109563	0.66
A1150	460088	1109551	0.63
A1200	460041	1109541	0.62
A1250	459993	1109526	0.75
A1300	459945	1109507	0.58
A1350	459903	1109492	0.50
A1400	459854	1109477	0.56
A1450	459804	1109462	0.59
A1500	459756	1109441	0.66
A1550	459706	1109431	0.74
A1600	459661	1109415	0.70
A1650	459610	1109398	0.88
A1700	459575	1109380	0.65
A02	455400	1108585	0.42
A03	455300	1109197	0.51
A04	455262	1109758	0.77
A05	455212	1110357	0.61
A06	455364	1111634	0.51
A07	455099	1112622	0.45
AA01	469951	1111876	0.45
AA02	469990	1112366	0.57
AA03	470002	1112799	0.41
AA04	470028	1113277	0.45
AA05	469994	1113760	0.42
AA07	469977	1114855	0.70
AA08	469945	1115530	0.66
AA09	469932	1115937	0.40
AA10	469983	1116421	0.66
AA11	469983	1116930	0.62
AB01	470468	1111933	0.43
AB02	470474	1112334	0.50
AB03	470449	1112780	0.41
AB04	470429	1113168	0.54
B02	456087	1108610	0.45
B03	456062	1109197	0.43
B04	456000	1109758	0.48
B05	455937	1110357	0.63
B07	455824	1111790	0.51
B08	455839	1112580	0.55
B09	455950	1113325	0.46
B10	455839	1114130	0.40
C02	456859	1108556	0.56
C03	456769	1109222	0.62
C04	456775	1109886	0.57
C05	456537	1110432	0.62
C06	456462	1111255	0.54
C07	456462	1111704	0.48
C08	456412	1112319	0.45
C09	456286	1112997	0.58
D02	457436	1108598	0.53
D03	457349	1109296	0.75
D04	457261	1109883	0.54
D05	457191	1110612	0.57
D06	457136	1111255	0.66
D07	457074	1111754	0.72
D08	457030	1112289	0.58

Archivos	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Período
E02	457948	1108635	0.45
E03	457911	1109334	0.67
E04	457861	1109970	0.68
E05	457811	1110681	0.51
E06	457675	1111107	0.66
E07	457674	1111804	0.56
E08	457656	1112309	0.74
E09	457523	1112766	0.75
E10	457538	1113459	0.44
F02	458636	1108685	0.79
F03	458611	1109346	0.60
F05	458544	1110723	0.63
F06	458398	1111230	0.56
F07	458323	1111829	0.68
F08	458284	1112337	0.64
F09	458272	1112913	0.45
F10	458268	1113712	0.41
G01	459588	1108564	0.55
G02	459273	1108673	0.57
G03	459185	1109309	0.68
G05	459019	1110804	0.56
G06	458985	1111242	0.62
G07	458935	1111841	0.75
G08	458909	1112348	0.52
G09	458864	1112898	0.57
G10	458862	1113503	0.64
G11	458835	1113987	0.53
H02	459947	1108660	0.75
H03	459885	1109321	0.74
H05	459943	1110552	0.74
H06	459560	1111292	0.68
H07	459523	1111829	0.81
H08	459503	1112360	0.68
H09	459460	1112914	0.79
H10	459496	1113483	0.40
H11	459660	1113987	0.53
I01	460634	1108698	0.47
I02	460547	1109334	0.70
I04	460385	1110614	0.75
I05	460297	1111317	0.93
I06	460197	1111916	0.97
I07	460147	1112402	0.81
I08	460122	1112830	0.79
I09	460133	1113320	0.56
I10	460124	1114114	0.45
I11	460101	1114614	0.62
J01	461147	1109396	0.37
J03	460972	1110681	0.74
J04	460922	1111454	0.74
J05	460872	1111991	0.95

Archivos	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Período
J06	460872	1112527	0.86
J07	460845	1113017	0.60
J08	460801	1113482	0.55
J09	460860	1114557	0.45
K01	461721	1109758	0.75
K03	461634	1110569	0.84
K04	461571	1111180	1.00
K05	461546	1111579	0.74
K06	461484	1112091	0.88
K07	461430	1112528	0.74
K08	461384	1113044	0.86
K09	461377	1113496	0.60
K10	461356	1114118	0.50
K11	461356	1114671	0.54
K12	461325	1115143	0.52
K13	461412	1115814	0.50
L02	462283	1110644	0.88
L03	462233	1111217	0.75
L04	462196	1111642	0.79
L05	462121	1112128	0.84
L06	462097	1112580	0.66
L07	462061	1113092	0.68
L08	462047	1113549	0.61
L09	461996	1114160	0.66
L10	461940	1114720	0.51
L11	461947	1115145	0.40
L12	461925	1115706	0.45
M01	462942	1110700	0.60
M02	462883	1111292	0.66
M03	462847	1111696	0.90
M04	462805	1112156	0.70
M05	462771	1112607	0.48
M06	462735	1113135	0.74
M07	462698	1113670	0.90
M08	462675	1114173	0.52
M09	462649	1114764	0.65
M10	462618	1115200	0.63
M11	462553	1115762	0.42
N01	463359	1111094	0.50
N02	463278	1111843	0.90
N03	463301	1112237	0.80
N04	463276	1112672	0.75
N05	463241	1113203	0.68
N06	463229	1113695	0.87
N07	463196	1114209	0.90
N08	463144	1114738	0.63
N09	463139	1115280	0.48
N10	463068	1115787	0.56
N11	463086	1116480	0.41
O01	464032	1111465	0.69

Archivos	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Período
O02	463808	1111883	0.84
O03	463782	1112244	0.74
O04	463771	1112714	0.75
O05	463668	1113239	0.75
O06	463635	1113756	0.74
O07	463622	1114273	0.50
O08	463599	1114806	0.56
O09	463551	1115344	0.62
O10	463518	1115779	0.79
O11	463469	1116455	0.49
P01	464541	1111732	0.48
P02	464518	1112040	0.70
P03	464414	1112356	0.63
P04	464297	1112759	0.63
P05	464212	1113297	0.69
P06	464183	1113780	0.69
P07	464183	1114283	0.60
P08	464138	1114830	0.56
P09	464090	1115304	0.51
P10	464050	1115795	0.50
P11	463978	1116396	0.49
P12	464016	1116905	0.42
Q01	465046	1111788	0.51
Q02	464999	1112356	0.55
Q03	464778	1112795	0.75
Q04	464736	1113350	0.64
Q05	464694	1113838	0.68
Q06	464687	1114335	0.90
Q07	464678	1114838	0.68
Q08	464645	1115353	0.53
Q09	464613	1115843	0.66
Q10	464564	1116396	0.45
Q11	464526	1116905	0.42
R01	465541	1111911	0.48
R02	465496	1112380	0.58
R03	465461	1112849	1.05
R04	465208	1113369	0.60
R05	465186	1113868	0.86
R06	465144	1114361	0.87
R07	465128	1114878	0.68
R08	465104	1115409	0.65
R09	465131	1115922	0.54
R10	465062	1116421	0.58
R11	465049	1116854	0.46
S01	466005	1112097	0.42
S02	465982	1112422	0.56
S03	465937	1112892	1.03
S04	465920	1113420	0.71
S05	465878	1113901	0.65
S06	465810	1114403	0.66

Archivos	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Período
S07	465684	1114886	0.62
S08	465700	1115401	0.55
S09	465643	1115919	0.62
S10	465610	1116383	0.48
S11	465610	1116854	0.42
T01	466498	1112040	0.79
T02	466512	1112437	0.97
T03	466484	1112951	0.45
T04	466432	1113455	0.53
T05	466385	1113908	0.77
T06	466295	1114535	0.60
T07	466279	1114918	0.75
T08	466247	1115409	0.77
T09	466287	1115891	0.56
T10	466235	1116778	0.68
U01	467022	1112026	0.71
U02	466989	1112446	0.53
U03	466946	1113002	0.53
U04	466899	1113488	0.60
U05	466852	1113950	0.70
U06	466856	1114366	0.75
U07	466819	1114838	0.76
U08	466803	1115328	0.68
U09	466770	1115883	0.54
U10	466830	1116482	0.45
V01	467486	1111787	0.54
V02	467512	1112055	0.90
V03	467493	1112554	0.49
V04	467470	1113050	0.77
V05	467465	1113516	0.48
V06	467404	1114035	0.53
V07	467318	1114838	0.52
V08	467286	1115385	0.88
V09	467269	1115915	0.42
V10	467251	1116496	0.60
W01	468018	1111610	0.46
W02	468035	1112083	0.73
W03	468007	1112573	0.61
W04	467979	1113059	0.51
W05	467932	1113549	0.84
W06	467885	1114096	0.49
W07	467873	1114830	0.66
W08	467816	1115288	0.49
W09	467752	1116020	0.47
W10	467903	1116880	0.60
X01	468517	1111252	0.68
X02	468387	1111604	0.60
X03	468550	1111914	0.66
X04	468531	1112375	0.44
X05	468488	1112870	0.77

Archivos	Longitud (UTM)	Latitud (UTM)	Período
X06	468450	1113398	0.54
X07	468380	1114167	0.74
X08	468358	1114778	0.70
X09	468530	1115403	0.93
X10	468656	1116268	1.00
X11	468632	1116892	0.75
Y01	469021	1111392	0.56
Y02	468995	1111793	0.51
Y03	468989	1112290	0.70
Y04	468970	1112888	0.54
Y05	468955	1113398	0.54
Y06	468969	1113945	0.62
Y07	468931	1114811	0.70
Y08	468970	1115415	0.57
Z01	469448	1111838	0.53
Z02	469429	1112334	0.74
Z03	469480	1112850	0.57
Z04	469505	1113334	0.51
Z05	469499	1113919	0.75
Z06	469499	1114416	0.68
Z07	469473	1114817	0.57
Z08	469486	1115447	0.58
Z09	469460	1115988	0.51
Z10	469397	1116459	0.34
Z11	469422	1116930	0.51
ZI01	460607	1115307	0.48
ZI02	460965	1115583	0.60
ZI04	461159	1116305	0.46
ZI05	460756	1116044	0.44
ZI06	460332	1115821	0.68
ZI07	460578	1116581	0.40
ZI08	460011	1116283	0.33
ZI10	459832	1115262	0.61
ZI11	459229	1114375	0.62
ZI12	458596	1114696	0.57
ZI16	457657	1113995	0.34
ZI19	457456	1114556	0.43
ZI20	456964	1114159	0.58
ZI21	456405	1113951	0.43
ZI22	456696	1113221	0.62
ZI23	457263	1113117	0.68
ZI27	456688	1112751	0.63
ZI35	457888	1114517	0.43
ZI36	459594	1114644	0.46
ZI37	459803	1114450	0.47
ZI50	459185	1116007	0.57
ZI51	459160	1115284	0.62
ZI52	458585	1115284	0.60
ZI53	457986	1115234	0.63

APÉNDICE D
Planillas de datos geotécnicos

Páginas destinadas a las planillas de representación de los datos geotécnicos obtenidos, disponibles en la versión en físico del proyecto

APÉNDICE E

Variogramas direccionales de los atributos Anomalía de Bouguer y Período

Tabla E.1 Tabla de datos de los variogramas direccionales de Anomalías de Bouguer

Variogramas direccionales de AB			
Dirección (°)	Rango (m)	Meseta	
5	2200	4,3	
10	2300	4,2	
15	2400	4	
20	2450	4	
25	2450	4	
30	3000	4,1	
35	3450	4,1	
40	3450	4,2	
45	3650	4	Máximo
50	3250	3,8	
55	3200	3,8	
60	3200	3,8	
95	2200	3,6	
100	2200	4	
105	2000	4	
110	2000	3,6	
115	2000	4	
120	1900	4,2	
125	1900	4,1	
130	1900	4,1	
135	1500	4,1	Mínimo
140	1700	4,1	
145	1900	4,1	
150	2100	4,3	

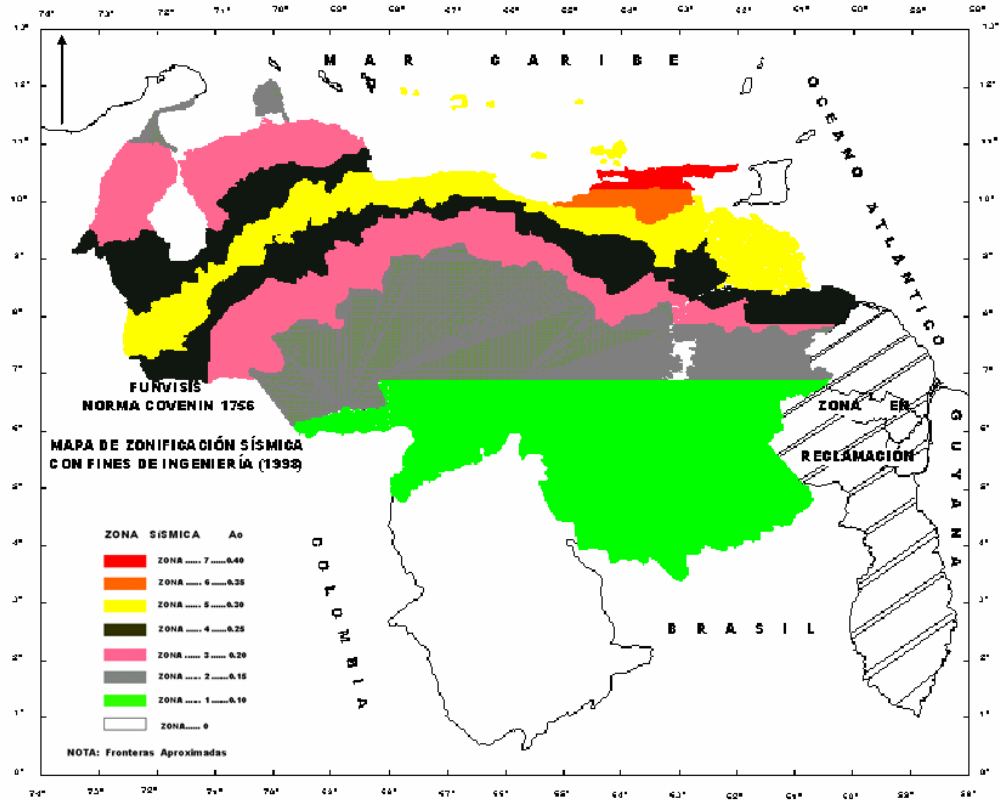
Tabla E.2 Variogramas direccionales de Períodos

Dirección	Rango	Meseta	
20	1100	0,021	
25	1100	0,019	
30	1200	0,019	
35	1500	0,01	Máximo
40	1200	0,016	
45	1200	0,021	
50	1100	0,015	
120	900	0,021	
125	900	0,021	
130	700	0,012	Mínimo
135	800	0,021	

APÉNDICE F
Secciones geológicas de la región

APÉNDICE G

Mapa de zonificación sísmica de Venezuela según la Norma COVENIN 1756-98 para edificaciones sismorresistentes



Mapa G.1. Mapa de zonificación sísmica de Venezuela según la Norma COVENIN 1756-98

Tabla G.1 Datos de zonificación sísmica del Estado Lara

(TABLA 4.2 de la Norma COVENIN 1756-98)
ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE VENEZUELA

ESTADO	
LARA	Zona 5: Municipios: Morán, Andrés Eloy Blanco, Jiménez, Iribarren, Palavecino, Simón Planas, Crespo. Zona 4: Municipios: Torres y Urdaneta.

APÉNDICE H
Compensación y correcciones del gravímetro “SCINTREX Autograv CG-3 (Automated Gravity Meter)”

H.1 Corrección de deriva instrumental

Las variaciones entre mediciones gravimétricas realizadas sobre un mismo punto en largos períodos de tiempo son, en su mayoría, causadas por la deriva instrumental o relajación de los sistemas elásticos del instrumento. El efecto de la deriva instrumental a largo plazo producirá un cambio lineal en las mediciones con el tiempo. Por ejemplo, si dos lecturas no corregidas son tomadas en tiempos t_1 y t_2 en un punto donde no ha ocurrido cambio alguno en la gravedad, la diferencia entre ellas dependerá de la tasa de deriva del instrumento “d”, y se representa como:

$$RU(\bar{t}_2) - RU(\bar{t}_1) = d(\bar{t}_2 - \bar{t}_1) \quad (H.1)$$

RU representa la lectura no corregida para el tiempo correspondiente. Para eliminar los efectos de la deriva instrumental la corrección:

$$DC(t) = (t - t_s)DRIFT \quad (H.2)$$

se sustrae de cada muestra no corregida. “DRIFT” es la constante de deriva en unidades mgals/24horas, “ t_s ” es el tiempo de inicio de la corrección de deriva y “t” es el tiempo al cual fue tomada la muestra.

H.2 Corrección de inclinación

Los cambios de lectura de gravedad no compensados respecto a la inclinación se representan por la expresión:

$$RU(\theta_x, \theta_y) = RU(0,0) - g(1 - \cos\theta_x \cdot \cos\theta_y) \quad (H.3)$$

donde RU es la lectura no corregida, “g” es el valor de la gravedad en el punto de medición y θ_x y θ_y son las inclinaciones del sensor de gravedad con respecto a dos ejes perpendiculares (x e y). La corrección de inclinación opera sobre un rango de ± 200 arcsec y viene dada por

$$TIC = g_t(1 - \cos x \cdot \cos y) \quad (H.4)$$

donde g_t es un valor de gravedad del nivel promedio del mar de 980 Gal y “x” e “y” son las inclinaciones indicadas del gravímetro. Asumiendo $g_t = g$, la lectura corregida será

$$R(\theta_x, \theta_y) = RU(0,0) - g_t(\cos\theta_x \cdot \cos\theta_y - \cos x \cdot \cos y) \quad (H.5)$$

si,

$x = \theta_x$ y $y = \theta_y$, entonces

$$R(\theta_x, \theta_y) = RU(0,0) = R(0,0) \quad (\text{H.6})$$

y los errores debidos a la inclinación del instrumento son eliminados.

H.3 Compensación de temperatura

El muelle o resorte principal de la masa de cuarzo es el componente más sensible a la temperatura del gravímetro, con un coeficiente de aproximadamente $-130 \text{ mgals}/^\circ\text{C}$ (el resorte se hace más fuerte con los incrementos de temperatura). Este resorte es protegido de los cambios de temperatura ambiental por un termostato de dos fases, el cual mantiene la temperatura T_s del resorte constante dentro de $0,5\text{mk}$ bajo condiciones normales de operación. Los cambios en la T_s son medidos utilizando un termómetro en contacto térmico directo con el muelle principal. La salida de este puente térmico es convertida en una señal digital TEMP con la cual se genera la señal de compensación de temperatura.

$$TEC = TEMPCO \times TEMP \quad (\text{H.7})$$

TEMPCO es el coeficiente de temperatura instrumental en mgals/mk . Este es medido durante la fabricación de cada instrumento. Con esto se genera un nuevo valor TEC en unidades mk el cual es calculado para cada lectura y es almacenado en la memoria junto con otras variables de medición.

APÉNDICE I
Fotos de la región



Imagen I.1 Terraza de Barquisimeto (Al sur del Río Turbio)



Imagen I.2 Traza del Río Turbio