



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**Identificación y caracterización de estructuras  
potencialmente activas en la cordillera de la costa entre los  
33° y 33°45's**

Memoria para optar al título de Geólogo

Por:

Romina Ana Sabaj Abumohor

Profesor Guía:

Sofía Rebolledo Lemus

Miembros de la Comisión:

Felipe Leyton Florez y Sergio Sepúlveda Valenzuela

**Santiago de Chile - Octubre 2008**

Texto completo en: [www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2008/sabaj\\_ra/sources/sabaj\\_ra.pdf](http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2008/sabaj_ra/sources/sabaj_ra.pdf)

# Resumen

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo debido a que se encuentra en el contacto entre dos placas tectónicas que convergen con un alto nivel de acoplamiento. Este margen activo genera deformaciones de la corteza que, en un medio frágil, pueden generar sismicidad cortical. Los sismos corticales son generados por estructuras sismogénicas, que son aquellas fallas geológicas activas, que al presentar movimiento pueden generar sismicidad.

Entre los 33° y los 34° S, la Cordillera de la Costa está formada principalmente por rocas plutónicas que cubren el lapso Paleozoico Superior a Cretácico, con edades decrecientes hacia el este. La zona se encuentra afectada por fallas NW y NE, posiblemente pre-jurásicas, que habrían controlado, en parte, el emplazamiento de los plutones jurásicos, y que posteriormente fueron reactivadas después del Mioceno-Plioceno (Gana et al., 2000).

Estudios recientes (Campos et al., 2005; Astroza et al., 2006; Sepúlveda et al., 2008) han permitido poner en evidencia una actividad sísmica cortical relevante, que pese a no tener magnitudes muy grandes puede, por su corta distancia hipocentral, generar importantes daños a nivel local en zonas pobladas cercanas. Diversos estudios revelan que existen fallas potencialmente activas en la Cordillera Principal de Chile entre los 33°S y los 34°S (e.g. Rauld, 2002; Fock, 2005; Charrier et al., 2005) y se han encontrado evidencias de actividad sísmica cortical en zonas costeras de Chile, en particular, entre Constitución y Concepción (35-37°S), al sur del área de estudio (Campos et al., 2002). El registro del Servicio Sismológico Nacional muestra que en la zona central, bajo la Cordillera de la Costa, existe sismicidad superficial, cuyos focos se encuentran a profundidades menores a 30 km, es decir, lejos de la zona de contacto interplaca. Esta sismicidad se podría asociar a actividad cortical como respuesta a deformaciones frágiles de la corteza continental en esta zona.

El objetivo de este estudio es identificar y caracterizar las estructuras corticales potencialmente activas en la Cordillera de la Costa comprendida entre los 33° y los 33°45'S, y estimar de manera preliminar el peligro sísmico asociado a estas estructura en la región. En este trabajo, por ser de carácter preliminar, se consideraron como fallas potencialmente activas a aquellas estructuras de traza mayor a 5 km, que coincidían con rasgos morfológicos y/o presentaran evidencias de

posibles movimientos post-miocenos (últimos 5,3 Ma). Se estudió la zona a partir de la cartografía existente, fotografías aéreas, imágenes satelitales y observaciones en terreno. El peligro asociado a estas estructuras fue determinado mediante la metodología determinística que analiza el peor escenario posible para cada estructura potencialmente activa. Se reconocieron más de 50 estructuras en la zona de estudio, que por su expresión morfológica y datos de terreno se consideraron como fallas potencialmente activas. Las de orientación NW resultaron ser, en general, las que generan mayor peligro. Las magnitudes ( $M_w$ ) máximas posibles preliminares resultaron en el rango entre 5,8 y 7,1; y se obtuvo aceleraciones horizontales máximas (PGA) entre 20%g y 56%g, superando el valor regional de 40%g en casi todo el sector. De esta manera, se concluyó que el peligro sísmico determinístico preliminar asociado a fallas potencialmente activas para la zona de la Cordillera de la Costa comprendida entre los  $33^\circ$  y los  $33^\circ 45'S$  es alto, con algunos sectores de peligro medio. Finalmente, sobre la base de los antecedentes geológicos y de las características sísmicas obtenidas en este estudio, se considera que 15 estructuras son las fallas con mayor potencial sismogénico y por lo tanto, las que se recomienda estudiar con más detalle.

# INDICE

<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1 Formulación del Problema	1
1.2 Ubicación y Vías de Acceso	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Metodología	5
<b>2. MARCO GEOTECTONICO</b>	<b>7</b>
2.1 Segmentación Morfoestructural Andina	7
2.2 Marco Tectónico	8
<b>3. MARCO GEOLOGICO</b>	<b>10</b>
3.1 Geología Regional	10
3.2 Depósitos y Rocas Estratificadas	12
3.2.1 Neógeno	12
3.2.2 Paleógeno	14
3.2.3 Cretácico	15
3.2.4 Jurásico	16
3.3 Rocas Intrusivas	17
3.3.1 Cretácico	17
3.3.2 Cretácico y/o Jurásico Indiferenciado	17
3.3.3 Jurásico	17
3.3.4 Jurásico-Triásico	18
3.3.5 Triásico	18
3.3.6 Paleozoico	18
3.4 Rocas Metamórficas	19

## **4. ESTRUCTURAS POTENCIALMENTE ACTIVAS** **20**

### **4.1 Sistema E-W** **24**

1 Placilla	25
2 Estero Casablanca	26
3 Estero El membrillo	27
4 Embalse Lo Orozco	27
5 Colliguay Norte	29
6 Cartagena	29

### **4.2 Sistema NW** **31**

1 Zona de Falla Marga-Marga	32
2 Valparaíso	36
3 Laguna Verde	37
4 Valparaíso-Curacaví	38
5 Quebrada Los Locos	38
6 Embalse Purísima	38
7 San Jerónimo-De Carvajal	40
8 Quebrada Pino Mar	41
9 Cerro Peumol NW	41
10 Falla Melipilla	42
11 Estero Ñanco	42

### **4.3 Sistema NNW** **43**

1 Río Maipo	44
2 Cordón Los Amarillos	44
3 Estero Aranda	46
4 Estero Puangue	46
5 Sector Estero Carén	47

### **4.4 Sistema NNE** **48**

1 Las Melosillas	50
2 Quebrada El Membrillo	51
3 Estero Orozco	51
4 Lo Ovalle	51
5 Embalse La Arena	51
6 Estero El Sauce	51
7 Estero de Cartagena	54
8 Falla Puangue	54

### **4.5 Sistema NE** **55**

1 Embalse El Críquet	56
2 Quintay Norte	57

3 Lago Peñuelas	58
4 Quebrada Las Raíces	59
5 Embalse Los Leones	59
6 Embalse Las palmas	59
7 Sector Estero carrizo	59
8 Sector Embalse Perales	61
9 Zona de Falla Estero Puangue	62
10 Lagunillas	64
11 Cerro Peumol NE	66
12 Estero Mauco Norte	66
13 Estero Mauco Sur	66
14 Cuesta Ibacache	67
15 San Antonio	67
16 Quebrada Quihuilca	68
17 Estero Yali	68

<b>5. SISMICIDAD Y PELIGRO DETERMINISTICO</b>	<b>69</b>
---	-----------

<b>6. DISCUSIONES</b>	<b>80</b>
-----------------------	-----------

<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>88</b>
--	-----------

7.1 Conclusiones	88
------------------	----

7.2 Recomendaciones	89
---------------------	----

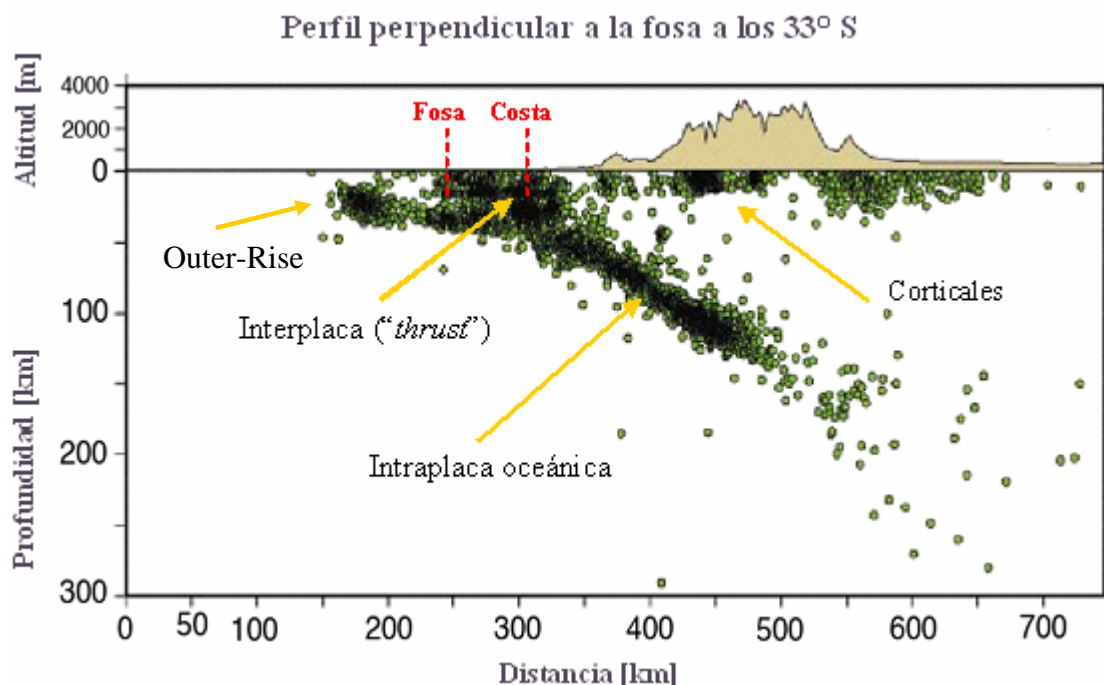
<b>8. REFERENCIAS</b>	<b>90</b>
-----------------------	-----------

# 1. INTRODUCCION

## 1.1 Formulación del Problema

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo debido a que se encuentra en el contacto entre dos placas tectónicas que convergen con un alto nivel de acoplamiento. La placa oceánica de Nazca subducta bajo la placa continental Sudamericana a lo largo del país, hasta los 46° de latitud sur. Como consecuencia de este proceso, Chile y en particular la zona central se encuentra constantemente afectada por sismos originados básicamente en cuatro fuentes sismogénicas principales: Outer-Rise, interplaca, intraplaca oceánica e intraplaca continental o cortical (Figura 1.1).

Los sismos Outer-Rise son sismos superficiales que ocurren bajo el mar, lejos del continente. La fuente interplaca se ubica en la región costera de Chile Central y es producto del contacto sismogénico entre las placas, lo que da origen a terremotos de subducción del tipo “*thrust*” o inversos de bajo ángulo, como el sismo de Valparaíso del 3 de marzo de 1985 ( $M=7.8$ ). La fuente intraplaca oceánica, ubicada en el interior de la placa de Nazca, bajo el valle central, corresponde a sismos con profundidades focales intermedias (50-110 Km.). Ejemplos de este tipo de eventos son el terremoto de Chillán de 1939 y el de Punitaqui de 1997. La fuente sismogénica cortical corresponde a sismos superficiales que se producen al interior de la placa Sudamericana, tal como ocurrió con el terremoto de Las Melosas el 4 de septiembre de 1958.



**Figura 1.1:** Tipos de sismos. Perfil perpendicular a la fosa a los 33° S. Los puntos verdes corresponden a la sismicidad registrada por el Servicio Sismológico Nacional desde el año 1960. En rojo se ha marcado la posición de la fosa y de la costa.

En general, los sismos de mayor magnitud ocurren en el contacto entre las placas, por lo que la norma sismorresistente chilena se basa en los terremotos interplaca para determinar los coeficientes de seguridad estructural. Sin embargo, estudios recientes de los terremotos de Las Melosas (1958), Chumiza M=6.3 (2001), Curicó M=6.4 (2004) y Aysén M=6.2 (2007) (Campos et al., 2005; Astroza et al., 2006; Barrientos et al., 2007; Sepúlveda et al., 2008) han permitido poner en evidencia una actividad sísmica cortical relevante, que pese a no tener magnitudes muy grandes puede, por su corta distancia hipocentral, generar importantes daños a nivel local en zonas pobladas cercanas.

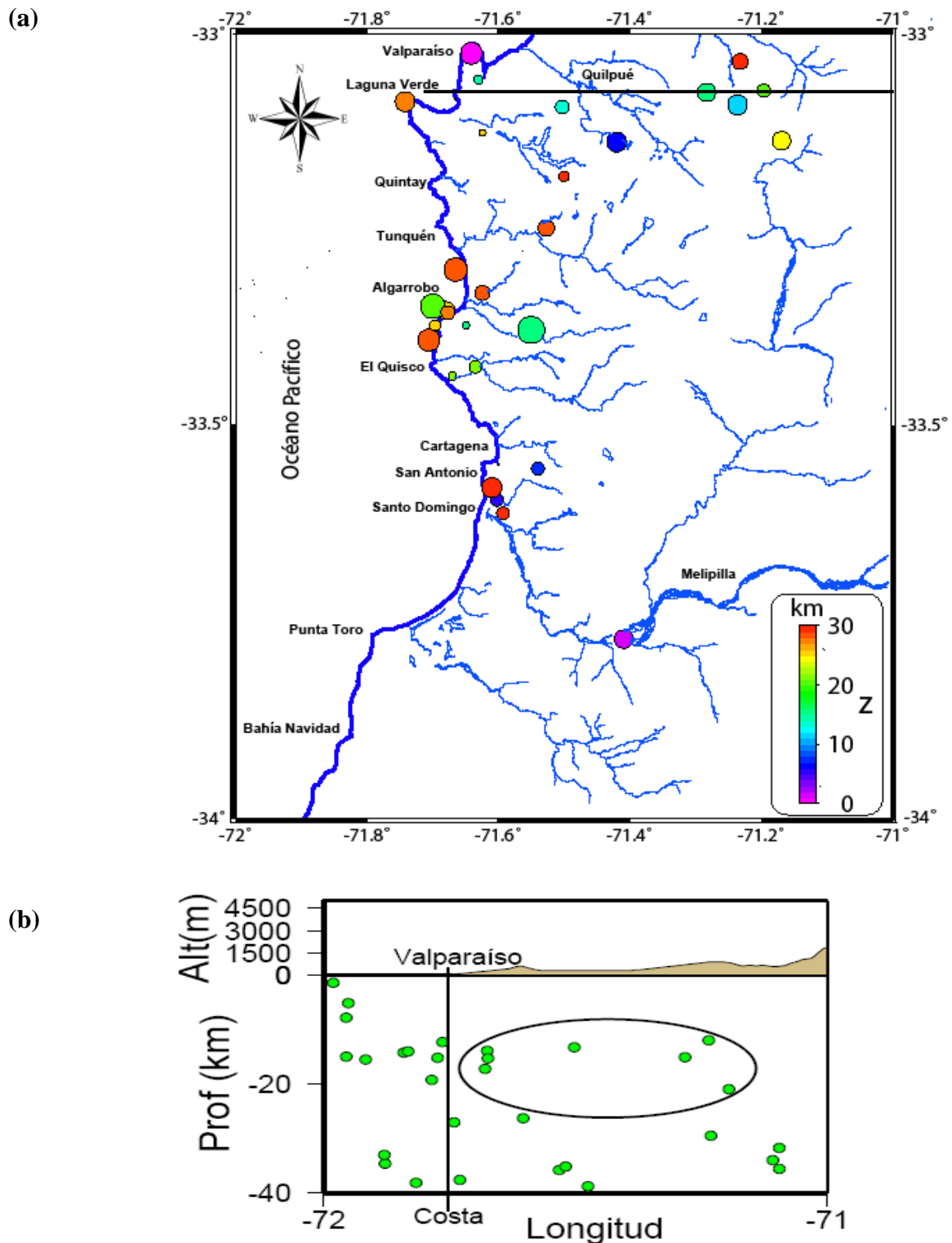
Los sismos corticales son generados por estructuras sismogénicas, que son aquellas fallas geológicas activas, que al presentar movimiento pueden generar sismicidad como reflejo del proceso de deformación frágil en la corteza. En términos geológicos una falla activa es aquella falla que ha presentado movimiento durante el régimen tectónico actual. En ingeniería geológica, en proyectos de grandes estructuras y represas, una falla activa es la que ha presentado movimiento en los últimos 10.000 años (Holoceno). Para instalaciones radiactivas este periodo se extiende por 500.000 años. (González de Vallejo, 2002). En este estudio, por ser de carácter preliminar y debido a la escala de trabajo, se consideran como fallas potencialmente activas a aquellas estructuras que coincidan con rasgos morfológicos y/o presenten evidencias de posibles movimientos post-miocenos (últimos 5,3 Ma).

Diversos estudios revelan que existen fallas potencialmente activas en la Cordillera Principal de Chile entre los 33°S y los 34°S (e.g. Rauld, 2002; Fock, 2005; Charrier et al., 2005). En particular en el sistema de Falla San Ramón, que correspondería a una falla normal invertida, se ha observado una intensa actividad sísmica localizada a lo largo de estas fallas y se le han asociado una serie de atajos (“*shortcuts*”) que se encuentran afectando a depósitos del Pleistoceno-Holoceno (Rauld, 2002).

Hacia el oeste, en regiones costeras de Chile, se han encontrado evidencias de actividad sísmica cortical, en particular, en la región costera entre Constitución y Concepción (35-37°S) (Campos et al., 2002). Además, el registro del Servicio Sismológico Nacional muestra que en la zona central, bajo la Cordillera de la Costa, existe sismicidad superficial, cuyos focos se encuentran a profundidades menores a 30 km, es decir, lejos de la zona de contacto interplaca. Esta sismicidad se podría asociar a actividad cortical como respuesta a deformaciones frágiles de la corteza continental en esta zona (Figura 1.2).

Con el fin de complementar el análisis de fallas potencialmente activas de la zona central de Chile, se estudian en este trabajo una serie de fallas que han sido reconocidas en estudios anteriores en la Cordillera de la Costa entre los 33°S y los 33°45’S (Gana et al., 1996; Wall et al., 1996). Algunas de estas fallas, así como algunos lineamientos agregados en este trabajo, pueden ser estructuras potencialmente activas y generar sismicidad. Este trabajo corresponde a un primer reconocimiento de estas estructuras, así como a una preliminar estimación de la magnitud y características de los sismos asociados a la potencial actividad cortical de la zona.





**Figura 1.2:** (a) Focos sísmicos con profundidades menores a 30 km entre los 33° y 34°S. Se observa que existe sismicidad superficial en la Cordillera de la Costa entre Valparaíso y San Antonio. El tamaño de los círculos se relaciona con la magnitud, siendo la máxima de 6.4. Sismicidad registrada por el Servicio Sismológico Nacional desde el año 2000. La línea negra corresponde al perfil en (b). (b) Perfil W-E a los 33,1°S. Los puntos verdes corresponden a los focos sísmicos. La elipse encierra los sismos con hipocentros a profundidades menores a los 20 km que se encuentran bajo la Cordillera de la Costa y que no pertenecen al contacto interplaca debido a que éste se encuentra a una profundidad promedio mayor a los 30 km en esa longitud, según el ángulo de subducción y la distancia a la fosa.

## 1.2 Ubicación y Vías de Acceso

El área de estudio corresponde a la zona de la Cordillera de la Costa comprendida entre los 33°S y los 33°45'S, entre Valparaíso y Melipilla. La ruta 68, que une Santiago con Valparaíso permite el acceso a la zona centro y norte del área de estudio mediante diversos caminos rurales que empalman con esta carretera tanto hacia el norte como hacia el sur. Mientras que el acceso a la zona sur del área de estudio se logra mediante la ruta 78 que une Santiago con San Antonio (Figura 1.3).



Figura 1.3: Ubicación y Vías de acceso. El cuadro negro encierra el área de estudio (Modificado de Turistel).

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

Identificar y caracterizar las estructuras corticales potencialmente activas en la Cordillera de la Costa de la zona de Chile Central comprendida entre los 33° y los 33°45'S.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir las potenciales fuentes sismogénicas corticales mediante la selección de fallas y lineamientos existentes en la zona.
- Caracterizar sísmicamente las fuentes corticales seleccionadas.
- Elaborar mapa preliminar determinístico de peligro sísmico asociado a las fallas potencialmente activas identificadas en la región.

## 1.4 Metodología

Para lograr los objetivos planteados se utiliza la siguiente metodología:

### **1. Determinación de potenciales fuentes sismogénicas mediante la selección de fallas y lineamientos existentes en la zona:**

Esta actividad consistió en un análisis fotogeológico con visión estereoscópica (escala 1:70.000) del sector, apoyado por la cartografía geológica (escala 1:100.000), imágenes satelitales y modelos de elevación digital (DEM). Se reconocieron escarpes y morfologías asociadas, tanto a fallas cartografiadas en los mapas existentes de la región, como a lineamientos que aunque no se encuentran cartografiados fueron incluidos como potenciales fuentes sismogénicas. También fueron consideradas potencialmente activas aquellas fallas que se encuentran afectando a rocas post-miocenas. Una vez identificadas las fuentes consideradas potencialmente sismogénicas, se describieron sus características geológicas, en particular, el largo de la traza y el tipo de falla. Para esta etapa se realizaron tres visitas a terreno que permitieron obtener datos que se asumen como puntos de control para la caracterización de las estructuras presentes en la zona de estudio. Estas visitas a terreno se realizaron los días 16, 23 y 30 de junio de 2008 (Figura 1.4).

### **2. Caracterización sísmica de las fuentes corticales seleccionadas:**

Mediante relaciones empíricas (Campbell y Bozorgnia, 2003; Wells y Coppersmith, 1994) es posible estimar las características sísmicas esperadas para cada falla a partir del largo de su traza y de su mecanismo. Estas características incluyen la magnitud máxima posible, los desplazamientos máximos y promedio que cada falla puede ocasionar, y las aceleraciones que sufrirían las rocas cercanas a estas fallas. Estas estimaciones son parte del análisis de peligro sísmico mediante la metodología determinística, que se detalla en el capítulo 5 del presente trabajo. A partir de un análisis reciente sobre el terremoto cortical de Las Melosas de 1958 (Sepúlveda et al., 2008) se estimaron algunos valores de intensidades para la zona de estudio.

### **3. Elaboración de mapa preliminar determinístico de peligro sísmico asociado a fallas potencialmente activas:**

Se confeccionó un mapa de peligro sísmico determinístico sin considerar efectos de sitio. Se utilizó como criterio la aceleración máxima horizontal (PGA) en roca asociada al máximo sismo posible en cada una de las fallas potencialmente activas. En este estudio, por ser determinístico, asociado a sismicidad cortical y de carácter preliminar, se considera, para el mismo valor de aceleración, un grado de peligro menor al que indica la escala mundial (GSHAP, 1999).



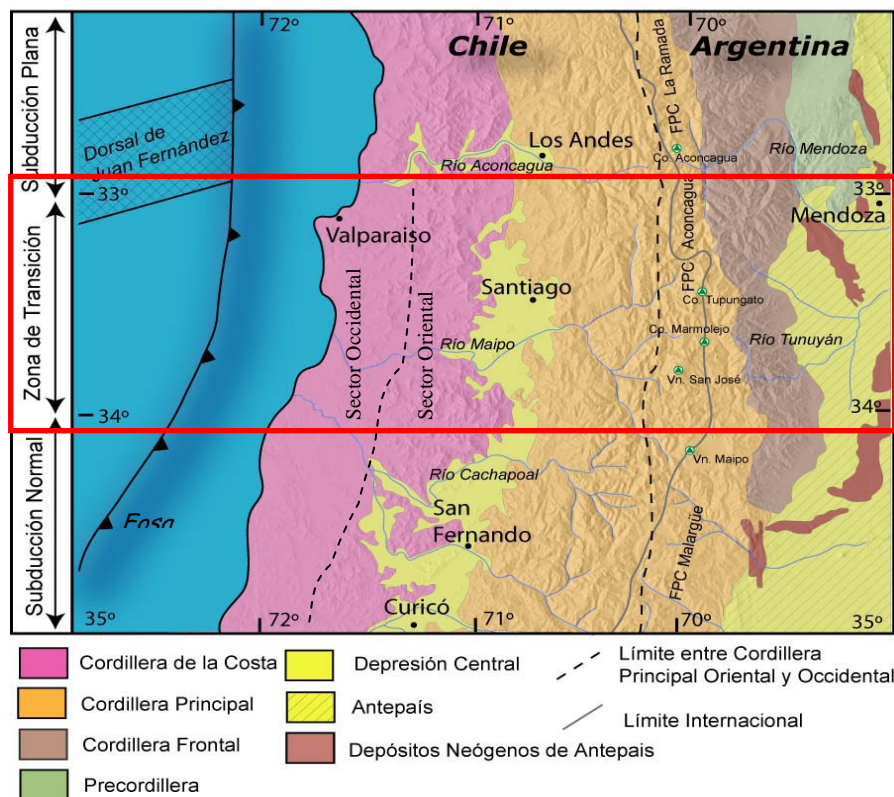
**Figura 1.4:** Rutas recorridas en terreno. Las líneas verde, roja y azul corresponden a los caminos recorridos los días 16, 23 y 30 de junio de 2008 respectivamente (imagen modificada de Google Earth).

## 2. MARCO GEOTECTONICO

### 2.1 Segmentación Morfoestructural Andina

El segmento andino comprendido entre los 33°S y los 34°S se compone de 5 unidades morfoestructurales dispuestas en franjas con orientación N-S. De oeste a este estas unidades son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Antepaís Andino. En particular, la Cordillera de la Costa se puede dividir en un sector oriental y uno occidental de acuerdo con sus rasgos morfológicos y geológicos (Figura 2.1).

Desde los 33°S hasta los 34°S se observa una zona de transición entre dos tramos del margen con geometrías y características diferentes. Estas diferencias se asocian a la presencia de la dorsal asímica de Juan Fernández que subducta a los 33°S, frente a Valparaíso. A esta latitud, tanto la fosa como la cadena andina cambian de orientación, con rumbo N-S hacia el norte y NNE-SSW hacia el sur. Esta zona ha sido denominada “Oroclino del Maipo” (Farías, 2007). Además, al norte de los 33°S ocurre una subducción plana, sin volcanismo a lo largo del orógeno desde el Mioceno Medio (Kay et al., 1991). Al sur de los 33°S se produce una notable reducción del ancho del orógeno y reaparece el volcanismo a los 33° 20'S (volcán Tupungatito) marcando el inicio del arco volcánico Holoceno, correspondiente a la Zona Volcánica Sur de los Andes. Al sur de los 34°S la subducción ya presenta las características típicas de una subducción tipo chilena (Uyeda y Kanamori, 1979; Uyeda, 1987).

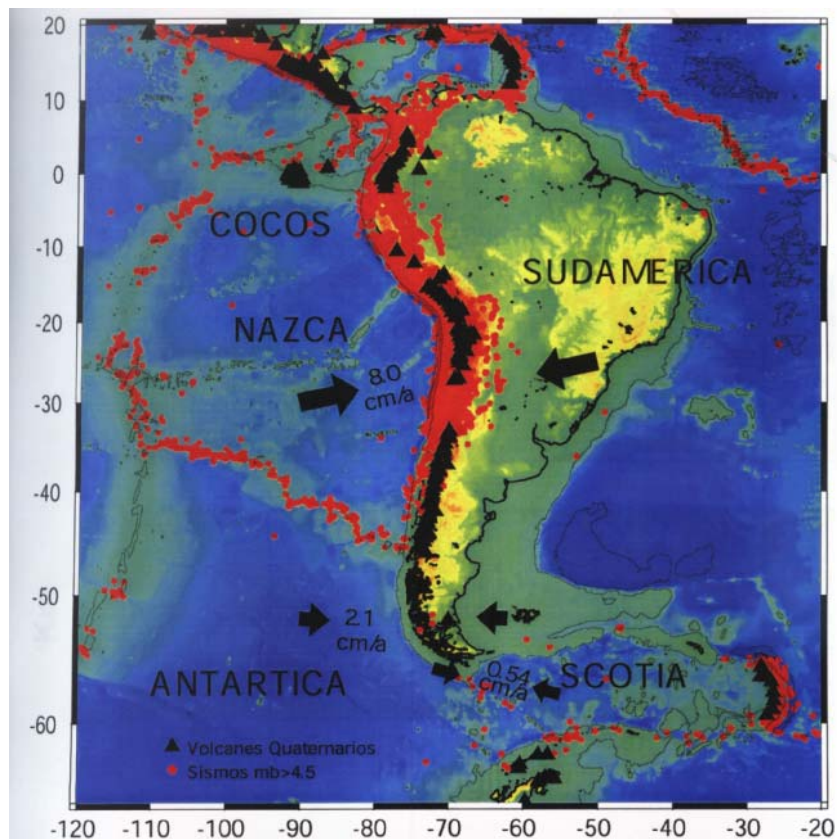


**Figura 2.1** Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32°S y 35°S. El rectángulo rojo encierra la zona de transición entre los 33°S y los 34°S. Modificado de Fock, 2005.

## 2.2 Marco Tectónico

La evolución geodinámica del margen andino en Chile Central se caracteriza básicamente por tres eventos mayores: acreción, extensión y subducción. Durante el evento acrecional sucesivos terrenos alóctonos colisionaron con el margen y construyeron el borde occidental de América del Sur hasta el Carbonífero Inferior. Durante el Pérmico Superior-Jurásico Medio, se desarrollaron grandes extensiones de orientación NW-SE que probablemente siguieron las antiguas suturas. La subducción moderna habría comenzado en el Jurásico Superior.

Los procesos de deformación ligados al orógeno andino empezaron después de la separación de la antigua placa de Farallón en las placas de Cocos y Nazca a los 25 Ma (Pilger, 1984). El cambio de ángulo y las variaciones en la velocidad de convergencia entre las placas provocaron la edificación y el levantamiento de la cadena andina y han sido responsables del máximo de la deformación durante el Cenozoico (Jordan et al., 1983). La convergencia más rápida y casi ortogonal continuó hasta al menos los 20 Ma, disminuyendo paulatinamente a lo largo del Mioceno hasta el presente, manteniéndose una oblicuidad de la placa de Nazca con respecto al margen continental (Somoza, 1998). Hace al menos 6 Ma, el ángulo de convergencia de la placa de Nazca es  $N78^{\circ} E$ , con una velocidad relativa de aproximadamente 8 cm/año (Figura 2.2) y una inclinación estimada de  $27^{\circ}$  al sur de los  $33^{\circ} S$  (Pardo et al., 2001).



**Figura 2.2** Velocidad relativa y dirección de convergencia (flechas) entre las placas de Nazca y Sudamérica. Se indica el volcanismo activo con triángulos y con círculos la sismicidad ( $mb > 4.5$ ) localizada por el ISC (*International Seismological Centre*).

En los Andes chilenos, cerca de los 27°S y entre los 32°S y los 46°S, el análisis de la deformación frágil, en rocas neógenas de la costa, a lo largo de la Depresión Central y a lo largo del sistema de falla Liquiñe-Ofqui muestra la existencia de dos eventos tectónicos: compresión E-W y particionamiento de la deformación (Lavenu y Cembrano, 1999).

El primer evento Plioceno (post 5,4 Ma y anterior a 1,6 Ma) se caracteriza por un régimen tectónico compresivo generalizado que se observa en las zonas actuales de antearco e intraarco: el esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) es de dirección E-W, el esfuerzo principal intermedio ( $\sigma_2$ ) es N-S y el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) es vertical (Lavenu et al., 2000). Posteriormente, existe una partición de la deformación con la existencia de dos estados de esfuerzo diferentes: en la faja estrecha del antearco, se observa una deformación compresiva cuyas direcciones de los esfuerzos son:  $\sigma_1 = N$  a NNE,  $\sigma_2 = E$  a ESE y  $\sigma_3$  vertical. Mientras que en el intraarco, existe una deformación transpresiva debida a un estado de esfuerzo con  $\sigma_1 = NE$ ,  $\sigma_3 = NW$  y  $\sigma_2$  vertical. (Lavenu et al., 2000).

Durante el Pleistoceno, el borde continental desde la fosa hasta la Cordillera de la Costa Occidental sufrió un alzamiento que emergió depósitos batiales miocenos (Formación Navidad) hasta por sobre el nivel del mar. Este proceso parece estar activo aún, tal como lo muestra una serie de terrazas marinas emergidas de probable edad pleistocena ubicadas a lo largo de la costa, así como una serie de *knickpoints* ubicados entre 10 a 30 km de la línea de costa (Farías, 2007). Estos movimientos verticales se han estimado como independientes del vector de convergencia y fuertemente dependientes de la morfología de la placa subducida (dorsal asísmica de Juan Fernández) y de la estructura de la placa cabalgante (Lavenu, 2006).

En San Antonio, depósitos miocenos están cortados por una terraza de abrasión a 200/250 m de altitud (Wall et al., 1996) dispuesta sobre un paleorelieve de gneises del substrato paleozoico del batolito costero. Pequeñas fallas inversas hacen cabalgar estos gneises sobre arenas pleistocenas, mientras que otras afectan a los gneises. Un análisis microtectónico de estas fallas reveló una dirección de compresión  $\sigma_1 = N185^\circ E$  (Lavenu, 2006).

Esta compresión N-S podría estar relacionada al efecto del particionamiento de la deformación que genera un desplazamiento del antearco hacia el norte, a un régimen de convergencia más lento asociado a un menor acoplamiento de las placas, a una deformación cosísmica relacionada a la partición de la deformación del conjunto del antearco y a factores geométricos del margen, entre otros. Así, las relaciones actuales y/o recientes entre la subducción, la deformación de la placa Sudamericana y la actividad sísmica son todavía poco conocidas (Lavenu et al., 2000; Lavenu, 2006).

### 3. MARCO GEOLOGICO

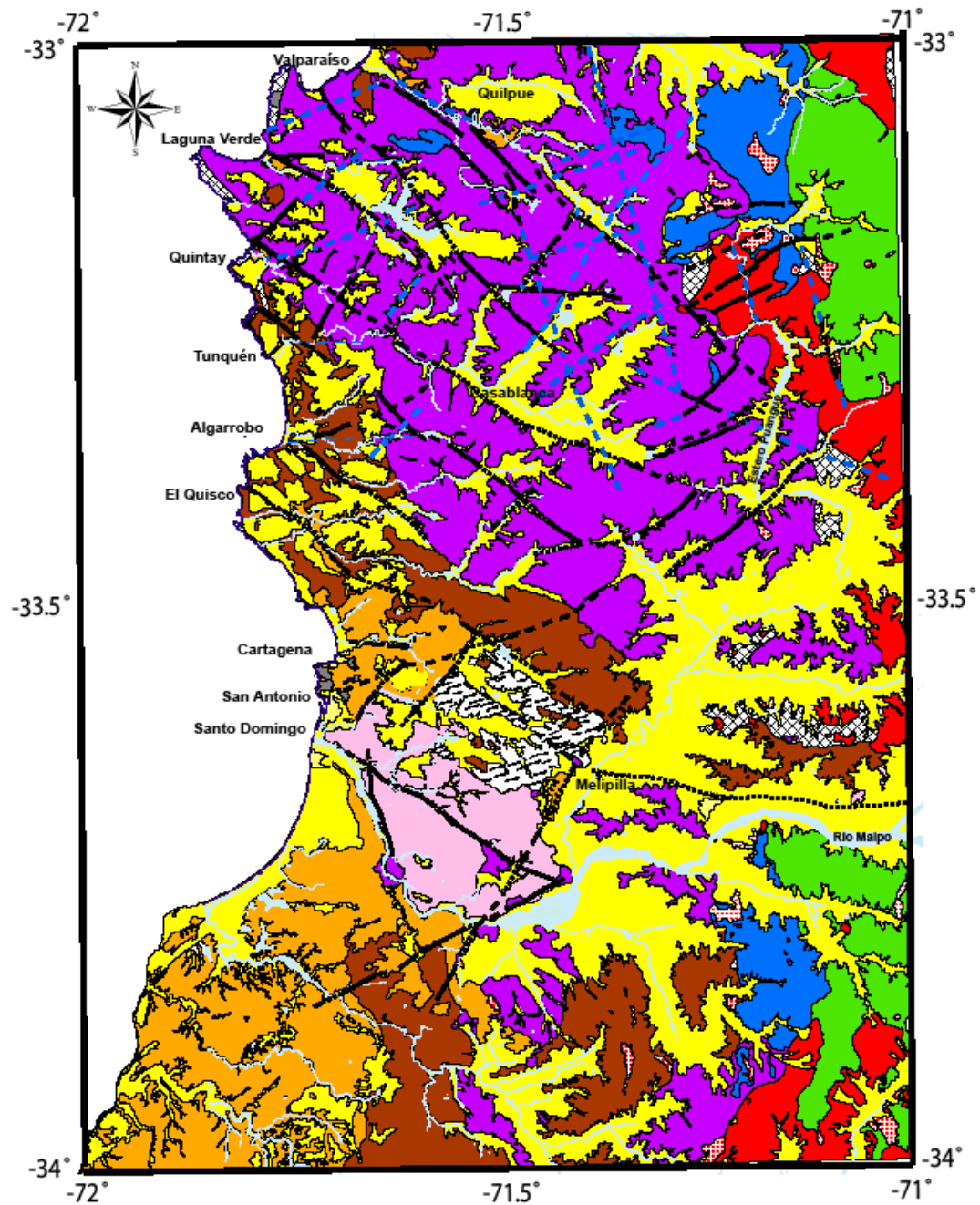
#### 3.1 Geología Regional

La geología del área de estudio se resume en la Figura 3.1. En esta zona, la Cordillera de la Costa está formada principalmente por rocas plutónicas que cubren el lapso Paleozoico Superior a Cretácico, con edades decrecientes hacia el este. Las rocas más antiguas son rocas metamórficas (Complejo Metamórfico Valparaíso) y granitoides del Paleozoico Superior. La zona está afectada por fallas NW y NE, posiblemente pre-jurásicas, que habrían controlado, en parte, el emplazamiento de los plutones jurásicos, y que posteriormente fueron reactivadas como fallas normales después del Mioceno-Plioceno (Gana et al., 2000). La Cordillera de la Costa en la región de estudio se puede dividir en un dominio occidental y uno oriental según sus características morfológicas y geológicas (Figura 3.2).















El dominio occidental presenta una morfología de relieve maduro, suave, caracterizado por varios niveles de terrazas que han sido interpretados como terrazas de abrasión marina de edad plio-pleistocenas (Gana et al., 1996) con elevaciones que fluctúan entre los 100 y los 500 m.s.n.m. (Farías, 2007). Está formada principalmente por un basamento cristalino y metamórfico paleozoico a jurásico medio. En las proximidades de la actual línea de costa, cubriendo a los intrusivos, se encuentran remanentes de rocas sedimentarias marinas del Cretácico Superior-Paleógeno (Estratos de la Quebrada Municipalidad y Estratos de Algarrobo) y depósitos marinos y continentales del Neógeno y, en parte, del Pleistoceno (Formación Navidad y Estratos de Potrero Alto). La relación de contacto entre el basamento cristalino-metamórfico y las secuencias estratificadas es fundamentalmente por medio de una amplia discordancia de erosión (Thomas, 1958). Predomina un sistema de estructuras en bloques, limitados por fallas noroeste y noreste, de desplazamiento vertical post-Plioceno sobrepuesta a un movimiento de rumbo, con rotación de bloques, que en parte, afectan a las rocas cretácicas de la Cordillera de la Costa (Gana et al., 1996). Hacia el sur, la estructura de mayor importancia regional, corresponde a la Falla Melipilla que se extiende con rumbo oeste-noroeste a lo largo del valle del río Maipo. Otras fallas de importancia regional corresponden a la Falla Puangue, la cual es interrumpida en el sector de la Cuesta Lo Encañado por otra falla paralela al curso inferior del Río Maipo (Falla Río Maipo). Ambas limitan un bloque alzado (bloque Leyda) que expone rocas básicas y graníticas deformadas y que actuó como barrera topográfica para el avance de depósitos de flujo piroclástico cuaternarios (Ignimbrita Pudahuel) (Gana et al., 1996, Wall et al., 1996).

El dominio oriental de la Cordillera de la Costa presenta un relieve abrupto y montañoso con cimas que superan los 2000 m.s.n.m., disectado por valles encajonados de dirección predominante noroeste. Está formada por rocas intrusivas del batolito cretácico, en parte jurásico, y secuencias volcano-sedimentarias del Jurásico al Cretácico Inferior (formaciones Ajial, Cerro Calera, Horqueta, Lo Prado y Veta Negra), que constituyen un bloque monoclinado inclinado hacia el este. Las estructuras principales consisten en fallas nor-noreste a noroeste y norte-sur, que en parte coinciden con la dirección de los valles encajonados, con pequeños desplazamientos de rumbo, los cuales se reconocen cuando las fallas afectan a las secuencias estratificadas. Estructuras menores, lineamientos y fallas inferidas se orientan con rumbo nor-noreste y nor-noroeste. Movimientos tectónicos, posiblemente post-pliocénicos, se manifiestan en inversiones hacia el este de la red de drenaje, como en el caso del estero Puangue (Gana et al., 1996, Wall et al., 1996).









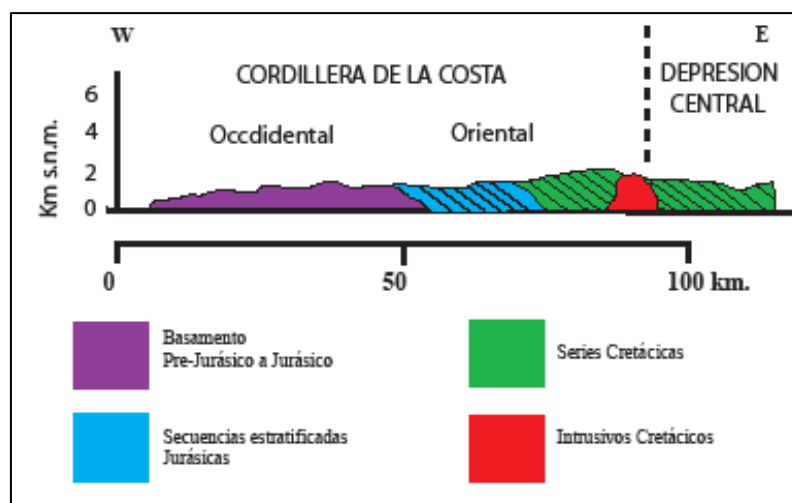
**Leyenda**

 Depósitos holoceno-pleistocenos	 Intrusivos jurásicos	 Zonas de alteración hidrotermal
 Rocas paleógeno-neógenas	 Intrusivos triásicos	 Zona de inclusiones magmáticas
 Rocas estratificadas cretácicas	 Intrusivos paleozoicos	 Zona de deformación milonítica
 Intrusivos cretácicos	 Rocas metamórficas paleozoicas	 Zona Urbana
 Rocas estratificadas jurásicas		 Lagunas y embalses

**Estructuras potencialmente activas**

-  Fallas Cartografiadas (Gana et al., 1996; Wall et al., 1996)
-  Lineamientos y fallas inferidas cartografiadas (Gana et al., 1996; Wall et al., 1996)
-  Fallas cubiertas
-  Lineamientos aportados en este trabajo

**Figura 3.1:** Mapa geológico simplificado de la Cordillera de la Costa entre los 33° y los 34°S. Se han dibujado las estructuras potencialmente activas reconocidas en este trabajo.



**Figura 3.2:** Perfil W-E esquemático y simplificado de la Cordillera de la Costa. Modificado de Farías, 2007.

A continuación se presenta un resumen adaptado al área de estudio de este trabajo, de las leyendas ampliadas correspondientes a los mapas geológicos escala 1:100.000 del área de Valparaíso-Curacaví (Gana et al., 1996) y San Antonio- Melipilla (Wall et al., 1996).

## 3.2 Depósitos y Rocas Estratificadas

### 3.2.1 Neógeno

#### **Qe. Depósitos litorales y eólicos actuales (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados de playa compuestos por arenas y gravas de bolones bien redondeados, con estratificación plana horizontal predominante y estratificación cruzada de bajo ángulo; incluye láminas arenosas negras que concentran minerales pesados; **a**: dunas activas compuestas por arenas grises o amarillas de buena selección con estratificación cruzada y ondulitas superficiales. Morfología de dunas transversales indica dirección del viento predominante hacia el NNE.

#### **Qd. Depósitos eólicos subactuales (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados de paleodunas inactivas, compuestos por arenas grises o amarillas bien seleccionadas con estratificación cruzada, cubiertos por vegetación y desarrollo urbano.

#### **Qrm. Depósitos de remoción en masa (Holoceno)**

Depósitos de movilización gravitacional correspondientes a un deslizamiento de bloques de rocas intrusivas, ubicado en la vertiente occidental del Cerro Curauma que conforman una franja paralela a la costa, entre los 100 y 150 m.s.n.m., y en su extremo norte se extiende hasta el nivel del mar (Empanan, 1974). Hacia el sur se encuentran flujos de detritos matriz-soportados y muy mal seleccionados (e.g., Cajón de Panamá, Estero de Piche). Se observan depósitos menores (no mapeables) de flujos de bloques, constituidos por bloques de rocas intrusivas en los cajones de Panamá y Lisboa (SE de Melipilla).

**Qc. Depósitos coluviales (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados, ubicados en las cabeceras de las quebradas; comprenden principalmente depósitos gravitacionales correspondientes a flujos en masa matriz-soportados de muy mala selección granulométrica, que pueden incluir desde bloques hasta arcillas, interdigitados con lentes de arenas y gravas generados por pequeños cursos de agua, permanentes o esporádicos.

**Qa. Depósitos aluviales (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados, ubicados en zonas de llanura; comprenden principalmente depósitos fluviales con depósitos gravitacionales interdigitados (flujos de barro, flujos de detritos), compuestos por gravas, arenas y limos. Hospedan placeres auríferos.

**Qf. Depósitos fluviales (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados de cursos fluviales activos. Predominan facies de relleno de canal con base erosiva, constituidas por gravas clastosoportadas, compuestas por fragmentos de rocas volcánicas e intrusivas, bolones redondeados a bien redondeados de baja esfericidad, en parte imbricados, y matriz arenosa. Incluyen, además, lentes arenosos con estratificación plana-horizontal y cruzada junto a escasos niveles de limos finamente laminados (depósitos de planicie de inundación). Hospedan placeres auríferos.

**Qfs. Depósitos fluviales subactuales (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados de cursos fluviales abandonados, compuestos por gravas, arenas y limos, con desarrollo de cubierta vegetal.

**Qfa. Depósitos fluviales antiguos (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados que conforman terrazas; compuestos por gravas, arenas y limos, ubicadas a alturas de 3-30 m con respecto al curso fluvial actual. Hospedan placeres auríferos.

**Ql. Depósitos lacustres (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados de limo, arcilla y arenas limosas, finamente laminados o macizos, que se distribuyen al este del estero Puangue, en la zona oriental del área de estudio.

**Qm. Depósitos marinos (Pleistoceno-Holoceno)**

Sedimentos no consolidados, marinos a transicionales, constituidos por limos, arenas y gravas con niveles coquinoideos. Constituyen formas aterrazadas que rellenan valles hasta 15 km hacia el E de la costa actual, a cotas que no superan los 25 m. En parte, estas formas han sido disectadas por procesos aluviales y cubiertas por sus depósitos. Depósitos de este tipo se han identificado por ejemplo, en el área de la desembocadura del Estero Yali. En Viña del Mar, sedimentos asignados a esta unidad, contienen fauna del Pleistoceno-Holoceno (Pérez, 1963; Gana et al., 1996). Hospedan yacimientos de sal común.

**Qip. Ignimbrita Pudahuel (Plioceno Superior) (Wall et al., 1996)**

Depósito de flujo piroclástico de ceniza y lapilli pumíceo, de composición riolítica, macizo, no soldado. De color blanco amarillento a pardo claro y rosado, medianamente a bien consolidado, presenta estructuras de flujo laminar matriz-soportado, constituido por una matriz de ceniza, que comprende vidrio, cristales y pómez. Localmente se aprecian estructuras traccionales con lentes y niveles con acumulaciones de líticos y pómez. Se observan pómez desde 1 mm hasta 15 cm de diámetro, con escasas biotitas. Incluye líticos accidentales, principalmente de rocas volcánicas con retrabajo fluvial e intrusivas de origen local y, esporádicamente, restos de madera carbonizada. De

amplia distribución en la Depresión Central. En el área de estudio se reconoce en el valle del estero Puangue, al sur de Curacaví, y al sur de Melipilla, donde alcanza una potencia máxima observada de 5 m. Cubre depósitos aluviales del valle y, a su vez, ha sido disectada por los cursos fluviales de los esteros Puangue, Améstica, Popeta y del río Maipo estando cubierta por sus depósitos y por conos coluviales. Esta unidad representa el producto de un evento eruptivo explosivo, proveniente de la Caldera Diamante del Complejo Volcánico Maipo, ubicada en la cordillera Andina, cuyo volumen de material eyectado se estima en 450 km<sup>3</sup> (Stern *et al.*, 1984) el que se esparció tanto hacia la Depresión Central de Chile como en Argentina. Ha sido explotada por pómez en el sector de Popeta (sur-suroeste de Melipilla).

#### **QTt. Terrazas de abrasión** (Plioceno(?)-Pleistoceno)

Unidades morfológicas de erosión marina, labradas sobre intrusivos paleozoicos y triásico-jurásicos (Pgm, TrJtv), y unidades sedimentarias y volcánicas terciarias (Tn, TQpa, Tlp), preservadas en la zona costera, a cotas variables entre los 40 y 550 m.s.n.m. Dentro de este grupo se incluyen terrazas de abrasión sin cubierta sedimentaria, terrazas con una cubierta de arenas cuarzosas, posiblemente marinas, arenas negras con acumulaciones de minerales pesados, de origen litoral, y terrazas con cubierta aluvial. Hospedan placeres auríferos, arenas silíceas y feldespatos.

#### **TQpa(a). Estratos de Potrero Alto** (Mioceno? Plioceno-Pleistoceno?) (Wall *et al.*, 1996)

Afloran en la zona suroeste del área de estudio, corresponden a depósitos sedimentarios medianamente a poco consolidados de areniscas finas pardas bien seleccionadas con estratificación cruzada de origen eólico, areniscas pardas, limolitas y conglomerados de origen aluvial (fluvial) que parcialmente cubren a la Formación Navidad, estimándose para ellas una edad pleistocena.

#### **Tn. Formación Navidad** (Mioceno- Plioceno) (Darwin, 1846, emend. Gana *et al.*, 1996)

Secuencia sedimentaria marina fosilífera, medianamente consolidada, constituida por limolitas, areniscas arcillosas, areniscas de grano muy fino a muy grueso, bancos de conglomerados, areniscas muy finas grises, bancos de coquinas y calizas. **Tn(a)**. De carácter litoral en la base, evidencia una tendencia transgresiva, presenta fuertes variaciones verticales y laterales de facies. Se dispone en contacto depositacional sobre granitoides paleozoicos y triásico-jurásicos (Pgm, Pzmg, TrJtv) y se encuentra cubierta por sedimentos eólicos, aluviales y suelos cuaternarios. De disposición general subhorizontal, posee una potencia máxima estimada de 500 m al sur del río Rapel, fuera del área de estudio (Tavera, 1979). Los estratos superiores engranan con depósitos transicionales y continentales de la unidad TQpa. Las asociaciones faunísticas de afloramientos atribuibles a la formación Navidad indican un intervalo mioceno-plioceno (Philippi, 1887). La unidad hospeda depósitos de arenas silíceas, coquinas, carbón y placeres auríferos.

### 3.2.2 Paleógeno

#### **Ta. Estratos de Algarrobo** (Eoceno medio- Eoceno superior) (Wall *et al.*, 1996).

Secuencia sedimentaria marina aflorante en la playa de Algarrobo, de muy escasa exposición por causa de desarrollo urbano. Compuesta por conglomerados finos fosilíferos, areniscas muy finas arcillosas a muy gruesas conglomerádicas, en parte fosilíferas, areniscas concrecionarias y coquinas de gastrópodos, que en conjunto indican un ambiente predominantemente litoral; Tavera (1980) le atribuyó una potencia de 95 m. Según Brüggén (1915, 1950), esta secuencia se dispone en discordancia de erosión sobre estratos cretácicos (Kqm) y su techo está truncado por una falla

normal de rumbo NNW (Quebrada El Bato, de 5 km de largo y principalmente cubierta por QTt), generando un contacto tectónico entre esta unidad y rocas intrusivas paleozoicas (Pgm). Contiene gastrópodos y bivalvos (Brüggen, 1915; Tavera, 1980).

### 3.2.3 Cretácico

**Kqm. Estratos de Quebrada Municipalidad** (Campaniano superior- Maastrichtiano) (Wall et al., 1996).

Secuencia sedimentaria marina transgresiva constituida por conglomerados, areniscas finas a medias con abundantes concreciones y areniscas finas grises (Brüggen, 1915, Tavera, 1980). La extensión areal de esta unidad es muy reducida y actualmente de escasa exposición por desarrollo urbano; está restringida al sector costero de Algarrobo, adyacente al antiguo muelle de este balneario y a la desembocadura de la Quebrada Municipalidad. Sin base aflorante, la unidad no sobrepasa los 40 m de potencia (Brüggen, 1915) y está cubierta, mediante discordancia de erosión, por los Estratos de Algarrobo (Ta). Contiene ammonites (Tavera, 1980; Ruiz et al., 1960).

**Kvn. Formación Veta Negra** (Barremiano?-Aptiano?) (Thomas, 1958)

Unidad volcánica y en parte subvolcánica. Incluye andesitas con grandes fenocristales de plagioclasa (ocoitas), lavas andesíticas porfídicas y afaníticas e intercalaciones sedimentarias continentales. Dispuesta concordantemente sobre la Formación Lo Prado (Klp), su potencia máxima estimada en la zona es de aproximadamente 3.000 m. Está intruida por rocas plutónicas del Cretácico Superior (Kdgt, Kdg) y no ha sido reconocida hacia el sur, lo que indicaría un acuñaamiento en esa dirección. Subyace hacia el este, fuera del área del mapa, a la Formación Las Chilcas (Thomas, 1958), cuyos niveles medios calcáreos son atribuidos al Albiano (Martínez-Pardo *et al.*, 1994; área de Polpaico). Hospeda vetas de cobre, oro-cobre, estratiformes de cobre y cobre-oro-plata. La formación se subdivide en los miembros Ocoa (superior) y Purehue (inferior).

- **Kvno. Miembro Ocoa:** lavas andesíticas porfídicas con grandes fenocristales de plagioclasa (ocoitas), con intercalaciones de lavas andesíticas porfídicas y afaníticas y secuencias de areniscas y conglomerados volcanoclásticos de ambiente aluvial. Alcanza una potencia máxima de aproximadamente 2.100 m.
- **Kvnp. Miembro Purehue:** secuencia volcánica andesítica con intercalaciones de tobas y andesitas ocoíticas, fangolitas, areniscas y conglomerados volcanoclásticos rojos de ambiente aluvial. Sobreyace concordantemente a la Formación Lo Prado, con una potencia máxima estimada de 900 m.

**Klp. Formación Lo Prado** (Berriasiano- Hauteriviano) (Thomas, 1958; Piracés, 1976).

Unidad sedimentaria marina con intercalaciones volcánicas, constituida por calizas, lutitas, areniscas calcáreas fosilíferas, areniscas, brechas y conglomerados, lavas, lavas brechosas y tobas de composición andesítica a riolítica. Se dispone en aparente concordancia sobre la Formación Horqueta (Jh) y subyace concordantemente, a la Formación Veta Negra (Kvn). Presenta una potencia máxima estimada de 5800 m.

Contiene bivalvos (Pérez, 1989; Covacevich, comunicación escrita, 1994) y ammonites (Covacevich, 1975; Covacevich, com. escrita, 1994; Nasi, 1981; Nasi y Thiele, 1982). Hospeda zonas de alteración hidrotermal, vetas de oro, oro-cobre, cobre, cobre-oro-plata, cobre-plata y plomo-zinc; yacimientos estratoligados de cobre y de cobre-oro-plata; 'skarns' de cobre; mantos de caliza, mármol y caliza-wollastonita. La secuencia representa depósitos acumulados en un ambiente marino litoral, contemporáneo con actividad volcánica explosiva intermedia a ácida, en

parte de carácter ignimbrítico. Su desarrollo litológico vertical, permite distinguir tres miembros, correlacionables con los miembros definidos por Piracés y Makshev (1977).

- **Klps. Miembro Superior:** 1100 m de potencia promedio. Calizas fosilíferas marinas, areniscas y conglomerados con intercalaciones de rocas volcánicas andesíticas a dacíticas; mayor presencia de rocas volcánicas hacia el sur. Hospeda la mayor parte de la mineralización, con vetas de cobre y oro-cobre, estratiformes de cobre, cobre-plata y yacimientos de caliza.
- **Klpm. Miembro Medio:** 2150 m de potencia promedio. Lavas, lavas brechosas y tobas, de composición andesítica, dacítica y riolítica e intercalaciones sedimentarias subordinadas. Hospeda vetas de cobre, oro, cobre-plata y estratiformes de cobre.
- **Klpi. Miembro Inferior:** 1970 m de potencia promedio. Areniscas, areniscas calcáreas fosilíferas marinas, lutitas calcáreas, areniscas y conglomerados y escasas intercalaciones de lavas andesíticas y dacíticas.

### 3.2.4 Jurásico

#### **Jh. Formación Horqueta** (Batoniano-Titoniano?) (Piracés, 1976)

Secuencia volcánica subaérea con intercalaciones sedimentarias continentales. Está constituida por tobas, lavas andesíticas a riolíticas, areniscas y conglomerados volcanoclásticos de color pardo rojizo de ambiente aluvial. Sobreyace concordantemente a la Formación Cerro Calera (Jc) y subyace, en aparente concordancia, a la Formación Lo Prado (Klp). Se estima una potencia máxima aproximada de 4300 m (Nasi y Thiele, 1982). Su edad relativa queda determinada por sus relaciones estratigráficas con las formaciones infra- y suprayacentes. La Formación Horqueta se encuentra intruida por granitoides jurásicos (Jllg, Jll, Jlt) y cretácicos (Kp, Kdgt, Kdp), con el desarrollo de zonas de metamorfismo de contacto relacionado a estas intrusiones. Presenta zonas de alteración hidrotermal por contactos intrusivos y zonas de fallas, hospedando vetas de cobre, de hierro, de cobre y de oro, y cuerpos mineralizados irregulares de oro y oro-cobre.

#### **Jc. Formación Cerro Calera** (Aaleniano superior?-Bajociano) (Piracés, 1976)

Secuencia predominantemente sedimentaria marina y transicional, constituida por limolitas y areniscas calcáreas, areniscas y conglomerados volcanoclásticos, areniscas y conglomerados cuarzo-feldespáticos e intercalaciones de tobas. Sobreyace concordantemente a la Formación Ajial (Ja) y esta cubierta, también concordantemente por la Formación Horqueta (Jh); su base, en parte, sobreyace con contacto depositacional a intrusivos paleozoicos (Pzmg) y, en parte, está intruida por granitoides del Jurásico (Jlt) y Cretácico (Kdgt), observándose extensas áreas de alteración hidrotermal. Se estima una potencia máxima de 860 m. Contiene bivalvos, ammonites y escasos gastrópodos, crinoídeos y vermes. Hospeda mineralización tipo 'stockwork' y estratiforme de cobre.

#### **Ja. Formación Ajial** (Pliensbachiano?-Aaleniano?) (Thomas, 1958; Piracés, 1976)

Lavas andesíticas y tobas con intercalaciones de areniscas y lutitas de ambiente esencialmente continental. Cubierta en concordancia por la Formación Cerro Calera (Jc) y sin base expuesta; gran parte de esta unidad se encuentra afectada por metamorfismo de contacto, causado por intrusivos jurásicos (Jlt, Jllg, Jll). Al norte, en la zona de La Ligua, fuera del área de estudio, sobreyace concordantemente a rocas que contienen faunas del Pliensbachiano (Covacevich, comunicación escrita, 1993). En el sector de Morro Alto de Piedra (10 km al este-sureste de Valparaíso), afloran rocas metamórficas de contacto con su textura original totalmente obliterada, que sólo por su posición geográfica se incluyeron en la Formación Ajial.

### **Ja-h. Formaciones Ajial y/u Horqueta indiferenciadas**

En el área de Colliguay (zona norte del área de estudio) se reconocen extensos afloramientos de rocas metamórficas de contacto relacionadas a la intrusión de granitoides jurásicos (Jll, Jlt) y zonas de deformación tectónica que se han asignado a las formaciones Ajial y/u Horqueta indiferenciadas. Hospedan zonas de alteración hidrotermal, vetas de oro y un 'stockwork' de oro-cobre.

## **3.3 Rocas Intrusivas**

### **3.3.1 Cretácico**

**Kd.** Complejo plutónico de dimensiones batolíticas, emplazado en el sector oriental de la zona de estudio, con edades entre los 118 y 91 Ma. Composicionalmente muestra una amplia variación, desde granodioritas a gabros, con pórfidos andesíticos subordinados. Estas rocas (**Kdga, Kdgt, Kdp, Kdg y Kb**) han sido citadas como pertenecientes a la unidad La Dormida (Gana *et al.*, 1994).

**Kp.** Granodioritas de anfíbola-biotita, tonalitas y monzodioritas cuarcíferas subordinadas. Rocas de color gris medio a verdoso claro, de grano grueso a medio, con abundantes inclusiones dioríticas. Aflora en el sector oriental del área de estudio como un cuerpo irregular de 16 km de longitud por 12,5 km de ancho, afectado por fallas de dirección noreste; presenta alteración epidota-sílice-Fe-argílica cerca del contacto con estratos del Jurásico y Cretácico Inferior (Jh y Klp) en el sector de Colliguay. Contacto con leucogranitos del Jurásico (Jll), existiendo a lo largo de él una zona de enclaves magmáticos dioríticos (Los Canelillos). Intruido por 'stocks' gábricos asignados al Cretácico (Kdg) y por diques andesíticos y dioríticos. Edad K-Ar en biotita: 118 Ma (Corvalán y Munizaga, 1972). Hospeda mineralización vetiforme de oro, de oro-cobre y fierro. Estas rocas han sido citadas como pertenecientes a la unidad Puangue (Gana *et al.*, 1994).

### **3.3.2 Cretácico y/o Jurásico Indiferenciado**

**JKp.** Pórfido andesítico de anfíbola. Rocas color gris medio verdoso, con fenocristales de plagioclasa y anfíbola, en una masa fundamental fuertemente alterada, de textura intergranular, formada por plagioclasa, cuarzo, anfíbola y gránulos opacos. Conforman un plutón circular de 600 m de diámetro que aflora al noreste de Melipilla, asociado a vetas de cuarzo y en contacto con zonas de enclaves magmáticos e intruyendo a granitoides Pzmg. Hospeda mineralización vetiforme de cobre.

**JKgb.** Gabros y hornblenditas de piroxeno. Rocas gris oscuras, frescas, grano medio a fino. Corresponden a 'stocks' circulares de 700-500 m de diámetro, que intruyen a granitoides paleozoicos y se asocian a zonas de enclaves magmáticos (oeste y noroeste de Pomaire). Hospeda mineralización de mica blanca en pegmatita al norte de Melipilla y se explota en canteras de roca/maicillo.

### **3.3.3 Jurásico**

Extensos afloramientos de rocas plutónicas de edad cercana a los 160 Ma. Incluyen una serie de cuerpos de litología variable entre gabros y leucogranitos, que muestran una distribución zonada en sentido oeste-este. La mayor parte constituye plutones heterogéneos o compuestos, que si bien pueden repetir litologías, el predominio de unas u otras definen una asociación cartográficamente

identificable. Estas corresponden a las unidades Lliu-Lliu (**Jll, Jlg**), Limache (**Jlg, Jlt**), Peñuelas (**Jpgb, Jpg, Jp**), Sauce (**Js**) y Laguna Verde (**Jlv**) citadas en anteriores trabajos (Gana *et al.*, 1994).

#### 3.3.4 Jurásico-Triásico

**TrJtv.** Sienogranitos de biotita y monzogranitos de biotita y anfíbola. Afloran en la zona sur del área de estudio, al borde del río Maipo. Son rocas de color gris claro a amarillento-rosáceo, de grano medio a fino, con frecuente deformación cataclástica. Son plutones alargados, que muestran contactos graduales con granitoides paleozoicos (Pzmg) y están cortados por ‘stocks’ monzodioríticos a granodioríticos del Jurásico (Jp). Hospedan vetas de cuarzo y cuarzo-feldespatos.

#### 3.3.5 Triásico

**Trca.** Dioritas gnéicas de Cartagena (Wall *et al.*, 1996).

Dioritas gnéicas, anfibolitas, dioritas, dioritas cuarcíferas y gabros parcialmente metamorfizados. Rocas de color gris oscuro a negro verdoso, grano fino a medio. Presentan foliación gnéica de orientación oeste-noroeste con inclinación hacia el sur, y están afectadas por milonitización coplanar con la foliación gnéica, conteniendo una lineación mineral. Las fábricas señaladas están cortadas por zonas discretas de cizalle plástico (milonítico) de dirección nor-noroeste semivertical (Cartagena, Lo Abarca) (M.Martin, com. escrita, 1994). Constituyen un plutón de exposición continua entre los esteros Cartagena y El Sauce. Intruyen a granitoides del Paleozoico Superior (Pzmg) (Gana *et al.*, 1996).

#### 3.3.6 Paleozoico

**Pzmg.** Tonalitas y granodioritas, monzogranitos de anfíbola-biotita, sienogranitos y granitos de microclina y pegmatitas de microclina-cuarzo-epidota-biotita, subordinadas.

Las tonalitas y granodioritas son rocas de color gris medio, verdoso, grano grueso a medio, con inclusiones dioríticas a diorítica cuarcíferas, dispuestas paralelamente a la foliación magmática de la roca albergante, y que pueden constituir hasta el 50% de ésta (Isla Negra, Rocas de Santo Domingo, Siña, 1987). Presentan foliación magmática, afectada por foliación tectónica no homogénea evidenciada por zonas miloníticas que contienen una lineación mineral de extensión (Mirasol, Punta Talca). Los tipos monzograníticos presentan variedades gnéicas y porfídicas. Los sienogranitos y granitos de microclina son rocas de color rosado y se asocian a pegmatitas de microclina-cuarzo-epidota-biotita (Quebrada San Jerónimo, El Quisco).

Forman plutones alargados e irregulares que contienen enclaves metamórficos de ortogneises y paragneises de edad paleozoica (Pzm) (Quintay, Caleta Las Cruces). Están intruidos por diques básicos foliados, cuerpos básicos (Trca) y granitoides de edad triásica superior, jurásica y cretácica, con formación de zonas de enclaves magmáticos. Hacia el norte, estas rocas corresponden a la unidad Mirasol citada en trabajos anteriores (Gana *et al.*, 1994); hacia el sur, hospedan mineralización vetiforme de oro, cobre y cuarzo, y el yacimiento de arcilla de Pomaire. Se explota como roca/maicillo en numerosas canteras.

**Pzp.** Granitos porfídicos de microclina y biotita, y pórfidos tonalíticos de biotita y anfíbola. Son rocas mesocráticas, de grano grueso y textura porfídica. Presentan foliación magmática y tectónica de rumbo noroeste. Afloran al sur del área de estudio formando un plutón de 10 km de



largo en Morro del Guanaco y plutones menores de 2,5 a 1,5 km de largo, al sur de Leyda. Se encuentran intruidos por plutones jurásicos y parcialmente afectados por una zona de deformación milonítica en las cercanías de Leyda. Hospeda vetas de cuarzo.

### 3.4 Rocas Metamórficas

**Pzmv Complejo Metamórfico Valparaíso** (Paleozoico Superior) (Gana et al., 1996).

Rocas metamórficas foliadas, de protolito principalmente plutónico y, sedimentario en menor proporción. Afloran como enclaves de longitud inferior a 2 km dentro de los complejos intrusivos de la zona costera. Intruidas por granitoides paleozoicos, con los que presenta en parte contacto gradual (Quintay, Las Cruces), y gabros jurásicos al este de Valparaíso (Caleta Las Docas). Incluye ortogneises graníticos, tonalíticos de biotita y migmatitas. Foliación principal noroeste-oeste con manteos hacia el sur; pliegues similares de longitud de onda métrica a decamétrica con pequeñas zonas de cizalle dúctil que transponen la foliación principal (Las Cruces). Los enclaves metasedimentarios están inyectados por numerosas vetillas graníticas, de desarrollo ptigmático (Martín, comunicación escrita, 1994). Las rocas de este complejo fueron originalmente descritas bajo el nombre de Formación Quintay por Corvalán y Dávila (1963-1964, in Corvalán y Munizaga, 1972).

**PzTrmv Complejo Metamórfico Valparaíso** (Paleozoico Superior?-Triásico Superior?) (Gana et al., 1996).

Gneises tonalíticos de biotita, gneises porfiroblásticos de microclina y migmatitas, con intercalaciones de anfibolitas. Son rocas de color gris claro a medio y rosáceo, excepto las anfibolitas, gris oscuras verdosas de grano medio a fino y protolito ígneo intrusivo. Afloran entre Cartagena y norte de San Antonio. Están intruidos por diques leucocráticos y pegmatitas de microclina. Deformados en amplios pliegues mesoscópicos. Localmente desarrollan fábricas miloníticas coplanares con las gnéisicas, orientadas noroeste a este-oeste y manteos de 30-45° al sur, conteniendo una lineación de extensión. Diques y vetillas leucocráticas y bandas de cizalle cortan las fábricas gnéisicas, así como diques máficos afaníticos de rumbo este-oeste. (M. Martín, comunic. escrita, 1994). Las intercalaciones anfibólicas presentan continuidad areal con las Dioritas gnéisicas de Cartagena. Las rocas de este complejo fueron originalmente descritas bajo el nombre de Formación Quintay por Corvalán y Dávila (1963-1964, in Corvalán y Munizaga, 1972).

**Pzm. Estratos de El Paico** (Paleozoico Superior) (Wall et al., 1996)

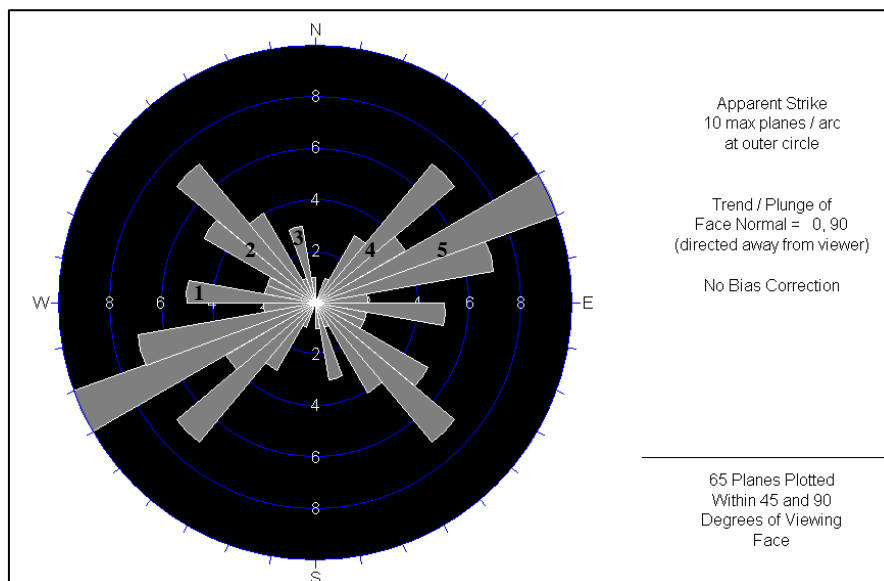
Rocas metamórficas intruidas por granitos paleozoicos (Pzmg). Su mayor exposición ocurre en la localidad de El Paico, al sureste del área de estudio, correspondiendo a esquistos de protolito sedimentario y tobáceo, con textura foliada crenulada, ocelar y, en parte, cataclástica. Están afectadas por alteración hidrotermal sobreimpuesta, con formación de biotita secundaria, sericita, illita y caolinita, tanto en las rocas metamórficas como en los intrusivos paleozoicos. En la zona de Pomaire afloran como xenolitos de decenas de m<sup>2</sup> de tamaño en las rocas graníticas paleozoicas (Pzmg) y están constituidos por metareniscas cuarzofeldespáticas con estructuras sedimentarias preservadas compuestas por muscovita y biotita metamórfica semiorientada y cúmulos de granate almandínico en la zona de contacto con el granito. Por sus relaciones con los intrusivos que la cortaron, se infiere una edad mínima paleozoica superior. Anteriormente citadas como parte de la Formación El Cajón (Corvalán y Dávila, 1963-64, in Corvalán y Munizaga, 1972).

## 4. ESTRUCTURAS POTENCIALMENTE ACTIVAS

La zona de estudio se encuentra afectada por fallas principalmente NW y NE, posiblemente prejurásicas, reactivadas después del Mioceno-Plioceno (5,3 Ma) (Gana et al., 2000). Además de estas estructuras que han sido reconocidas en estudios anteriores y que se encuentran en la cartografía geológica (Gana et al., 1996; Wall et al., 1996) se identificaron en este trabajo una serie de fallas y lineamientos mediante el análisis de fotografías aéreas, imágenes satelitales y observaciones en terreno. De todas las estructuras reconocidas en el área de estudio, se consideran como potencialmente sismogénicas a aquellas fallas y lineamientos que coinciden con rasgos morfológicos y/o se encuentran afectando a rocas o depósitos post-miocenos.

Algunos mapas de peligro sísmico consideran como fallas potencialmente dañinas a aquellas con traza mayor a 10 km ya que éstas son capaces de generar un terremoto de magnitud 6 con efectos importantes hasta una distancia de 10 km de la falla (Departamento de Transportes de California, “Caltrans”). Algunas excepciones se hacen cuando pequeñas fallas pueden afectar zonas de interés (Mualchin, 1996). En este estudio se consideran como fallas potencialmente dañinas a aquellas con traza mayor a 5 km debido a que corresponde a una zona muy poblada y de gran interés económico para el país. Trazas menores a 5 km se consideran sólo cuando corresponden a segmentos pertenecientes a una estructura mayor.

Para la caracterización de las estructuras identificadas en la zona de estudio, que por su expresión morfológica y datos de terreno se consideran como fallas potencialmente activas, se clasifican en 5 sistemas estructurales de orientaciones (1) E-W, (2) NW, (3) NNW, (4) NNE y (5) NE. Las direcciones NW y NE predominan y destacan coincidiendo en gran medida con la morfología del sector (Figuras 4a, 4b). El listado de estas estructuras se detalla en la Tabla 1.



**Figura 4a:** Roseta de fallas potencialmente sismogénicas en el área de estudio. El gráfico se realizó a partir de 65 datos de rumbos obtenidos en este trabajo (ver Tabla 1). Se observan dos direcciones principales, una NW y otra NE. Para la caracterización de cada una de estas estructuras se las clasificó en 5 sets que se muestran con números negros en la figura. Set 1: estructuras E-W (Capítulo 4.1); Set 2: estructuras NW (Capítulo 4.2); Set 3: estructuras NNW (Capítulo 4.3); Set 4: estructuras NNE (Capítulo 4.4) y Set 5: estructuras NE (Capítulo 4.5).

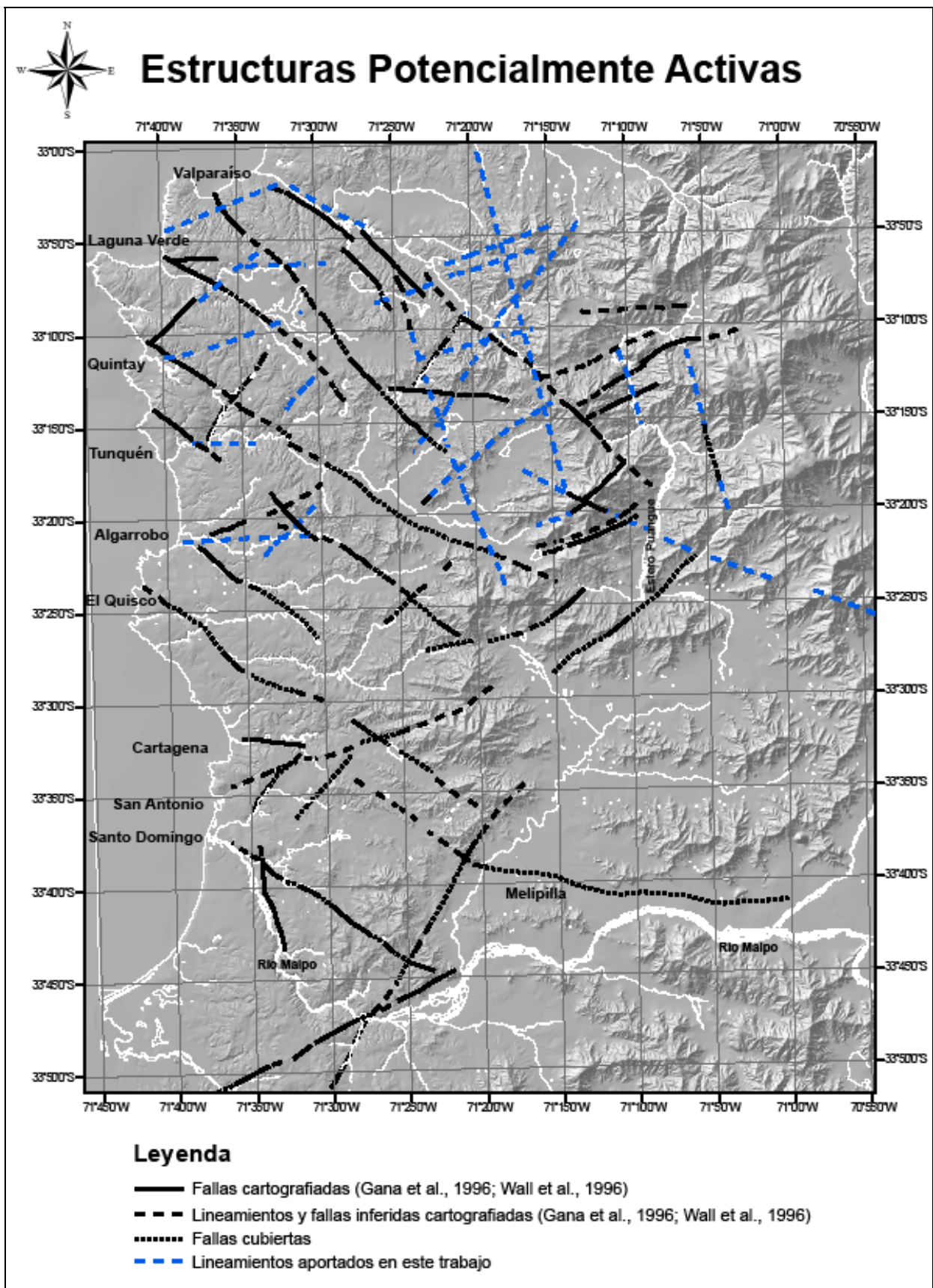


Figura 4b: Fallas y lineamientos identificados en la zona de estudio considerados potencialmente activos.

**Tabla 1:** Datos Roseta (N: falla normal; R: falla de rumbo; RD: falla de rumbo dextral; RS: falla de rumbo sinistral; ND: mecanismo no determinado).

Set 1: E-W	N°	Nombre	L (km)	Tipo	Dip	DipDir
Rumbos entre 80°-90° y 270°-280° Descritas en el Capítulo 4.1	1.1	Placilla	5,3	N	90	0
	1.2	Placilla	8,1	N	90	175
	2	Estero Casablanca	6,3	ND	90	5
	3	Estero El Membrillo	13,2	ND	90	0
	4	Embalse Lo Orozco	13,1	RS	90	190
	5.1	Colliguay Norte	9,0	ND	90	175
	5.2	Colliguay Norte	1,5	ND	90	0
	6	Cartagena	6,0	N	90	190

Set 2: NW	N°	Nombre	L (km)	Tipo	Dip	DipDir
Rumbos entre 290° y 320° Descritas en el Capítulo 4.2	1.1	Marga-Marga	9,8	N	90	30
	1.2	Marga-Marga	7,8	RS	90	50
	1.3	Marga-Marga	9,2	ND	90	50
	1.4	Marga-Marga	31,4	ND	90	45
	1.5	Marga-Marga	8,4	N	90	40
	2.1	Valparaíso	7,7	N	90	50
	2.2	Valparaíso	27,0	RD	90	50
	3	Laguna verde	23,4	N	90	40
	4.1	Valparaíso-Curacaví	17,3	ND	90	40
	4.2	Valparaíso-Curacaví	30,5	ND	90	30
	5	Los Locos	8,5	ND	90	40
	6.1	Embalse Purísima	6,8	N	90	45
	6.2	Embalse Purísima	22,6	R	90	35
	7	San Jerónimo	15,1	R	90	40
8	Pino Mar	42,7	N	90	35	
9	Cerro Peumol NW	38,7	ND	90	25	
10	Melipilla oeste	48,3	N	90	35	
11	Estero Ñanco	25,4	ND	90	25	

Set 3: NNW	N°	Nombre	L (km)	Tipo	Dip	DipDir
Rumbos entre 335° y 350° Descritas en el Capítulo 4.3	1	Río Maipo	10,9	N	90	65
	2	Cordón Los Amarillos	32,8	RS	90	70
	3	Estero Aranda	35,3	ND	90	75
	4	Estero Puangue	7,8	ND	90	70
	5	Sector Estero Carén	16,0	ND	90	80

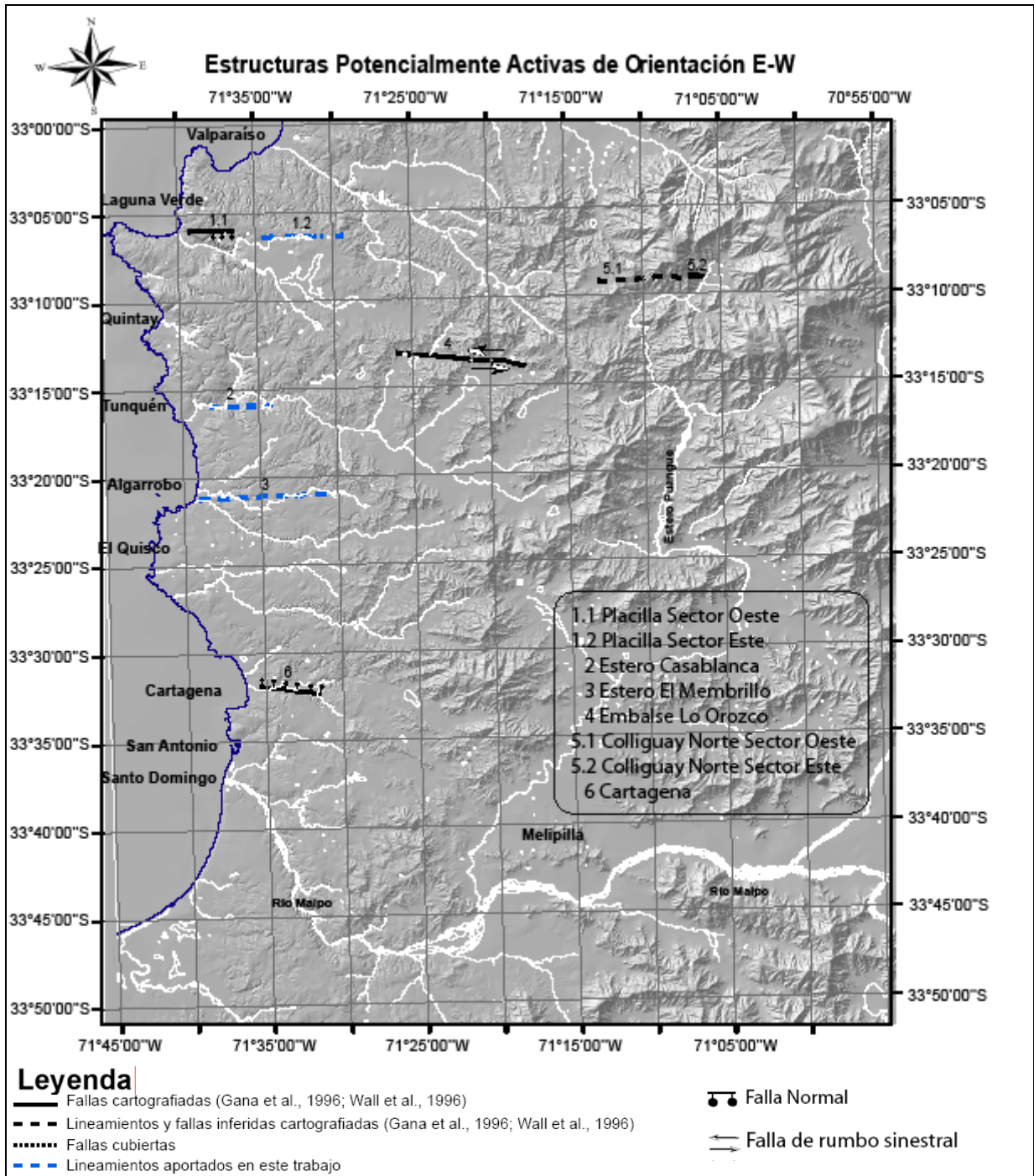
**Tabla 1 (Continuación):** Datos Roseta (N: falla normal; R: falla de rumbo; RD: falla de rumbo dextral; RS: falla de rumbo sinistral; ND: mecanismo no determinado).

Set 4: NNE	N°	Nombre	L (km)	Tipo	Dip	DipDir
Rumbos entre 20° y 45° Descritas en el Capítulo 4.4	1.1	Las Melosillas	3,7	ND	90	110
	1.2	Las Melosillas	6,0	ND	90	120
	2	Quebrada El Membrillo	5,2	ND	90	130
	3	Estero Orozco	9,7	ND	90	125
	4	Lo Ovalle	28,0	ND	90	120
	5	Embalse La Arena	8,0	ND	90	130
	6	Estero El Sauce	7,5	ND	90	130
	7	Esteros de Cartagena	11,2	ND	90	135
8	Falla Puangue	36,0	N	90	130	

Set 5: NE	N°	Nombre	L (km)	Tipo	Dip	DipDir
Rumbos entre 45° y 75° Descritas en el Capítulo 4.5	1	Embalse El Críquet	12,3	ND	90	155
	2.1	Quintay norte	6,3	ND	90	135
	2.2	Quintay norte	8,0	ND	90	140
	3	Lago Peñuelas	15,2	ND	90	155
	4	Quebrada Las Raíces	12,2	ND	90	165
	5	Embalse Los Leones	12,5	ND	90	160
	6	Las Palmas	16,5	ND	90	150
	7	Sector Estero Carrizo	11,7	ND	90	160
	8	Sector Embalse Perales	16,4	N	90	145
	9.1	Colliguay	13,0	ND	90	150
	9.2	Quebrada Grande	2,4	ND	90	150
	9.3	Quebrada Grande	4,9	ND	90	155
	9.4	Quebrada Grande	10,8	ND	90	150
	9.5	El Pangue norte	8,3	ND	90	150
	10	Lagunillas	9,2	ND	90	135
	11.1	Cerro El Peumol NE	5,4	ND	90	150
	11.2	Cerro El Peumol NE	5,6	ND	90	140
12	Estero Mauco Norte	10,9	RD	90	160	
13	Estero Mauco Sur	10,2	ND	90	160	
14.1	Cuesta Ibacache	4,5	ND	90	165	
14.2	Cuesta Ibacache	11,4	ND	90	150	
15	San Antonio	28,6	ND	90	160	
16	Quebrada Quihuilca	18,5	ND	90	140	
17	Estero Yali	28,3	N	90	150	

#### 4.1 Sistema E-W

Corresponde a estructuras con rumbos entre 80°-90°, y entre 270°-280° (Figura 4a, Tabla 1). Son, en general de corta extensión, por lo que muchas quedan fuera de este estudio (Figura 4.1).



**Figura 4.1:** Fallas y lineamientos potencialmente activos identificados en la zona de estudio, pertenecientes al sistema de estructuras E-W.

A continuación se describen las estructuras de orientación E-W que se consideran potencialmente sismogénicas (Figura 4.1).

## 1 Placilla

Estructura formada por dos tramos cuyas características se detallan a continuación:

**1.1 Sector Oeste:** en el mapa geológico de Gana et al., 1996, en las cercanías de Laguna Verde se observa una falla normal que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlv) de orientación este-oeste y 5,3 km de largo (Figura 4.1). Ha sido observada a lo largo de 2,5 km controlando la morfología del borde norte de una terraza de abrasión marina (QTt), correspondiendo ésta al bloque hundido con respecto a rocas intrusivas jurásicas (Js).

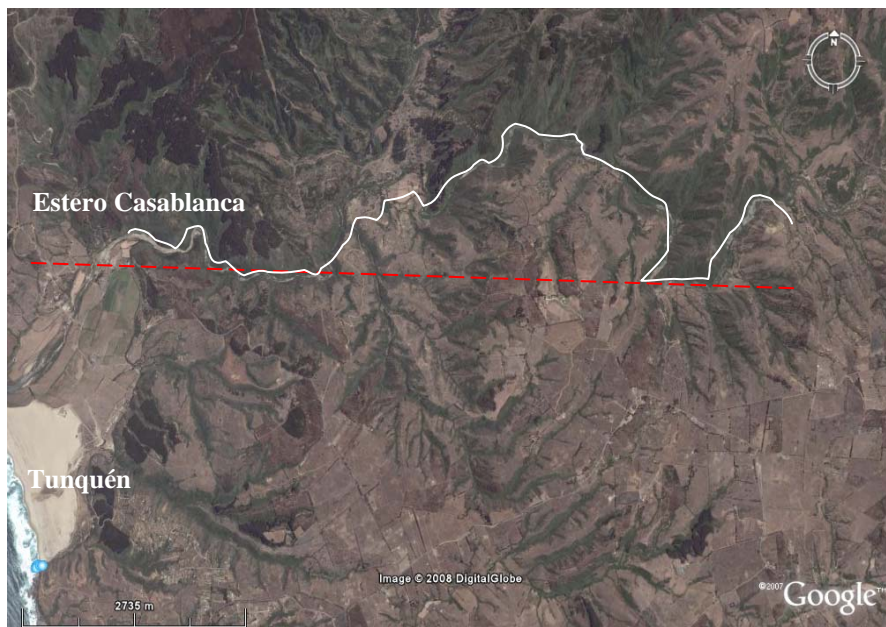
**1.2 Sector Este:** en fotografías aéreas e imágenes satelitales, en las cercanías de Placilla (Figura 4.1) se observa un lineamiento formado por escarpes en rocas que según el mapa geológico de Gana et al. (1996) corresponderían a rocas intrusivas jurásicas (Js y Jp). Este lineamiento, de orientación N85°E, se distingue a lo largo de 8,1 km al noreste de Placilla (Figura 4.2) y, para el análisis de peligro sísmico, se considera como una falla de mecanismo normal debido a que se observa como la continuación hacia el este del tramo 1.1.



**Figura 4.2:** Lineamiento formado por escarpes correspondiente al tramo 1.2 observado en las cercanías del embalse Las Cenizas, al este de Placilla. Imagen tomada de *Google Earth*.

## 2 Estero Casablanca

En fotografías aéreas e imágenes satelitales se observa, en las cercanías de Tunquén (Figura 4.1), un lineamiento de 6,3 km con orientación  $N85^{\circ}W$  formado por escarpes en rocas intrusivas paleozoicas (Pzmg) y jurásicas (Js) (Gana et al., 1996) que controla el curso del estero Casablanca (Figura 4.3).

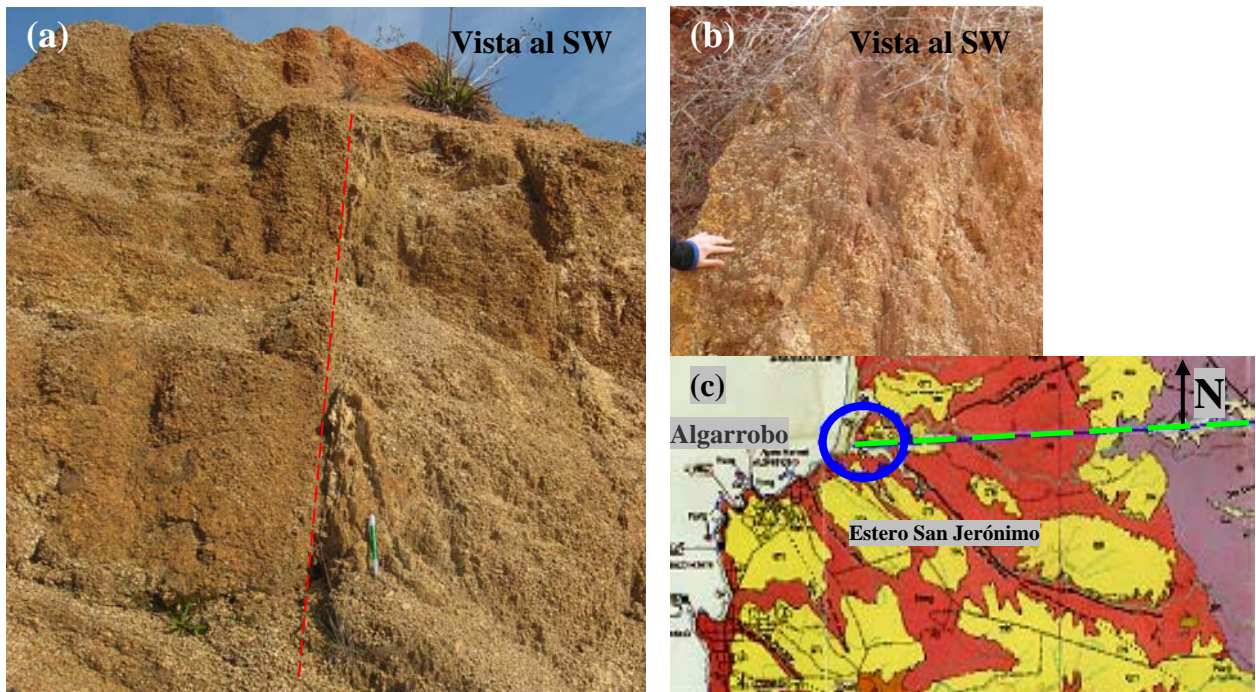


**Figura 4.3:** La línea roja segmentada marca el lineamiento formado por escarpes y que se encuentra controlando el curso del estero Casablanca (línea blanca) en dos zonas cercanas a su desembocadura. Imagen modificada de *Google Earth*.



### 3 Estero El Membrillo

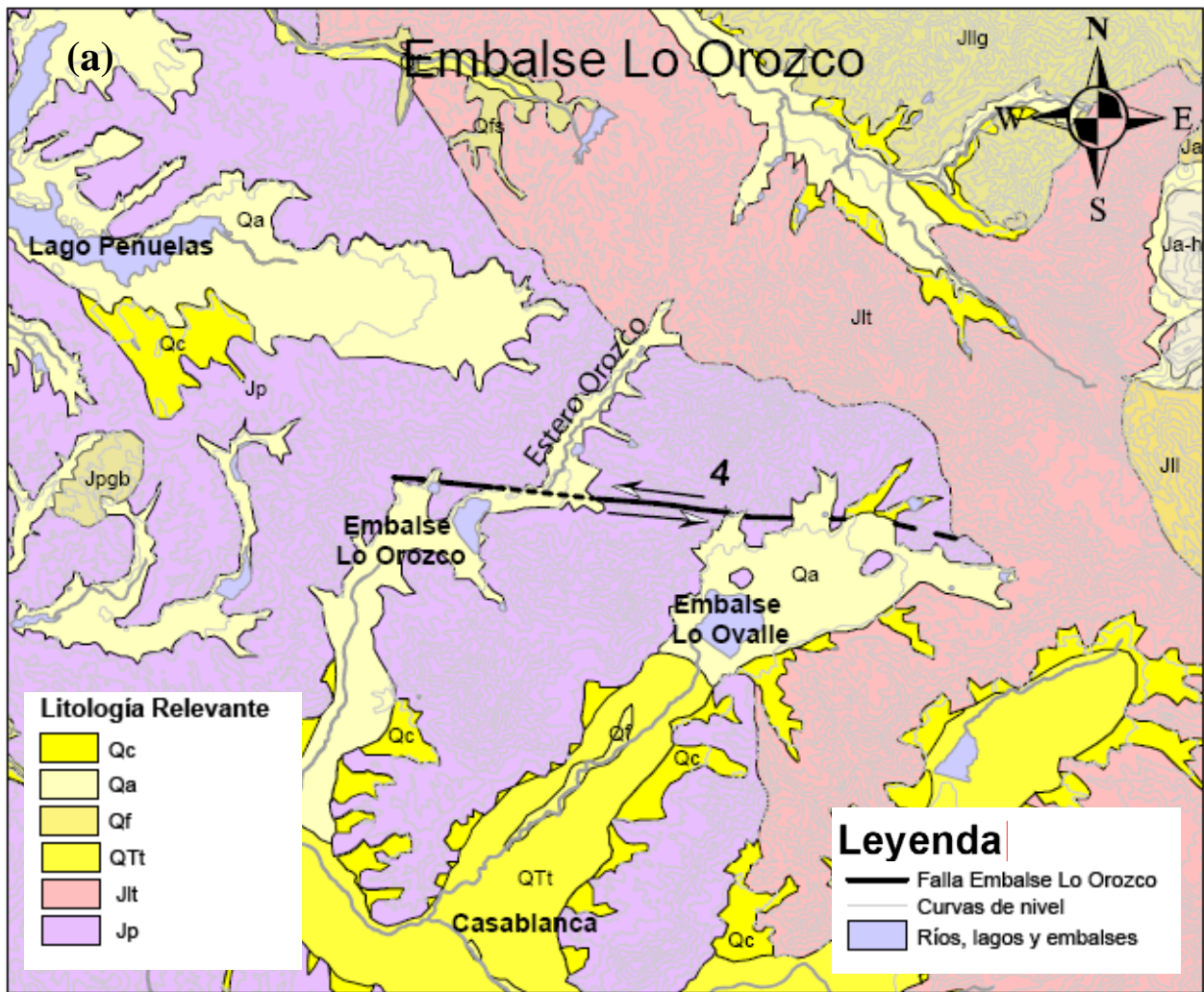
En fotografías aéreas e imágenes satelitales a la latitud de Algarrobo (Figura 4.1), se observa un lineamiento formado por escarpes en rocas, que según el mapa geológico de Gana et al. (1996) corresponden a intrusivos paleozoicos y jurásicos (Pzmg y Jp). Este fotolineamiento se reconoce a lo largo de 13,2 km con orientación E-W. En terreno, en la quebrada del estero San Jerónimo se observó una zona de deformación frágil en roca intrusiva, donde se midieron estructuras subverticales con rumbos entre 280° y 290° (Figura 4.4).



**Figura 4.4:** (a y b) Estructuras subverticales de rumbo E-W observadas en intrusivos en la quebrada del estero San Jerónimo en las cercanías de Algarrobo. El objeto verde en el centro de la fotografía (a) corresponde a un lápiz de 15 cm. (c) Mapa de ubicación. El círculo azul muestra la ubicación del punto de control de la estructura 3, que corresponde a la línea discontinua de color verde que se observa en la figura (modificado de Gana et al., 1996).

### 4 Embalse Lo Orozco

En el mapa geológico de Gana et al. (1996) se observa, al norte del embalse Lo Ovalle y en las cercanías del embalse Lo Orozco (Figura 4.1) una falla de mecanismo sinistral que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jp) y está cubierta por sedimentos holocenos aluviales (Qa). En este sector se observa una curvatura en el cauce del estero Orozco (Figura 4.5a). Esta estructura, de 13,1 km de largo y orientación N80°W, ha sido observada al noreste del embalse Lo Orozco a lo largo de 3 km. En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con la traza cartografiada. En terreno se observó una zona de falla de más de 200 m de ancho en roca intrusiva, en la que se observaron arcillas, un marcado clivaje de fractura y estrías subhorizontales (Figura 4.5b). Se midieron planos con orientación N75°W.



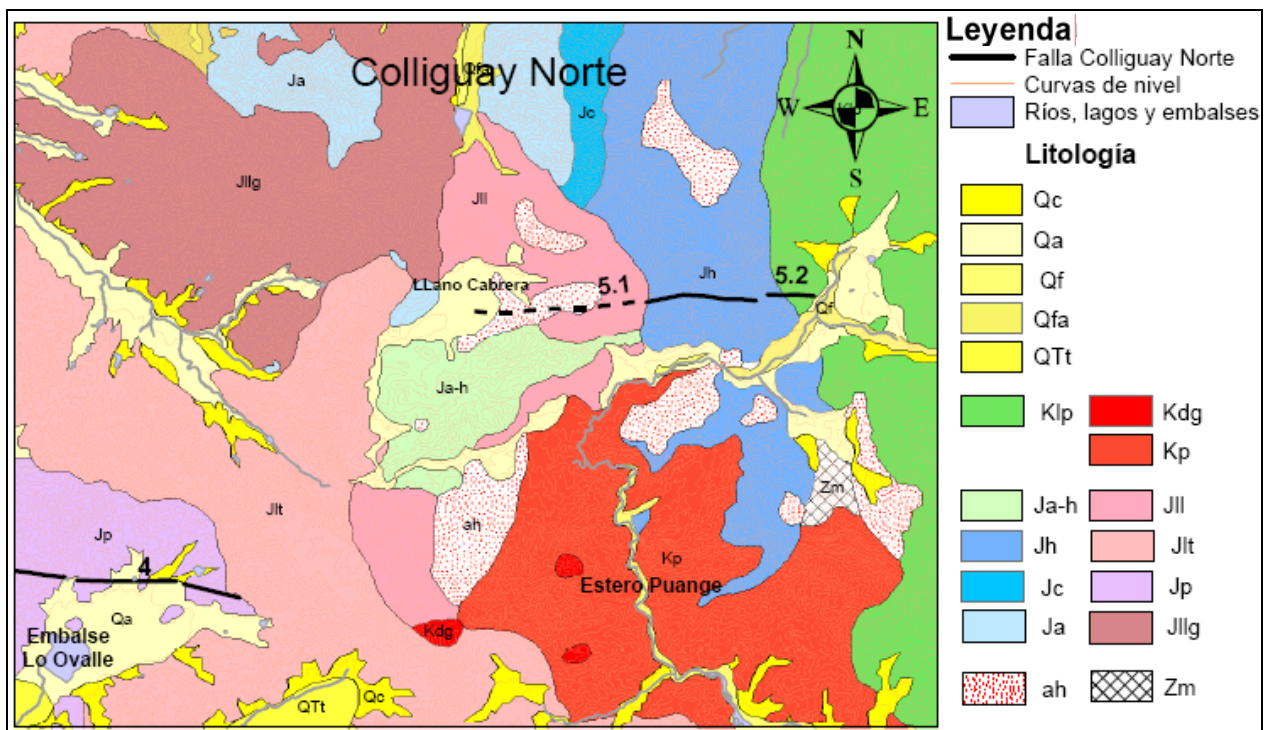
**Figura 4.5:** (a) Falla cartografiada de rumbo E-W y mecanismo sinistral coincidente con una curvatura en el cauce del estero Orozco (Gana et al., 1996) (b) Fotografía tomada en terreno con vista al NE.

## 5 Colliguay Norte

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en la región oriental del área de estudio, se observan, al norte del estero Puangue y al noreste de la estructura anterior (Figura 4.1), dos trazas cartografiadas que coinciden con lineamientos formados por escarpes reconocidos en fotografías aéreas e imágenes satelitales. Estas estructuras se describen a continuación.

**5.1 Sector Oeste:** tramo de aproximadamente 9 km de largo y orientación N85°E. Corta a rocas intrusivas jurásicas (Jll, Jh) y a rocas que presentan alteración hidrotermal (ah). La traza podría estar afectando a sedimentos aluviales holocenos (Qa) en el sector de Llano Cabrera (Gana et al., 1996), aunque no fue observada en terreno y en imágenes satelitales y fotografías aéreas no se observan deslizamientos asociados a esta falla (Figura 4.6).

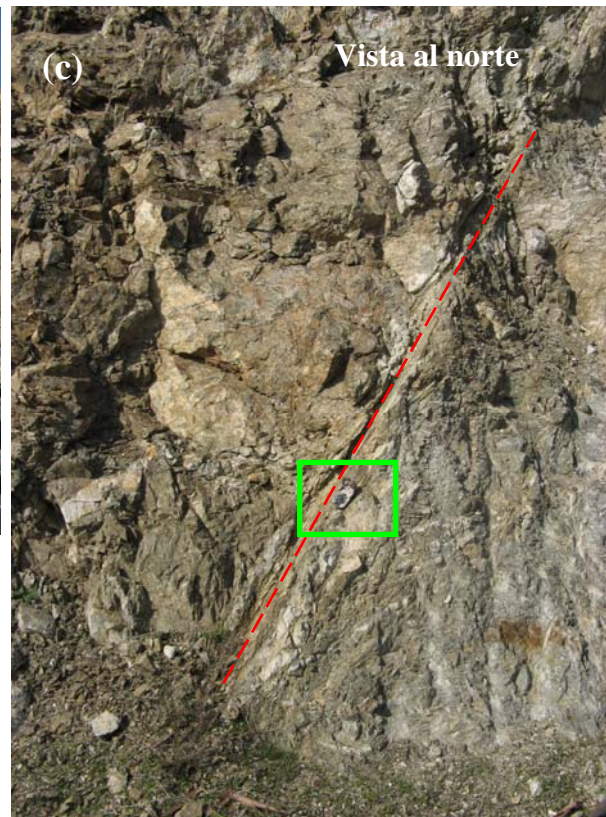
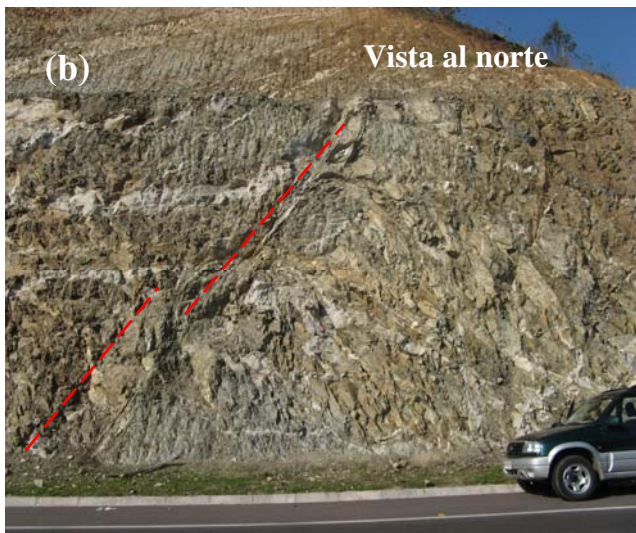
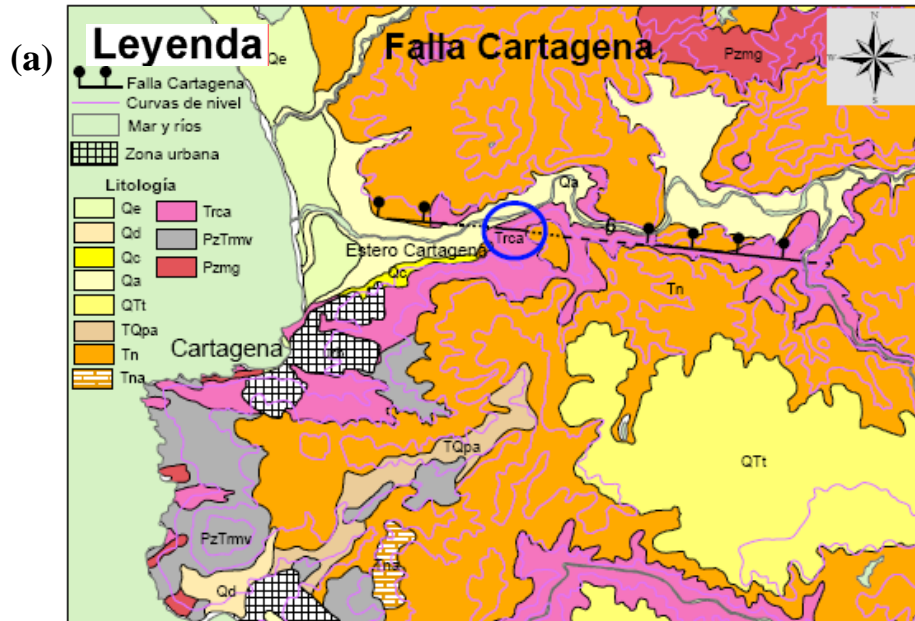
**5.2 Sector Este:** tramo de 1,5 km de largo y orientación este-oeste. Corta a rocas jurásicas (Jh) y a rocas cretácicas (Klp).



**Figura 4.6:** Estructura cartografiada en dos tramos de rumbo E-W. El tramo oeste parece afectar a sedimentos aluviales holocenos (Qa) en el sector Llano Cabrera. Extracto del mapa geológico de Gana et al., 1996.

## 6 Cartagena

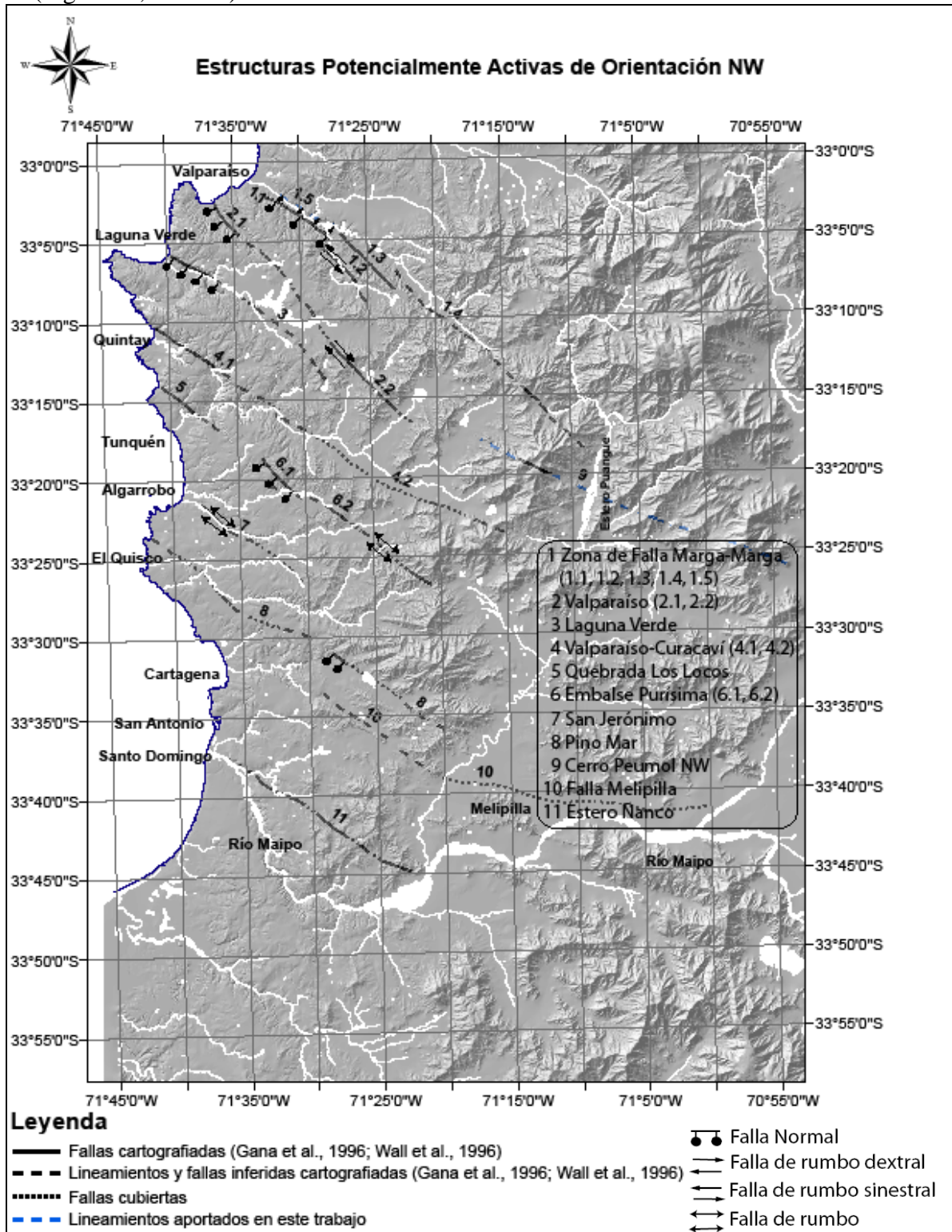
En el mapa geológico de Wall et al. (1996), en las cercanías de Cartagena (Figura 4.1) se observa una falla normal que corta a rocas intrusivas triásicas (Trca), de 6 km de largo y orientación N80°W. En terreno se observó una zona de roca intrusiva intensamente foliada, donde se distinguen fallas discretas semiverticales posteriores con orientación N70°W y estrías subverticales (Figura 4.7), lo que coincide con la cartografía.



**Figura 4.7:** (a) Mapa geológico y ubicación de la falla Cartagena. El círculo azul muestra el sector donde esta falla fue observada en terreno (modificado de Wall et al, 1996). (b) y (c) Fotografías tomadas en terreno que muestran estructuras subverticales (líneas rojas discontinuas) de rumbo  $N70^{\circ}W$ , en intrusivos intensamente foliados que afloran en las cercanías del estero Cartagena. El recuadro verde en la fotografía (c) encierra una brújula de aproximadamente 10 cm.

## 4.2 Sistema NW

A este grupo pertenecen las estructuras de mayor extensión en la región de estudio y coincidiendo en gran medida con la morfología de la zona (Figura 4.8). Sus rumbos varían entre los 290° y los 320° (Figura 4a, Tabla 1).



**Figura 4.8:** Fallas y lineamientos potencialmente activos observados en la zona de estudio, pertenecientes al sistema de estructuras NW.

A continuación se describen las estructuras de orientación NW que se consideran potencialmente activas (Figura 4.8).

## **1 Zona de falla Marga-Marga**

En el mapa geológico de Gana et al. (1996) se distingue un conjunto de fallas y lineamientos, en las cercanías del estero Marga Marga, que definen una zona de orientación N50°W, de un ancho aproximado de 5 km y 48 km de largo (Figura 4.9). La existencia de esta falla se confirma mediante evidencias de terreno y excavaciones bajo maicillo, que revelaron una zona de brecha con rumbo paralelo al valle y manteo de 85° al SW (Thorson, 1999).

Los daños registrados durante el terremoto histórico del año 1906 indican que la falla geológica puede haber causado una gran amplificación sísmica en sus vecindades aún sin estar activa o que podría haberse activado. Durante el terremoto de 1985 se registraron severos daños en edificios altos construidos sobre esta falla geológica. Los movimientos a lo largo de estas fallas están caracterizados por cizalle dextral y sinistral con algunas componentes oblicuas que varían en el tiempo y en el espacio. Los recientes (cuaternarios) movimientos a lo largo de estas fallas podrían ser producto de la subducción del Ridge de Juan Fernández (Thorson, 1999).

Las estructuras pertenecientes a la zona de falla Marga-Marga que se consideran potencialmente sismogénicas se definen a continuación (recuadro rojo en Figura 4.9).

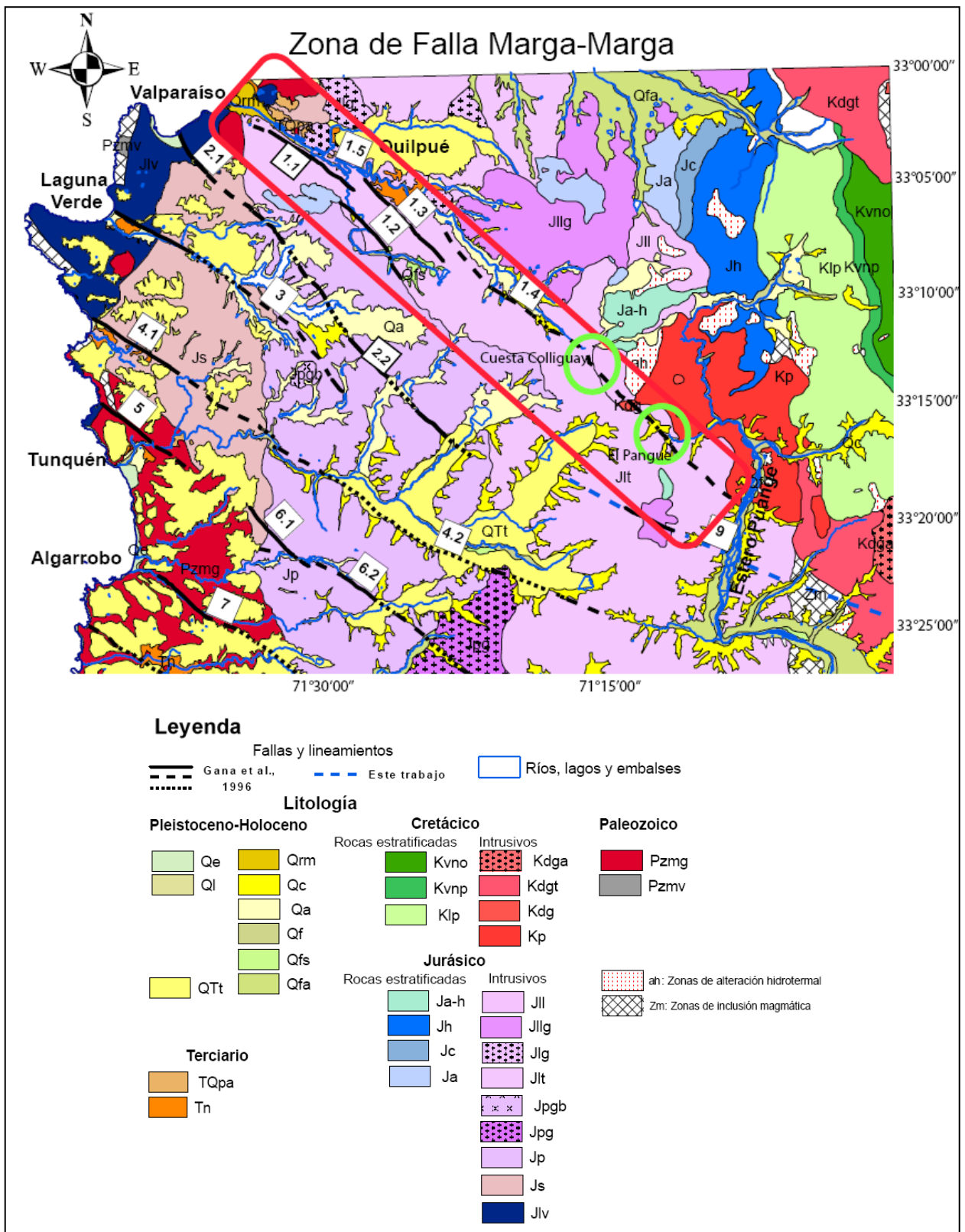
**1.1 Estero Viña del Mar:** falla normal que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlt). Se extiende a lo largo de 9,8 km y ha sido observada continua por más de 8 km. Es paralela al estero Marga-Marga con orientación N60°W y se encuentra aproximadamente 500 m al suroeste de éste. No se observaron escarpes ni otros indicios de posible actividad reciente. Sin embargo, dado que pertenece al sistema de estructuras de la zona de falla Marga-Marga, se considera como potencialmente activa (Figura 4.9).

**1.2 Estero Las Palmas:** falla de rumbo sinistral que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlt). Su traza, de orientación N40°W, es observada discontinua a lo largo de 7,8 km ya que se encuentra parcialmente cubierta por sedimentos holocenos coluviales y fluviales del estero Las Palmas (Qc, Qf y Qfs). En fotografías aéreas se observa como un lineamiento definido por escarpes que controlan el drenaje del estero Las Palmas y en el sector donde la traza corta a dicho estero se observa además, una curvatura en su cauce (Figura 4.9).

**1.3 Quebrada El Patagual:** estructura de traza continua que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlt). Ha sido observada a lo largo de 9,2 km, pero no se ha podido determinar su mecanismo. Su orientación es N40°W (Figura 4.9). En fotografías aéreas se observan escarpes bien marcados y alineados coincidiendo con la traza cartografiada (Gana et al., 1996).

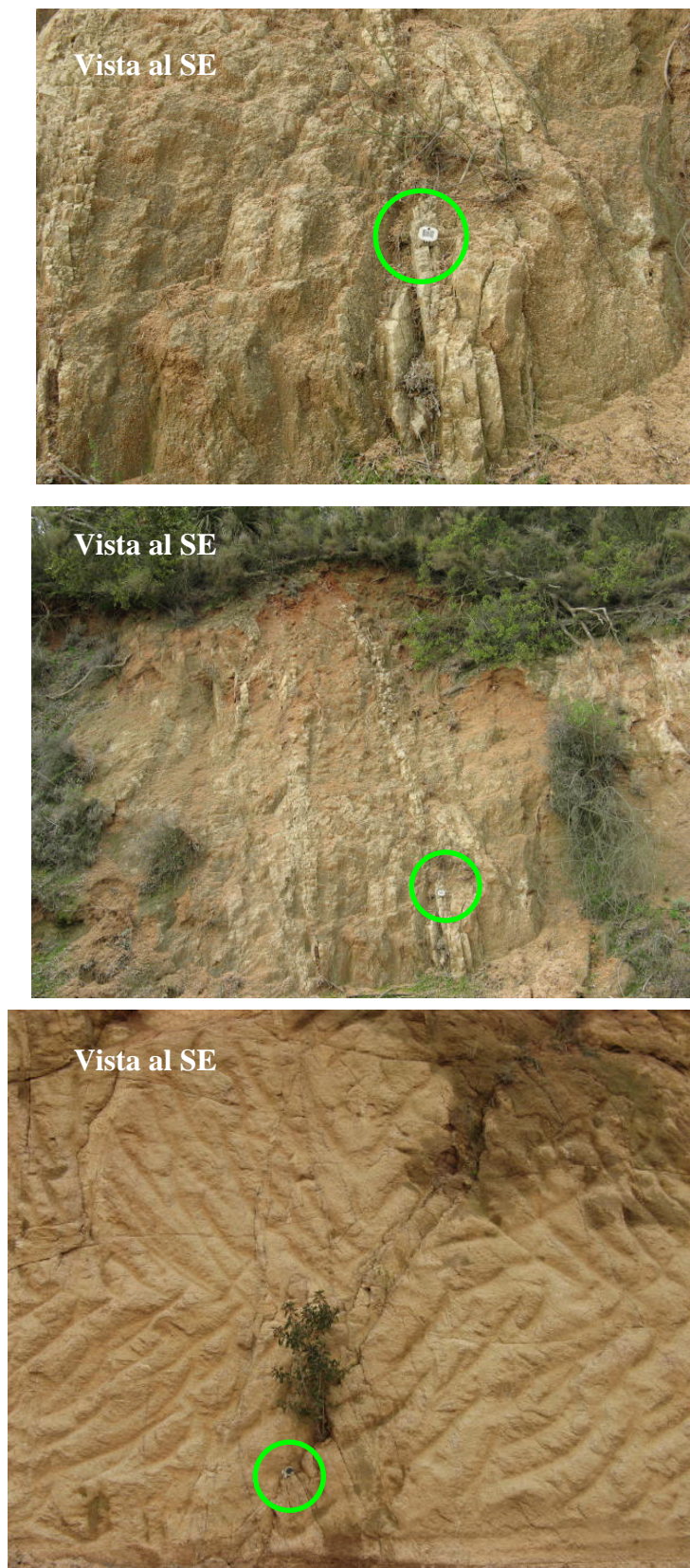
**1.4 Estero Marga-Marga:** estructura de traza discontinua que corta a rocas intrusivas jurásicas y cretácicas (Jlt, Jll y Kdg). Se encuentra parcialmente cubierta por sedimentos holocenos coluviales (Qc) y aluviales (Qa). Su orientación es N45°W y se extiende por 31,4 km. Sin embargo, sólo ha sido observada a lo largo de 2 km en las cercanías de la localidad El Pangue (Gana et al., 1996) y en la Cuesta Colliguay (este trabajo), donde no se ha podido determinar su mecanismo (círculos verdes en Figura 4.9). En este último sector aflora roca intrusiva con numerosos diques cizallados. Se observan estructuras subverticales a verticales con orientación noroeste (rumbos entre 130° y 160°), estructuras menores se encuentran afectando la superficie de erosión actual (Figura 4.10). Hacia el noroeste se observa el valle del Marga-Marga, cuyos bordes presentan una morfología de laderas escalonadas. En fotografías aéreas se reconocen escarpes que se alinean correspondiendo a esta estructura.

**1.5 Sector norte:** en el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías de Viña del Mar, al norte del estero Marga-Marga se observan diversas estructuras de no más de 1 km de largo, todas ellas con orientación similar que se encuentran afectando a rocas neógenas post miocenas de los Estratos de Potrero Alto (TQpa). Una de estas estructuras ha sido observada como falla normal y se encuentra cortando a dichas rocas. En fotografías aéreas se observan marcados escarpes que se alinean con orientación N50°W, unos 500 m al sur de las trazas cartografiadas. Se considerará, para el cálculo de peligro sísmico, una falla normal de 8,4 km de largo y orientación N50°W.



**Figura 4.9:** Mapa geológico del área de Valparaíso-Algarrobo, donde se muestran algunas estructuras del sistema NW cuyas trazas se identifican con números. El recuadro rojo encierra la Zona de Falla Marga-Marga. En las cercanías de la falla 1.2 se observa una curvatura del cauce del estero Las Palmas, que se asocia a la presencia de esta estructura. Los círculos verdes encierran los sectores donde la estructura 1.4 ha sido observada. (Modificado de Gana et al., 1996).





**Figura 4.10:** Fotografías tomadas en el sector de cuesta Colliguay correspondientes a la estructura 1.4. Se observó roca intrusiva con diques que se encuentran cizallados y estructuras subverticales a verticales con orientación noroeste (rumbos entre  $130^\circ$  y  $160^\circ$ ). Estructuras menores se encuentran afectando la superficie de erosión actual. Los círculos verdes encierran una brújula de unos 10 cm.

## 2 Valparaíso

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en la bahía de Valparaíso, se observa una traza sinuosa y discontinua que se extiende por más de 35 km hacia el sureste. En base a su diferente orientación y mecanismo se divide en dos tramos que se describen a continuación (Figuras 4.8 y 4.9).

**2.1 Sector Bahía Valparaíso:** falla normal que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlv y Js). Su traza se extiende por 7,7 km de manera discontinua debido a que se encuentra parcialmente cubierta por una pequeña terraza de abrasión marina del Plioceno-Pleistoceno (QTt). Es una estructura sinuosa, con orientación  $N20^{\circ}W$  creciente hacia el este y orientación general  $N40^{\circ}W$ . Ha sido observada a lo largo de 4 km cortando a rocas intrusivas jurásicas (Jlv), separándolas en dos bloques en la zona este de la Bahía Valparaíso. Hacia el sureste la traza es inferida con orientación  $N50^{\circ}W$  y cortaría a rocas del complejo plutónico jurásico (Js) (Gana et al., 1996). En fotografías aéreas se observan escarpes definiendo una morfología que se asocia a la presencia de esta falla.

**2.2 Sector Lago Peñuelas:** falla de rumbo dextral que corta a rocas intrusivas jurásicas (Js). Ha sido observada a lo largo de 27 km de manera discontinua debido a que se encuentra cubierta, en varios sectores, por sedimentos holocenos aluviales (Qa) y coluviales (Qc) en el sector del lago Peñuelas y en las cercanías de los esteros Orozco y Lo Ovalle. Su traza es sinuosa y su orientación general es  $N40^{\circ}W$ . En fotografías aéreas e imágenes satelitales se observan escarpes que forman un lineamiento coincidente con la estructura cartografiada (Figura 4.11).



**Figura 4.11:** Imagen de Google Earth, donde se observa el lineamiento correspondiente a la falla Valparaíso marcado por la línea roja discontinua.

### 3 Laguna Verde

En el mapa geológico de Gana et al., 1996, en el sector de Laguna Verde (Figura 4.8), se observa una falla normal que corta a rocas jurásicas (Jlv, Js, Jp) cuya traza se extiende por 23,4 km de manera discontinua debido a que se pierde en el Embalse de la Luz y bajo sedimentos aluviales holocenos (Qa). Su orientación  $N60^{\circ}W$ , cambia bruscamente hacia el sureste, donde alcanza un rumbo de  $N35^{\circ}W$  (Figura 4.9). Ha sido observada a lo largo de casi 7 km cortando a rocas intrusivas jurásicas (Jlv y Js) en la quebrada del estero El Sauce. En fotografías aéreas se observa un marcado y continuo escarpe y en terreno esta falla normal se reconoció entre rocas que según la cartografía citada corresponden a la Formación Navidad y a intrusivos jurásicos (Tn y Jlv) (Figura 4.12).



**Figura 4.12:** Fotografías tomadas en sector Laguna Verde. Se observa un contacto por falla normal entre roca sedimentaria (Tn: Fm Navidad) y roca intrusiva (Jlv). Orientación  $N58^{\circ}W$ .

## 4 Valparaíso-Curacaví

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), se observa una estructura que comienza al norte de Quintay y se extiende de manera discontinua por más de 47 km con orientación promedio N55°W. Corresponde a dos trazas que se describen a continuación (Figuras 4.8 y 4.9).

**4.1 Sector Noroeste:** estructura que corta a rocas intrusivas jurásicas (Js) de 17,3 km de largo y orientación N50°W. Sólo 7 km de su traza han sido observados y no se ha podido determinar su mecanismo. El resto de la traza está cartografiada como falla inferida o fotolineamiento de manera coincidente con el lineamiento observado en este trabajo mediante fotografías aéreas e imágenes satelitales.

**4.2 Sector Sureste:** estructura que corta a intrusivos jurásicos (Jp, Jlt). Corresponde a un lineamiento sinuoso de 30,5 km de largo y orientación general N60°W. El 70% de la traza se encuentra cubierta por terrazas de abrasión marina de edad Plioceno(?)-Pleistoceno (QTt) y por sedimentos holocenos fluviales (Qf) y coluviales (Qc). Este tramo se encuentra desplazado unos 700 m al sur del tramo anterior, donde se observa una curvatura en el cauce del estero Casablanca (Figura 4.9). En terreno se observa un fuerte lineamiento paralelo al camino Algarrobo-Casablanca coincidente con esta traza.

## 5 Quebrada Los Locos

En el mapa geológico de Gana et al. (1996) se observa en las cercanías de Tunquén, al norte de Algarrobo (Figura 4.9), una estructura que corta a rocas intrusivas paleozoicas (Pzmg) de orientación N50°W y 8,5 km de largo. Ha sido observada a lo largo de 7 km, donde no se ha podido determinar su mecanismo. Hacia el sur la traza cruza el estero Casablanca y se bifurca. En fotografías aéreas se observan marcados escarpes que se alinean coincidentes con la rama noreste de la traza, la que además pareciera estar afectando al nivel superior de las terrazas de la zona, aunque no es posible asegurar desplazamientos debido a la falta de dataciones y mapeos de detalle en estas terrazas (comunicación oral, María Pía Rodríguez).

## 6 Embalse Purísima

En el mapa geológico de Gana et al. (1996) se observa, en las cercanías del embalse Purísima, al este de Algarrobo (Figura 4.8), dos estructuras de orientación NW que se describen a continuación.

**6.1 Sector Noroeste:** falla normal que corta a rocas intrusivas jurásicas (Js, Jp). Ha sido observada a lo largo de 6,8 km discontinua por encontrarse cubierta por sedimentos holocenos aluviales (Qa). Su orientación es N45°W y en fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con la traza cartografiada.

**6.2 Sector Sureste:** estructura de traza sinuosa discontinua de 22,6 km de largo. Su orientación cambia desde N80°W hasta N50°W hacia el sureste. Ha sido observada sólo a lo largo de 3 km al norte del estero Lo Orrego y por otros 3 km en el sector cuesta Las Hormigas, donde se reconoció una zona de falla en roca intrusiva, cuyo rumbo, de dirección N53°W, marca un escarpe de falla “reciente” (Figura 4.13). La roca presenta foliación y el

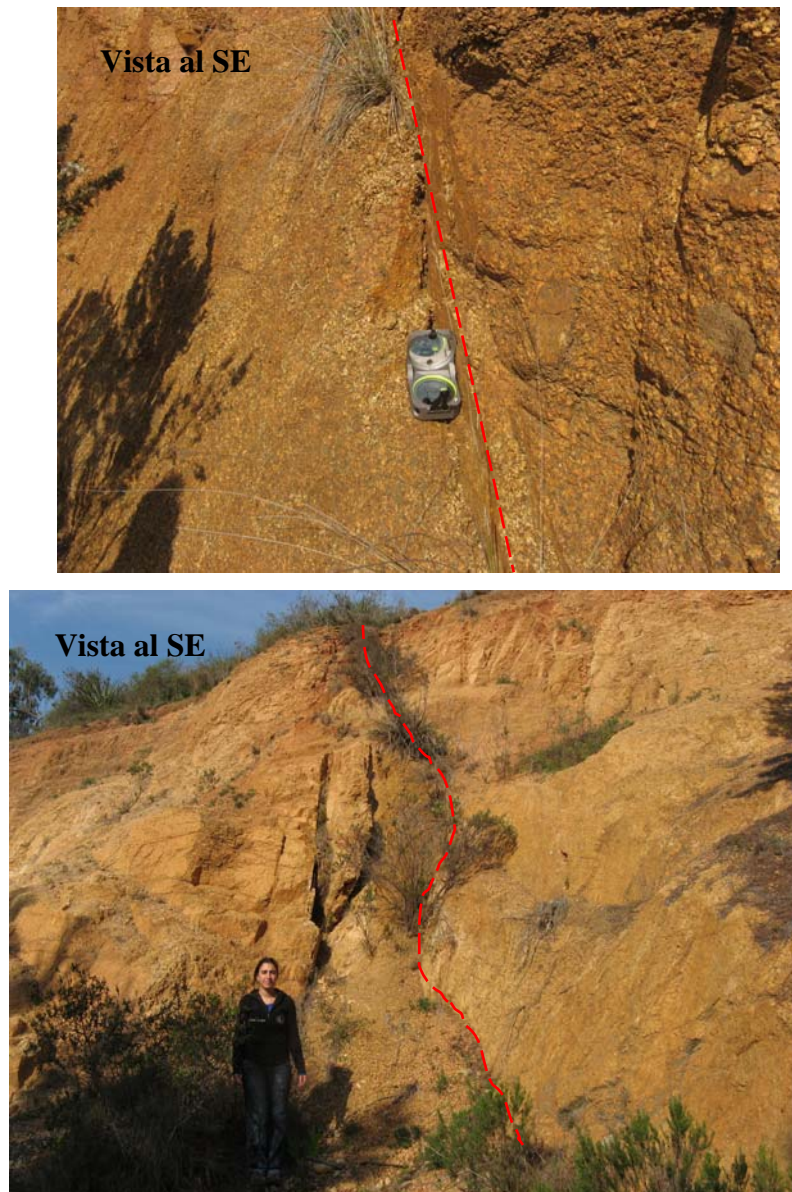
suelo se encuentra deprimido con respecto al perfil del escarpe. Hacia el noroeste, en el sector del embalse Purísima, la traza se pierde bajo sedimentos holocenos aluviales (Qa) y controla el cauce del estero El Membrillo. Hacia el sur, en el sector de la cuesta Ibacache, se observó roca intrusiva con planos cortos de falla de dirección  $N75^{\circ}W$  y estrías subhorizontales, indicando movimientos de rumbo para esta estructura.



**Figura 4.13:** (a) Imagen tomada de Google Earth donde se observa la estructura 6 (Embalse Purísima). El círculo azul corresponde al lugar donde fue tomada la fotografía que se muestra en (b). (b) Fotografía mirando al NNE. Se observa escarpe “reciente” en roca intrusiva de rumbo  $N53^{\circ}W$ . El círculo verde encierra un receptor de GPS de unos 15 cm.

## 7 San Jerónimo-De Carvajal

En el mapa geológico de Gana et al., 1996 se observa, en las cercanías de Algarrobo, una estructura sinuosa discontinua que corta a rocas intrusivas paleozoicas (Pzmg) y está parcialmente cubierta por terrazas de abrasión marina (QTt). Se extiende a lo largo de 15,1 km con una orientación promedio N50°W. Ha sido observada continua por 5 km en la quebrada San Jerónimo, donde se encauza el estero del mismo nombre. En fotografías aéreas se observan escarpes bien marcados que se alinean de manera coincidente con la estructura cartografiada. En terreno, en la quebrada del estero San Jerónimo se observó una zona de deformación frágil en roca intrusiva (Pzmg), donde se midieron estructuras subverticales con rumbos entre 300° y 310°, que corresponderían a la traza principal de la falla cartografiada. En estas estructuras se observaron estrías subhorizontales, lo que indicaría movimientos de rumbo (Figura 4.14)



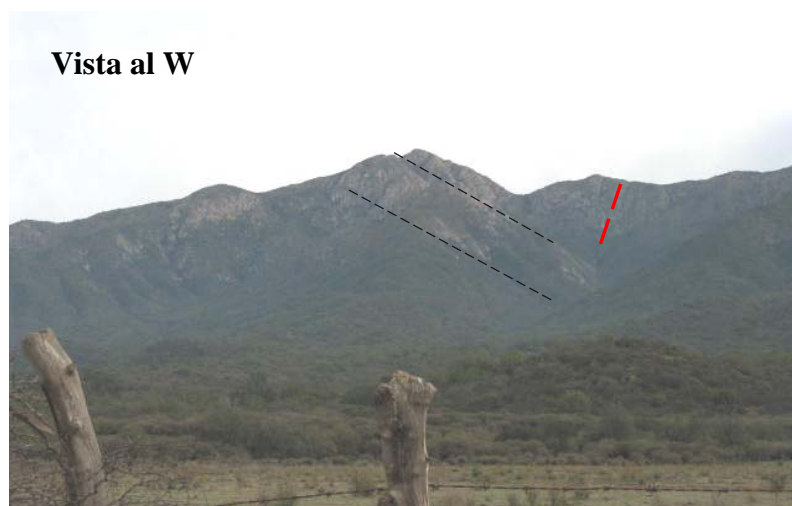
**Figura 4.14:** Fotografías tomadas en la quebrada del estero San Jerónimo. Las líneas rojas discontinuas marcan las estructuras observadas en el sector.

## 8 Quebrada Pino Mar

En el mapa geológico de Gana et al., 1996 se observa, en la quebrada Pino Mar, sector El Quisco (Figura 4.8), una estructura discontinua de orientación N55°W. Su traza es sinuosa y se extiende hasta la latitud de San Antonio en el mapa geológico de Wall et al., 1996, alcanzando un largo de 42,7 km. Corta a rocas intrusivas paleozoicas (Pzmg) y se encuentra parcialmente cubierta por terrazas de abrasión marina (QTt) y sedimentos de la Formación Navidad del Mioceno-Plioceno (Tn). Sólo ha sido observada a lo largo de 2 km al noroeste del embalse Las Palmas (Wall et al., 1996), como falla de mecanismo normal, donde el bloque hundido corresponde a rocas de la Formación Navidad (Tn), mientras que el bloque alzado corresponde a rocas intrusivas paleozoicas (Pzmg). Hacia el sureste la traza se encuentra cubierta por terrazas de abrasión marina (QTt) y se pierde bajo el embalse Las Palmas. Más al sur, corta a rocas intrusivas paleozoicas (Pzp). En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con la traza cartografiada. Esta estructura no se pudo observar en terreno debido a que la zona se encuentra densamente poblada, sin embargo destaca la gran profundidad de la quebrada en el sector.

## 9 Cerro Peumol NW

En el mapa geológico de Gana et al., 1996, al oeste del estero Puangue (Figura 4.8), se encuentra cartografiada una estructura que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlg y Jlt) del cerro Peumol y que se ha observado continua a lo largo de 4 km con orientación noroeste. Su mecanismo no ha sido determinado. En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con esta traza y este lineamiento se extiende tanto hacia el noroeste como hacia el sureste observándose hasta la Depresión Central (fuera del área de estudio). Así, la estructura consiste en un lineamiento discontinuo de más de 38,7 km de largo y orientación N65°W. En terreno se observó este lineamiento con un rumbo estimado de 120°, coincidente con la orientación de la traza cartografiada (Figura 4.15).



**Figura 4.15:** Fotografía tomada desde el estero Puangue, 10 km al norte de la ruta 68, mirando hacia el oeste. La línea roja corresponde a la estructura 9 (Cerro Peumol NW). Las dos líneas grises corresponden a estructuras del sistema NE que se describen más adelante en el texto (Capítulo 4.5).

## 10 Falla Melipilla

En el mapa geológico de Wall et al. (1996), en las cercanías de Melipilla, se observa una estructura discontinua de 48,3 km de largo con orientación oste-noroeste (Figura 4.8). Corresponde a una de las estructura de mayor extensión en la región, aunque no ha sido observada en superficie. Antecedentes bibliográficos indican la presencia de anomalías magnética y gravimétrica coincidentes con esta estructura, que se ha interpretado como una falla de rumbo dextral y/o transpresional, aunque según Yáñez et al. (1998), su último desplazamiento sería de tipo normal y posterior al Mioceno-Plioceno? La falla Melipilla no se estudió en este trabajo, pero dada su importancia regional y de acuerdo a los antecedentes bibliográficos se considera en el análisis de peligro sísmico como falla de mecanismo normal.

## 11 Estero Ñanco

En el mapa geológico de Wall et al., 1996, en las cercanías de la desembocadura del río Maipo (Figura 4.8), se observa una estructura de orientación N65°W que controla el cauce del río en su ribera norte. Corta a rocas intrusivas triásicas (Trca) y su mecanismo no ha sido determinado. En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con esta traza de 25,4 km de largo y orientación N65°W. En una cantera del sector Lo Gallardo, al este de Santo Domingo, se observó una zona de falla en roca intrusiva brechizada y se midieron rumbos de entre 290° y 300° (Figura 4.16).

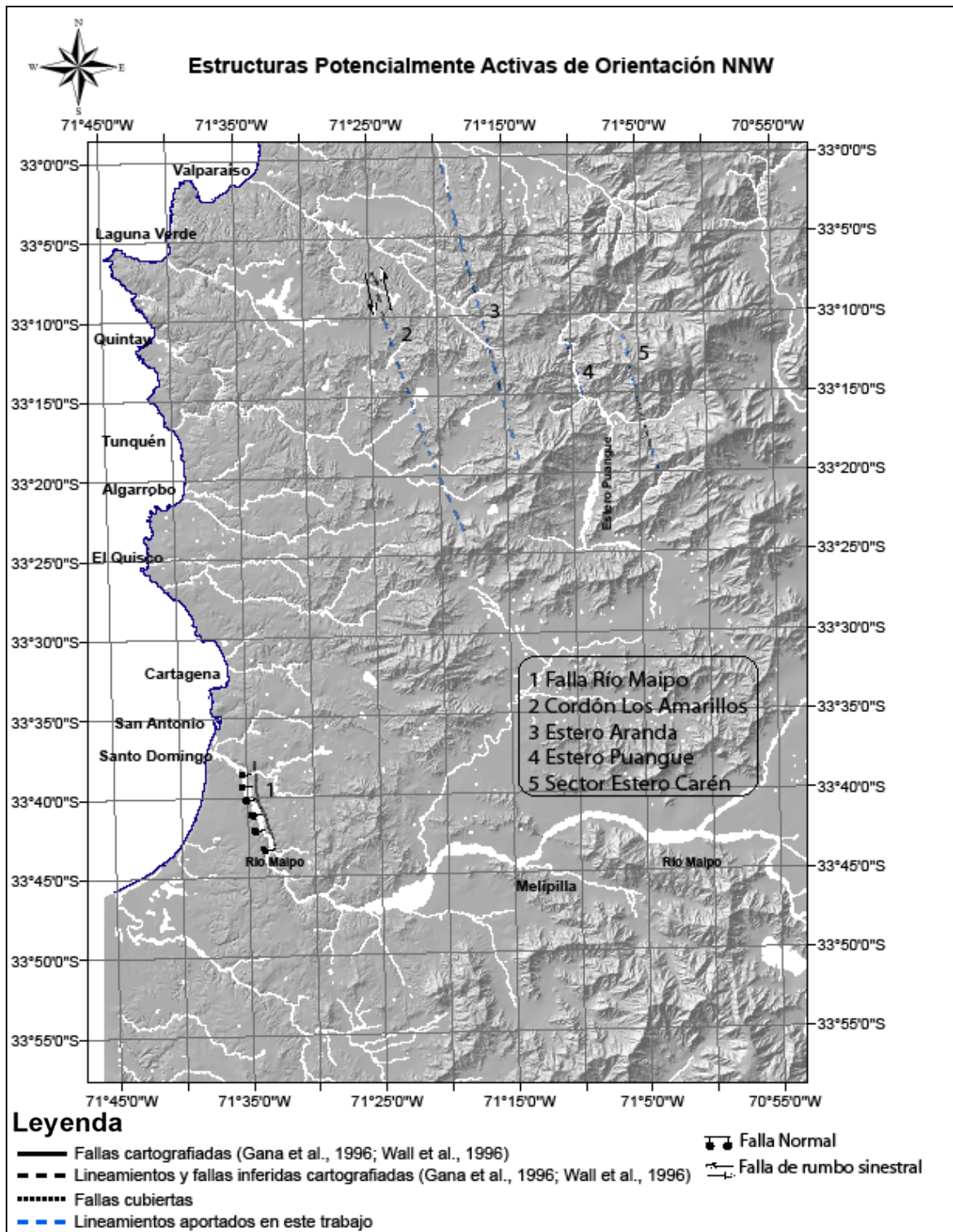


**Figura 4.16:** (a) Imagen satelital tomada de Google Earth, donde se observa la cantera visitada en terreno y el lineamiento formado por la traza de la falla Estero Ñanco (línea roja discontinua). El círculo azul muestra el punto desde el cual se tomó la fotografía con vista al SE en (b). (b) Fotografía tomada hacia el sureste. Se observó roca intrusiva brechizada y se midieron estructuras con rumbos entre 290° y 300°.



### 4.3 Sistema NNW

El sistema de estructuras con orientación NNW destaca en la zona nororiente del área de estudio (Figura 4.17). Son estructuras con rumbos entre 335° y 350° (Figura 4a, Tabla 1).



**Figura 4.17:** Fallas y lineamientos potencialmente activos observados en la zona de estudio, pertenecientes al sistema de estructuras NNW.

## 1 Río Maipo

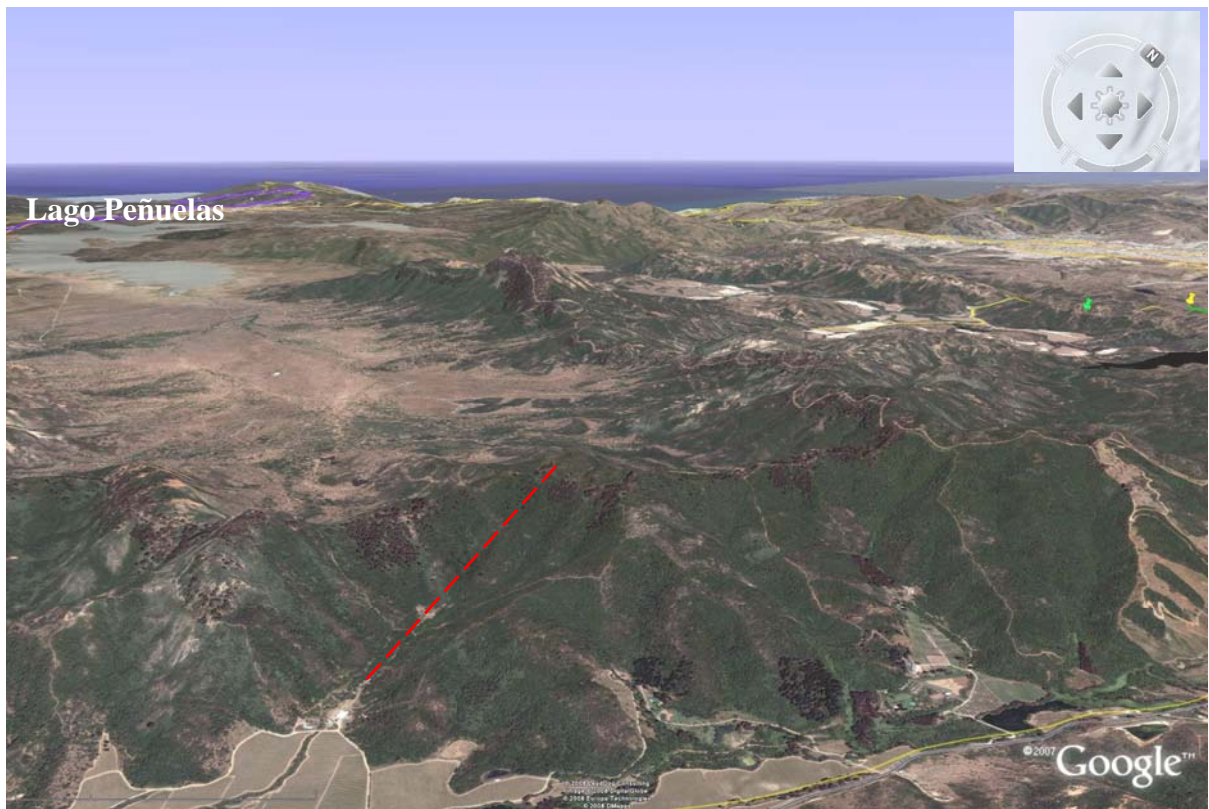
En el mapa geológico de Wall et al., 1996 se observa, en las cercanías de la desembocadura del Río Maipo, al sureste de Santo Domingo (Figura 4.17), una falla normal que corta a rocas intrusivas triásico-jurásicas (TrJtv) y que en parte controla el cauce del Río Maipo. En fotografías aéreas se observan escarpes que forman un fuerte lineamiento paralelo al Río Maipo coincidiendo con esta estructura cuya orientación es  $N25^{\circ}W$ . En terreno se observó un desnivel topográfico correspondiente a un escarpe marcado por un dique cizallado, donde se midieron estructuras subverticales de rumbo norte-sur (Figura 4.18). Para el análisis de peligro sísmico se considera un largo de 10,9 km, que corresponde sólo a un segmento de la falla Río Maipo que comienza al este de Santo Domingo y es interrumpido por un afloramiento de rocas intrusivas jurásicas que no se encuentran afectados por esta falla (Wall et al., 1996). Hacia el sur, se observan al menos dos segmentos más de esta falla que no fueron considerados en el análisis por ser de corta extensión y encontrarse fuera del área de estudio.



**Figura 4.18:** Fotografía con vista al NW donde se observa un escarpe marcado por un dique cizallado con rumbo norte-sur correspondiente a la estructura 1 (Falla Río Maipo).

## 2 Cordón Los Amarillos

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías del embalse Las Palmas, al este del lago Peñuelas (Figura 4.17), se observa una falla de rumbo sinistral de 2 km de largo y orientación  $N30^{\circ}W$ , que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlt) y se pierde en sedimentos holocenos fluviales (Qfs y Qf) del estero Las Palmas. Hacia el sur, esta estructura está cartografiada como falla inferida por poco más de 3 km con orientación  $N20^{\circ}W$ . En fotografías aéreas e imágenes satelitales se observaron escarpes formando un lineamiento (Figura 4.19) que se extiende hacia el sur en rocas, que según la cartografía, corresponden a intrusivos jurásicos (Jp) y en las zonas donde la traza se pierde, estaría cubierta por terrazas de abrasión marina (QTt). Así, la estructura a considerar para el análisis de peligro sísmico corresponde a una falla de rumbo sinistral de 32,8 km de largo y orientación  $N20^{\circ}W$ .



**Figura 4.19:** Imagen tomada de Google Earth, en la que se distingue parte del tramo no cartografiado de la estructura 2 (Cordón Los Amarillos). La imagen superior muestra, en rojo, el lineamiento que se puede observar en la imagen inferior.

### 3 Estero Aranda

En fotografías aéreas e imágenes satelitales, al este del embalse Perales (Figura 4.17), se observa un lineamiento con orientación N15°W, formado por escarpes bien definidos, en rocas que según la cartografía (Gana et al., 1996) corresponden a intrusivos jurásicos (Jlt). Este lineamiento se extiende hacia el norte a lo largo de 35,3 km hasta las cercanías del estero Aranda, en el extremo norte del área de estudio, donde coincide con la disposición de depósitos fluviales holocenos antiguos (Qfa). En terreno, sector El Pangue se observó un lineamiento con rumbo aproximado norte-sur que podría corresponder a esta estructura.

### 4 Estero Puangue

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías del estero Puangue (Figura 4.20), se observa una estructura discontinua de orientación N20°W que controla el curso del estero y cuyo mecanismo no ha sido determinado. La discontinuidad en la traza de esta estructura es producto de la acción de otras fallas, de orientación NE, que se describen en el Capítulo 4.5 de este informe. En las cercanías de la cuesta Puangue, se observa un cambio brusco en la pendiente de la ladera del cerro que bordea al estero Puangue, topografía que se asocia a la presencia de esta falla (Figura 4.21). Para el análisis de peligro sísmico se considera como una estructura continua de 7,8 km de largo.

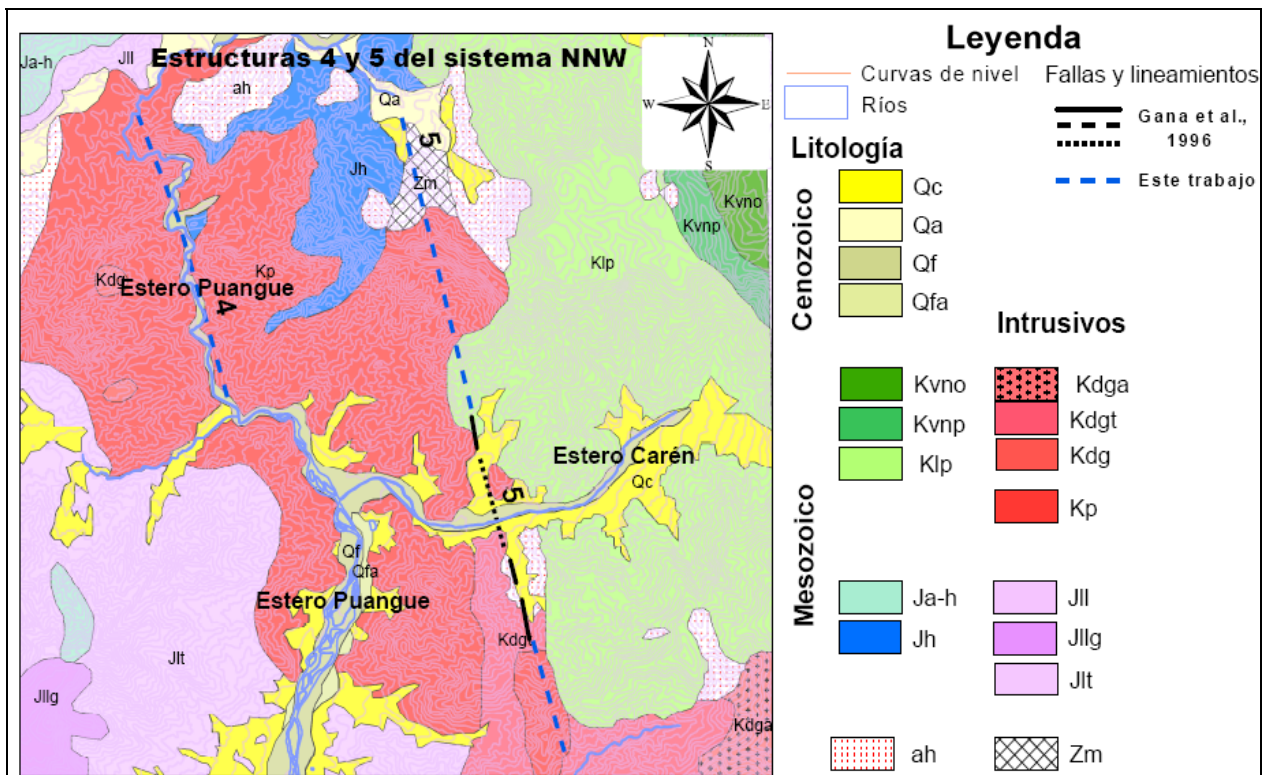


Figura 4.20: Estructuras 4 y 5. (Modificado de Gana et al., 1996).



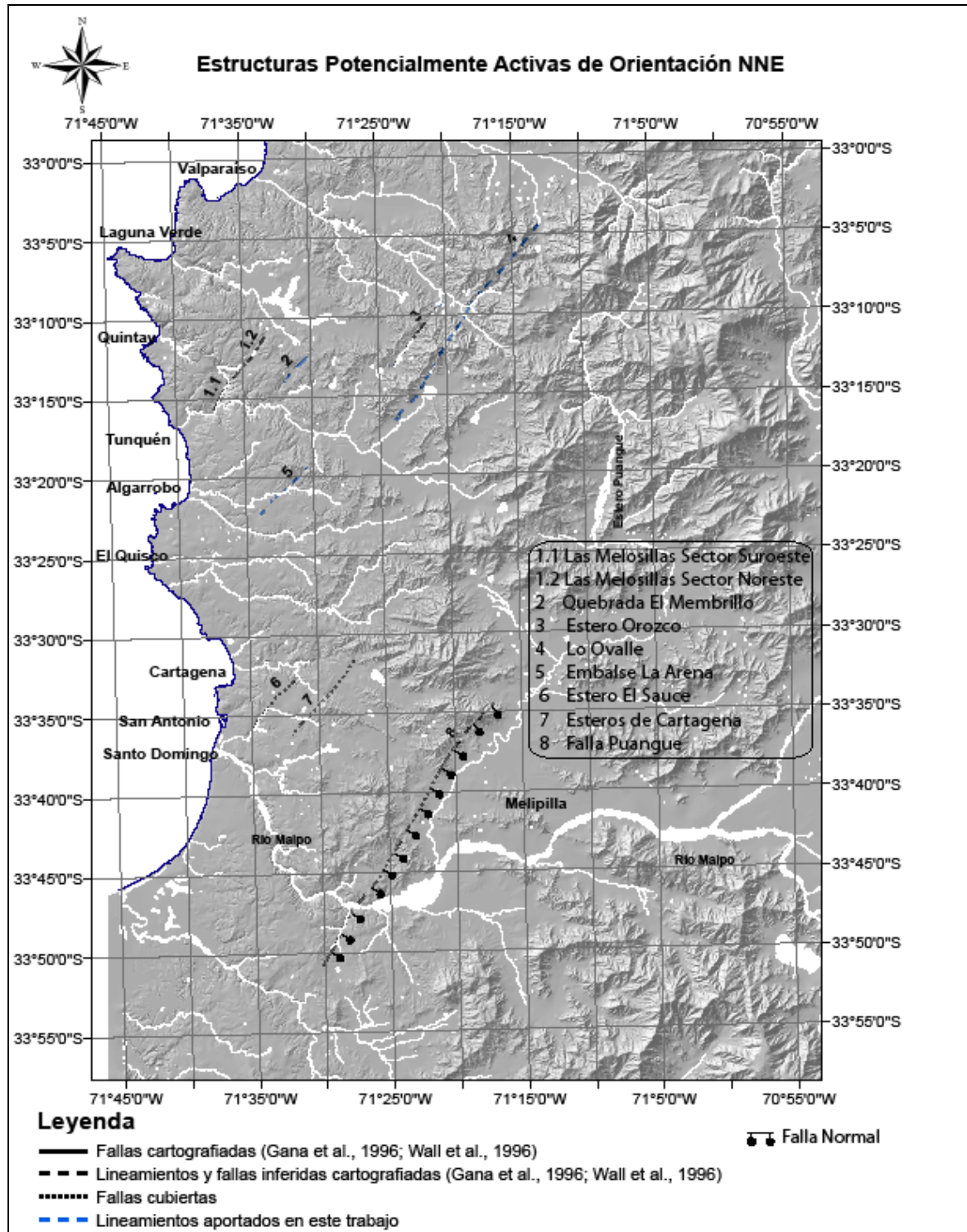
**Figura 4.21:** Fotografía tomada desde la cuesta Puangue, donde se observa un cambio brusco en la pendiente de la ladera del cerro (marcado por la línea negra segmentada), topografía que se asocia a la presencia de la estructura 4 (Estero Puangue).

## 5 Sector Estero Carén

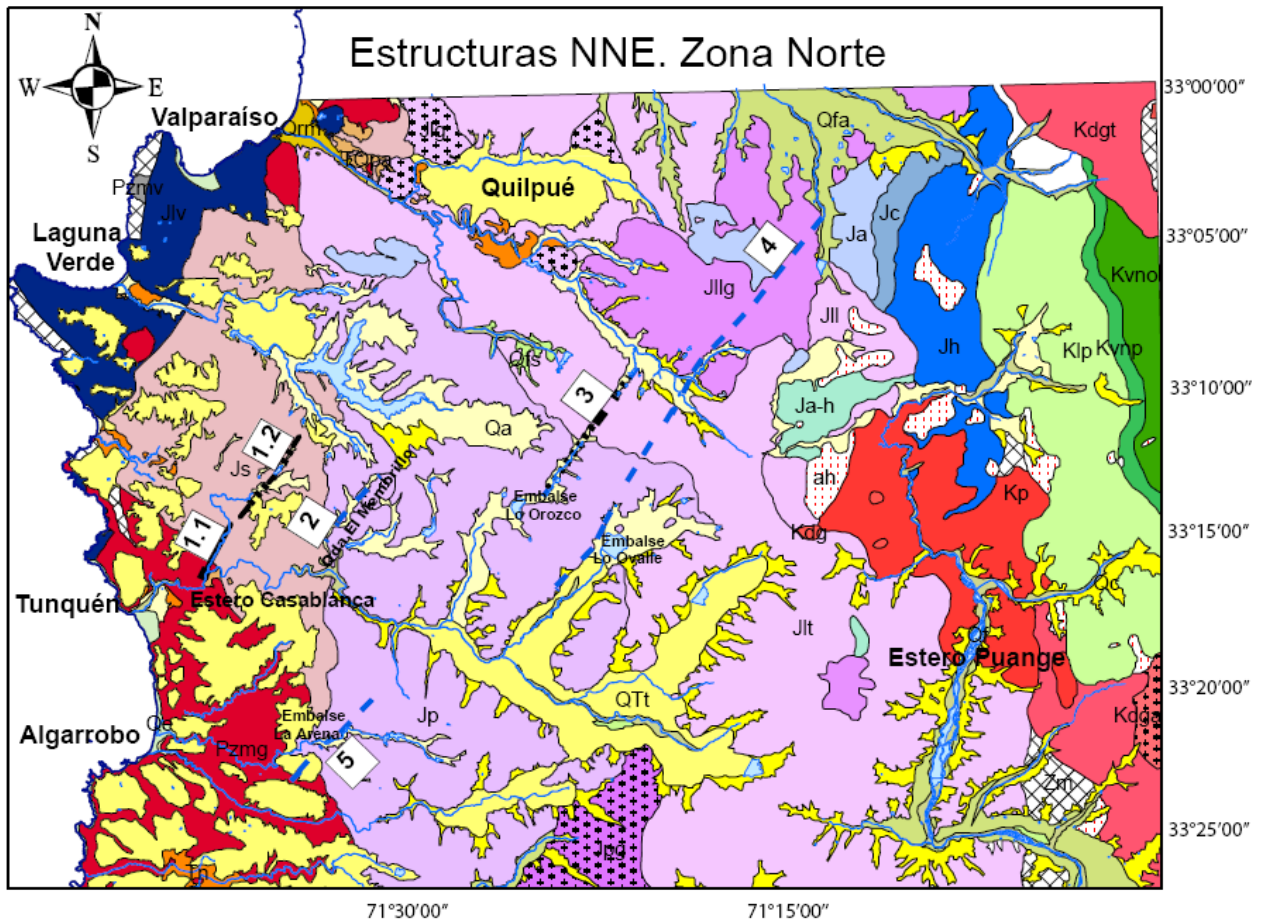
En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías del estero Carén, al este del estero Puangue (Figura 4.20), se observa una estructura, que corta a rocas cretácicas (Kdgt, Kp y Klp) y está cubierta por depósitos coluviales (Qc), cuya disposición está fuertemente controlada por esta estructura de rumbo N10°W. Su mecanismo no ha sido determinado. En fotografías aéreas e imágenes satelitales se observa que este lineamiento se extiende hacia el norte y hacia el sur a lo largo de 16 km (Figura 4.20).

#### 4.4 Sistema NNE

El sistema NNE corresponde a un conjunto de estructuras de orientación noreste con rumbos entre 20° y 45° (Figuras 4a, 4.22; Tabla 1). Las estructuras ubicadas al norte de los 33°30' se muestran en la Figura 4.23. Las estructuras ubicadas en la zona sur se muestran en la Figura 4.26.



**Figura 4.22:** Fallas y lineamientos potencialmente activos observados en la zona de estudio, pertenecientes al sistema de estructuras NNE.



**Leyenda**

Fallas y lineamientos  
 Gana et al., 1996  
 Este trabajo  
 Ríos, lagos y embalses

**Litología**

**Pleistoceno-Holoceno**

Qe Qm  
 Ql Qc  
 Qa Qf  
 Qfs Qfa  
 QTt

**Terciario**

TQpa  
 Tn

**Cretácico**

Rocas estratificadas Intrusivos  
 Kvno Kdga  
 Kvnp Kdgt  
 Klp Kdg  
 Kp

**Jurásico**

Rocas estratificadas Intrusivos  
 Ja-h Jll  
 Jh Jllg  
 Jc Jlg  
 Ja Jlt  
 Jpjb  
 Jpg  
 Jp  
 Js  
 Jlv

**Paleozoico**

Pzmg  
 Pzmv  
 ah: Zonas de alteración hidrotermal  
 Zm: Zonas de inclusión magmática

**Figura 4.23:** Mapa geológico del área de Valparaíso-Algarrobo, donde se muestran algunas estructuras del sistema NNE, cuyas trazas se identifican con números (modificado de Gana et al., 1996).

## 1 Las Melosillas

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías de Tunquén, al norte del estero Casablanca (Figura 4.23), se observa una estructura formada por dos tramos que se describen a continuación:

**1.1 Sector Suroeste:** corta a rocas intrusivas paleozoicas (Pzmg) y jurásicas (Js). Se extiende con orientación N20°E por 3,7 km. Aunque ha sido observada a lo largo de 3 km, su mecanismo no se ha podido determinar. Esta estructura controla el curso final del estero de Moteros, pequeño afluente del estero Casablanca (Figura 4.23). En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con la traza cartografiada.

**1.2 Sector Noreste:** corta a rocas intrusivas jurásicas (Js), está cubierta por terrazas de abrasión marina (QTt) y por sedimentos holocenos aluviales (Qa). Se extiende a lo largo de 6 km con orientación N30°E. Ha sido observada en diferentes sectores sin haberse podido determinar su mecanismo. En fotografías aéreas e imágenes satelitales se observan escarpes que se alinean coincidiendo con la traza cartografiada (Figura 4.24).



**Figura 4.24:** Imagen modificada de Google Earth, en la que se observa el lineamiento correspondiente a la estructura 1 (Las Melosillas) marcado con una línea roja discontinua.



## **2 Quebrada El Membrillo**

En fotografías aéreas, al norte del estero Casablanca, se observa un lineamiento formado por escarpes en rocas que según el mapa geológico de Gana et al. (1996) son intrusivos jurásicos (Jp) y corresponde a la quebrada El Membrillo. Se distingue por 5,2 km con orientación N40°E. Este lineamiento se pierde bajo sedimentos aluviales (Qa), cuya disposición se asocia a la presencia de esta estructura (Figura 4.23).

## **3 Estero Orozco**

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), al norte de Casablanca, en las cercanías del embalse Lo Orozco, se observa una estructura que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlt) y se encuentra cubierta por sedimentos aluviales, cuya ocurrencia y disposición se asocia a esta estructura de orientación N35°E. Se extiende a lo largo de 9,7 km y su mecanismo se desconoce (Figura 4.23). En fotografías aéreas se observaron escarpes que se alinean de manera coincidente con la traza cartografiada.

## **4 Lo Ovalle**

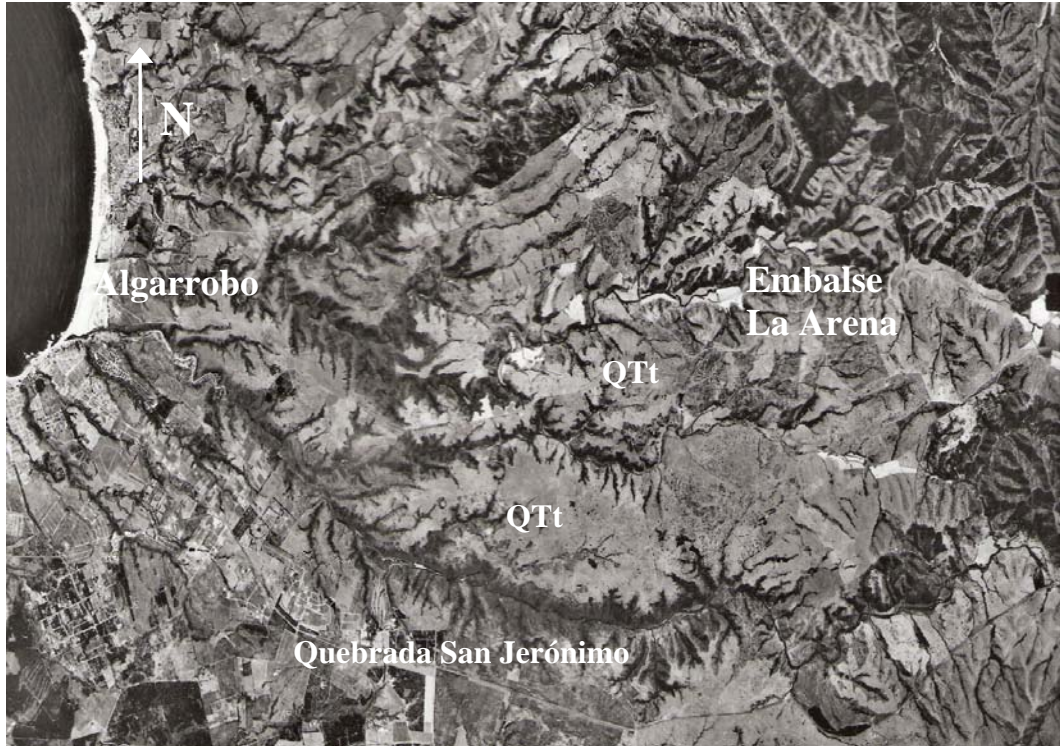
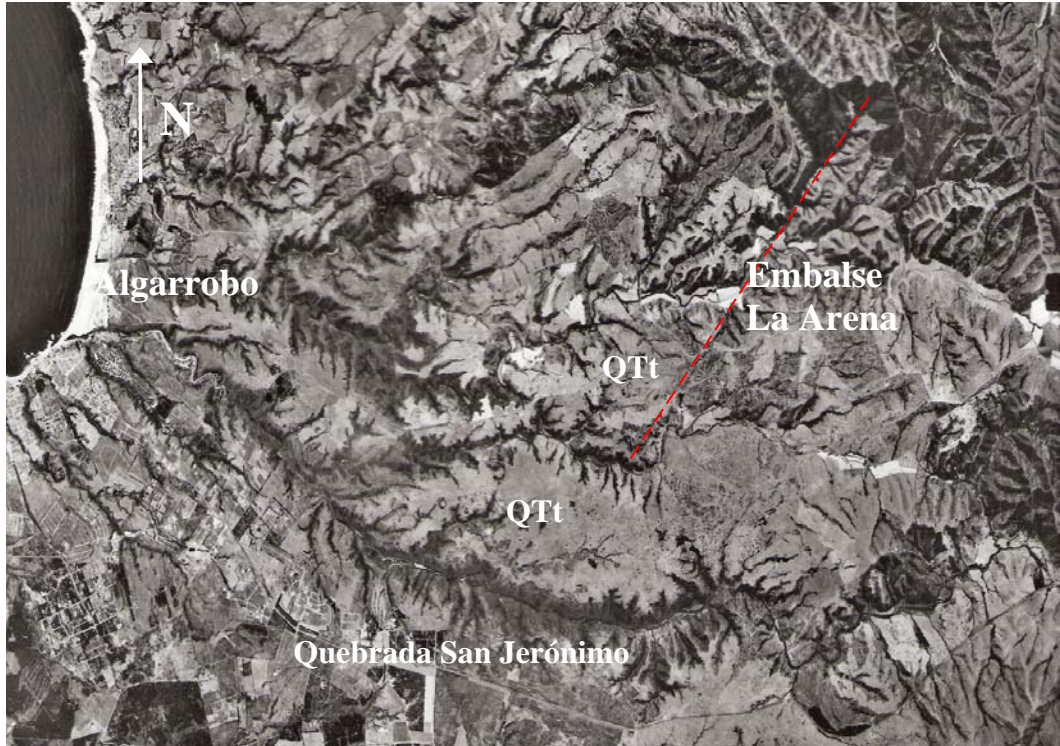
En fotografías aéreas, al norte de Casablanca, en las cercanías del embalse Lo Ovalle, se observó un lineamiento definido por escarpes en rocas, que según el mapa geológico de Gana et al. (1996) corresponden a intrusivos jurásicos (Jp y Jlt). Este lineamiento continúa hacia el norte a lo largo de aproximadamente 28 km con orientación N30°E (Figura 4.23).

## **5 Embalse La Arena**

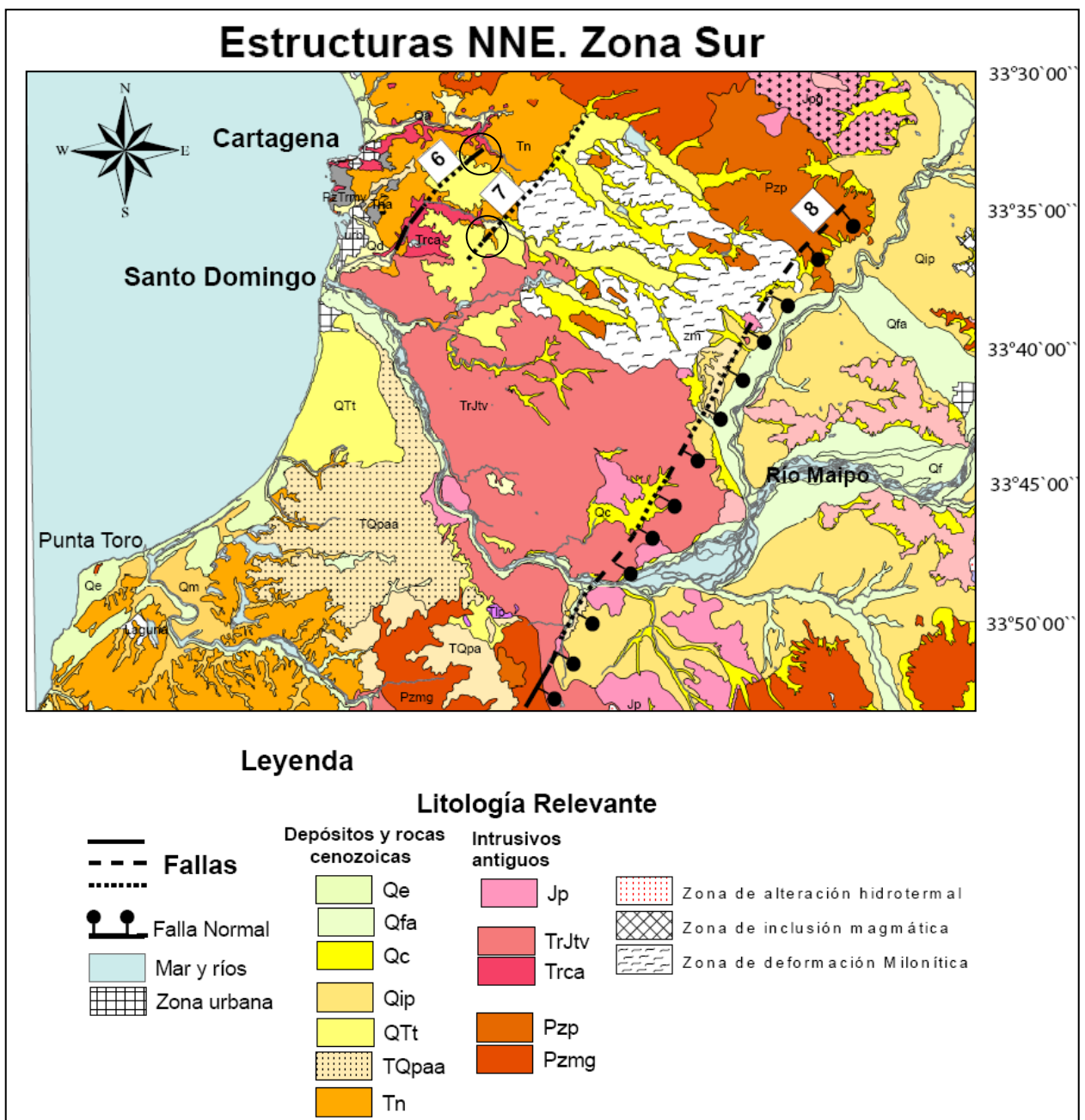
En fotografías aéreas, al noreste de la quebrada del estero San Jerónimo, en las cercanías del embalse La Arena, se observa un lineamiento formado por escarpes en rocas, que según el mapa geológico de Gana et al. (1996) corresponden a intrusivos paleozoicos y jurásicos (Pzmg y Jp) y, hacia el sur, controlaría el borde occidental de en una terraza marina (QTt) (Figura 4.23). En fotografías aéreas se observa que esta estructura estaría aparentemente afectando a una terraza marina (QTt), aunque no fue observada en terreno. Este fotolineamiento se extiende discontinuo a lo largo de aproximadamente 8 km con orientación N40°E (Figura 4.25).

## **6 Estero El Sauce**

En el mapa geológico de Wall et al. (1996), al este de San Antonio se observa una estructura que corta a rocas intrusivas triásicas (Trca) y que aparentemente continúa hacia el norte, donde ha sido observada cortando a rocas sedimentarias del Mioceno-Plioceno de la Formación Navidad (Tn). Controla fuertemente el curso del estero El Sauce, cuyo cauce de dirección N70°W se desvía cerca de 90° alcanzando el rumbo N25°E correspondiente a esta estructura. Para el análisis de peligro sísmico se considera como una estructura, de 7,5 km de largo y orientación N40°W (Figura 4.26).



**Figura 4.25:** Fotografía aérea del sector de Algarrobo. Ambas fotografías corresponden al mismo sector. La imagen superior muestra, en rojo, el lineamiento correspondiente a la estructura 5 (Embalse La Arena), que se puede observar en la imagen inferior.



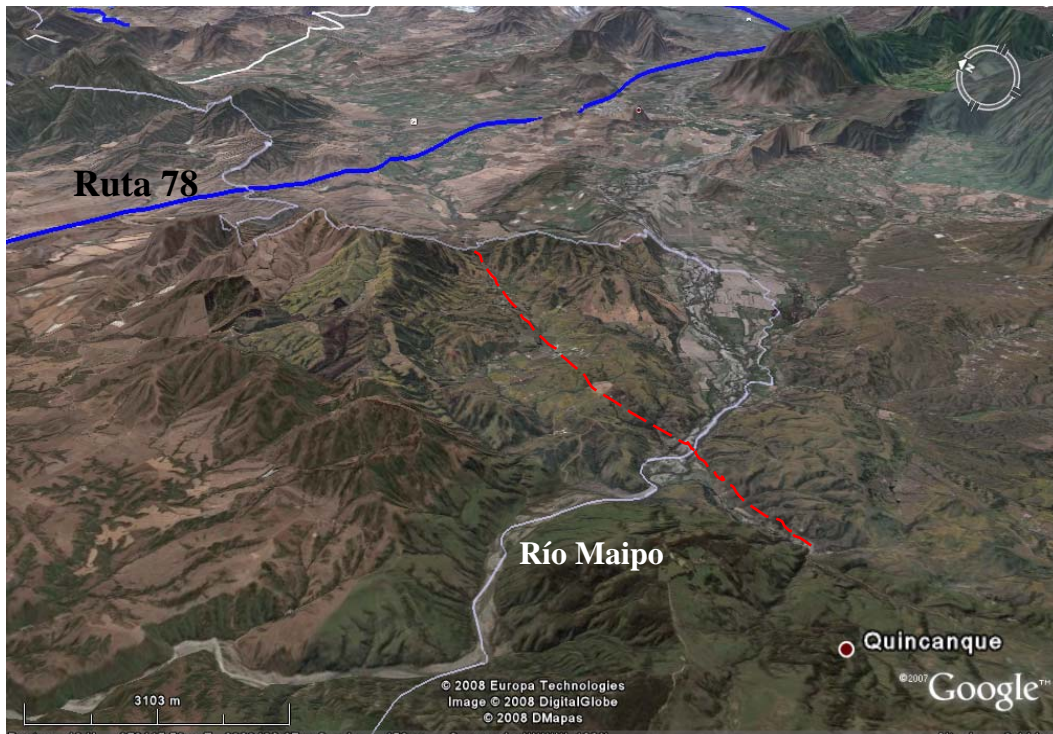
**Figura 4.26:** Mapa geológico entre los 33°S y los 33°55'S, donde se muestran las estructuras 6 (Estero El Sauce), 7 (Esteros de Cartagena) y 8 (Falla Río Maipo) del sistema NNE ubicadas en la zona sur del área de estudio. Las trazas se identifican con números. Los círculos indican las zonas donde se ha visto que estas fallas cortan a la Formación Navidad (Tn). (Modificado de Wall et al., 1996).

## 7 Esteros de Cartagena

En el mapa geológico de Wall et al. (1996), al este de San Antonio se observa una estructura de 11,2 km de largo, que ha sido observada cortando a rocas sedimentarias del Mioceno-Plioceno de la Formación Navidad (Tn) con orientación N45°W (Figura 4.26).

## 8 Falla Puangue

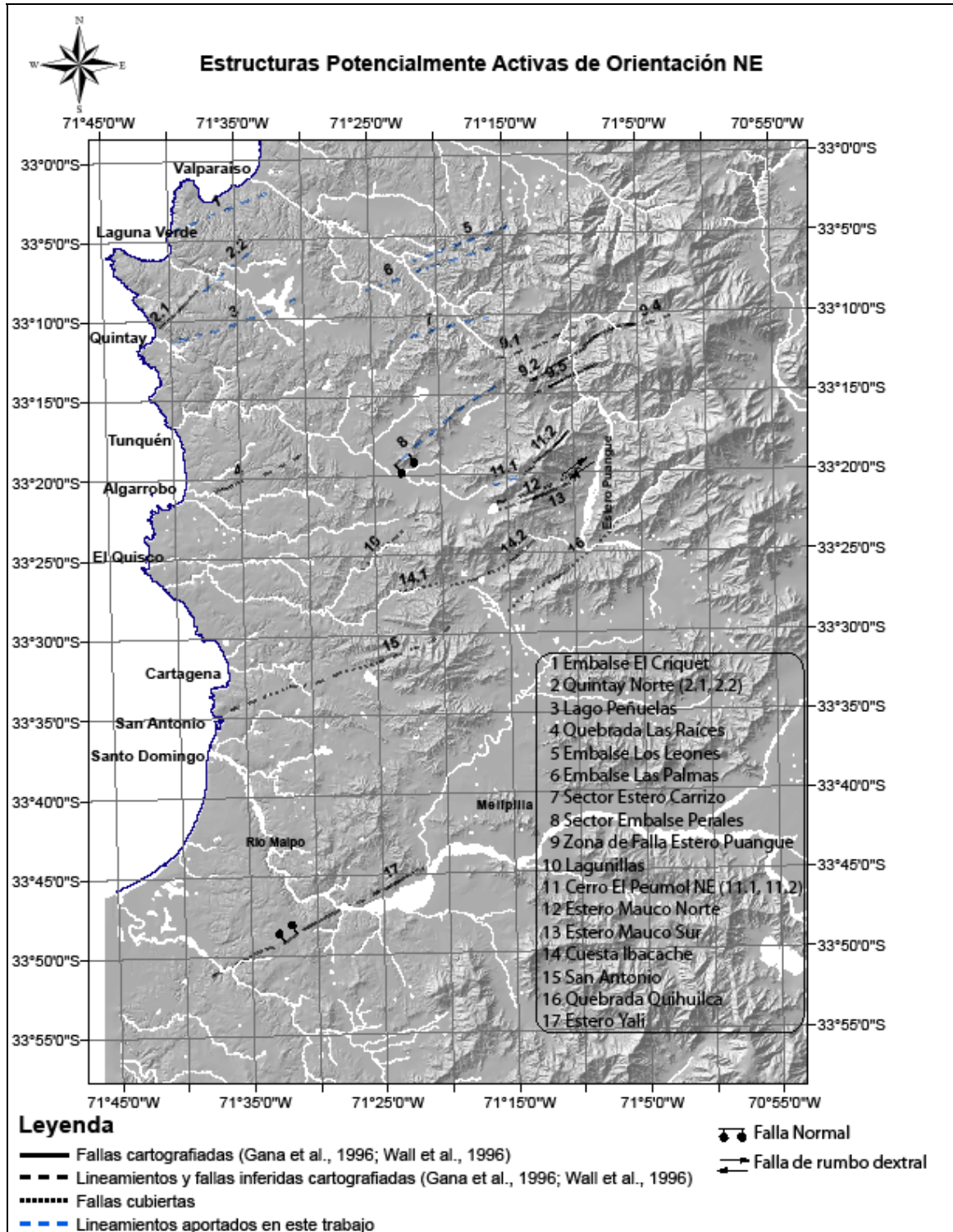
En el mapa geológico de Wall et al. (1996), al sureste de San Antonio se observa una falla normal que corta a rocas intrusivas antiguas (Pzp, Trjtv y Jp) de 36 km de largo y orientación N40°E. El bloque occidental alzado por la acción de esta falla, con respecto a las rocas ubicadas al este de su traza, habría impedido el avance de la ignimbrita Pudahuel (Qip) hacia el oeste en el Pleistoceno. La traza ha sido observada en el extremo sur del área de estudio, cortando a rocas intrusivas paleozoicas y triásicas (Pzmg y Trjtv) (Figura 4.26). En imágenes satelitales se observa un marcado lineamiento que cruza el Río Maipo, coincidente con la traza cartografiada de esta falla (Figura 4.27).



**Figura 4.27:** Imagen modificada de Google Earth, donde se muestra en rojo, el lineamiento correspondiente a la estructura 8 (Falla Puangue).

## 4.5 Sistema NE

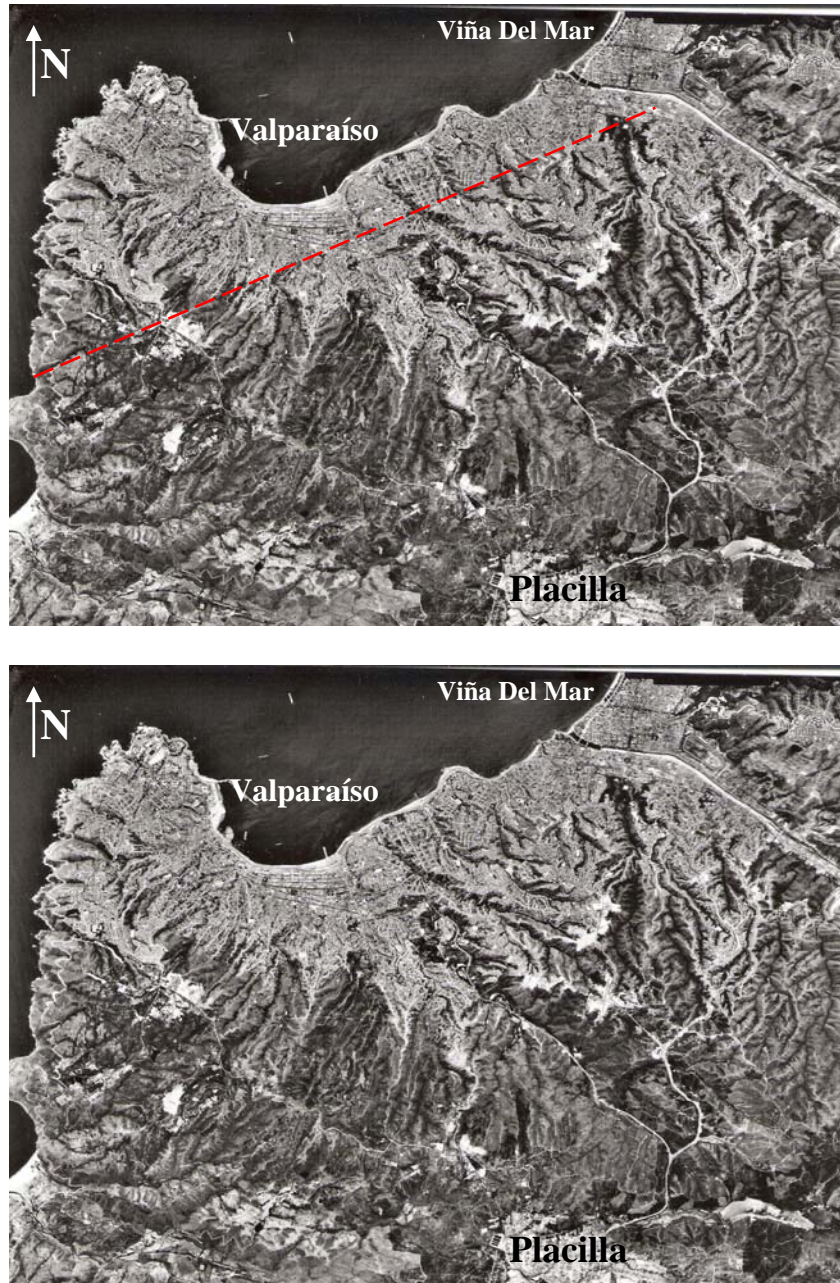
Al igual que el sistema NW (Figura 4.8), el sistema NE es de amplia ocurrencia en la zona de estudio. Muchas de estas estructuras no se encuentran en la cartografía del sector, sin embargo destacan en fotografías aéreas como lineamientos que coinciden en gran medida con la morfología del sector (Figura 4.28). Sus rumbos varían entre los 45° y los 75° (Figura 4a, Tabla 1).



**Figura 4.28:** Fallas y lineamientos potencialmente activos observados en la zona de estudio, pertenecientes al sistema de estructuras NE.

## 1 Embalse El Críquet

En fotografías aéreas, en las cercanías de Valparaíso, se observa un marcado lineamiento formado por escarpes en rocas que según el mapa geológico de Gana et al. (1996) corresponden a intrusivos paleozoicos (Pzmg) y jurásicos (Jlv, Js y Jlt). Se extiende discontinuo a lo largo de 12,3 km con orientación N65°E (Figura 4.29).



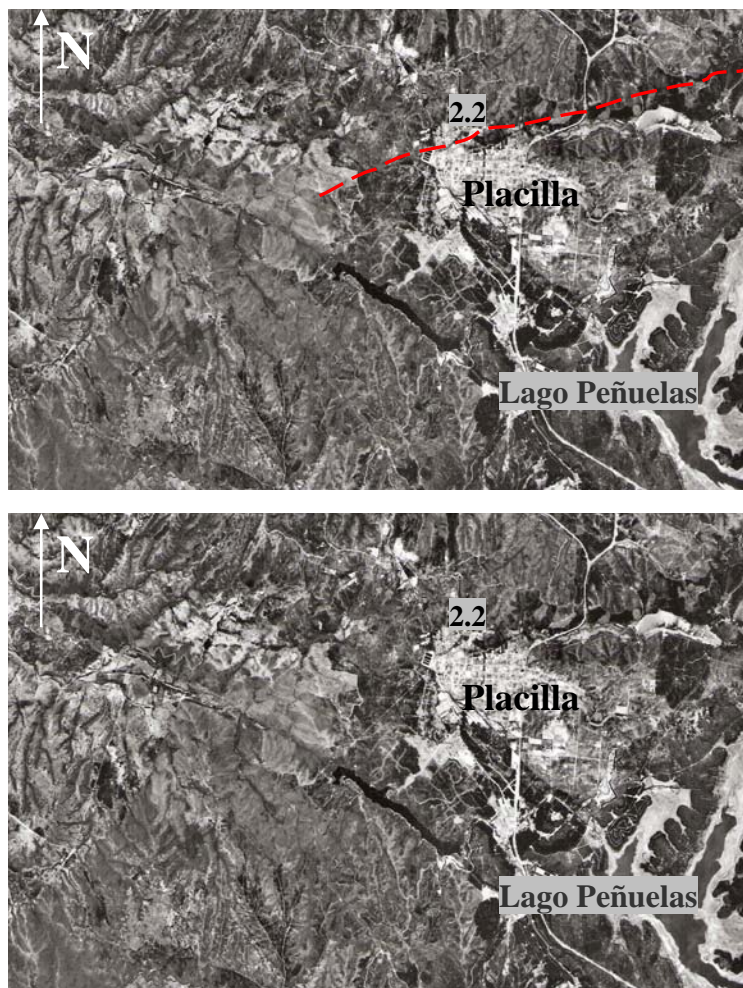
**Figura 4.29:** Fotografía aérea del sector de Valparaíso. La imagen superior muestra en rojo el lineamiento correspondiente a la estructura 1 (Embalse El Críquet) que se puede distinguir en la imagen inferior.

## 2 Quintay Norte

En fotografías aéreas se observa, al norte de Quintay, un lineamiento discontinuo que, hacia el oeste coincide con una falla cartografiada (Gana et al., 1996). Para el análisis de peligro sísmico, se considera como dos estructuras que se describen a continuación (Figura 4.28).

**2.1 Sector Suroeste:** estructura cartografiada (Gana et al., 1996) ubicada al norte de Quintay. Corta a rocas intrusivas jurásicas (Js) y se extiende con orientación N45°E por 6,3 km. Ha sido observada en dos sectores por cerca de 3 km, donde no se ha podido determinar su mecanismo. En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con esta traza.

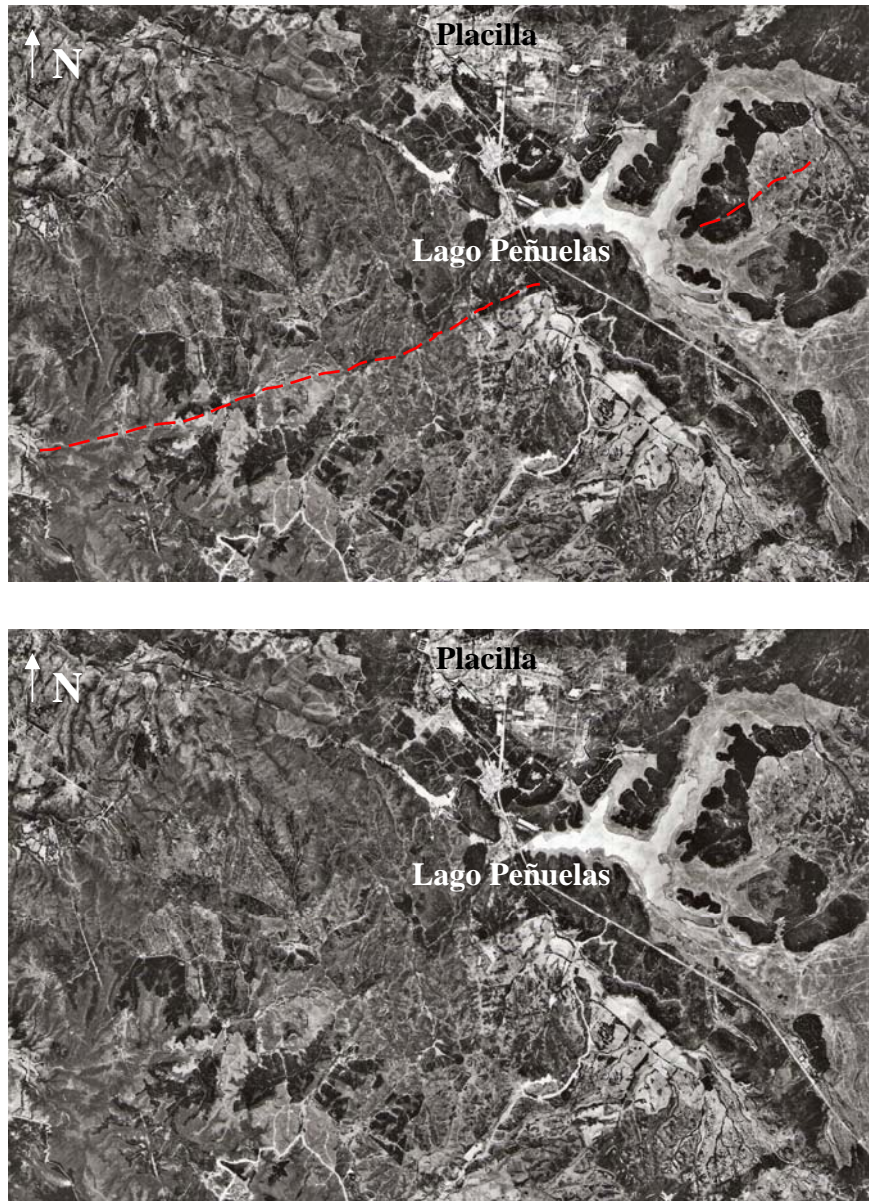
**2.2 Sector Placilla:** en fotografías aéreas, en las cercanías de Placilla, se observa un lineamiento formado por escarpes en rocas que según el mapa geológico de Gana et al. (1996), corresponden a intrusivos jurásicos (Js). Su orientación es N50°E y se distingue a lo largo de 8 km (Figura 4.30).



**Figura 4.30:** Fotografía aérea del sector de Valparaíso. La imagen superior muestra en rojo el lineamiento correspondiente a la estructura 2.2 (Quintay Norte, Sector Placilla) que se puede distinguir en la imagen inferior.

### 3 Lago Peñuelas

En fotografías aéreas se observa un marcado lineamiento que cruza el lago Peñuelas con dirección noreste (Figuras 4.28 y 4.31). Formado por escarpes en rocas, que según el mapa geológico de Gana et al. (1996) corresponden a intrusivos jurásicos (Js), se extiende discontinuo a lo largo de 15,2 km con orientación N65°E.



**Figura 4.31:** Fotografía aérea del sector de Valparaíso. La imagen superior muestra en rojo el lineamiento correspondiente a la estructura 3 (Lago Peñuelas) que se puede ver en la imagen inferior.



#### **4 Quebrada Las Raíces**

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías de Algarrobo (Figura 4.28) se observa una estructura que coincide con la quebrada Las Raíces y que corta a rocas intrusivas paleozoicas y jurásicas (Pzmg, Js y Jp). Se extiende a lo largo de 12,2 km con orientación N75°E. Hacia el suroeste ha sido observada controlando el curso del estero El Membrillo, donde no se ha podido determinar su mecanismo (Figura 4.36). En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con la traza cartografiada.

En fotografías aéreas, al sureste de Quilpue, se observan diversos lineamientos correspondientes a escarpes en rocas intrusivas jurásicas (Gana et al., 1996). La Figura 4.32 muestra aquellos lineamientos que más destacan en visión estereoscópica, razón por la que fueron seleccionados para el análisis de peligro sísmico. Estas estructuras corresponden a los números 5, 6 y 7 que se describen a continuación:

#### **5 Embalse Los Leones**

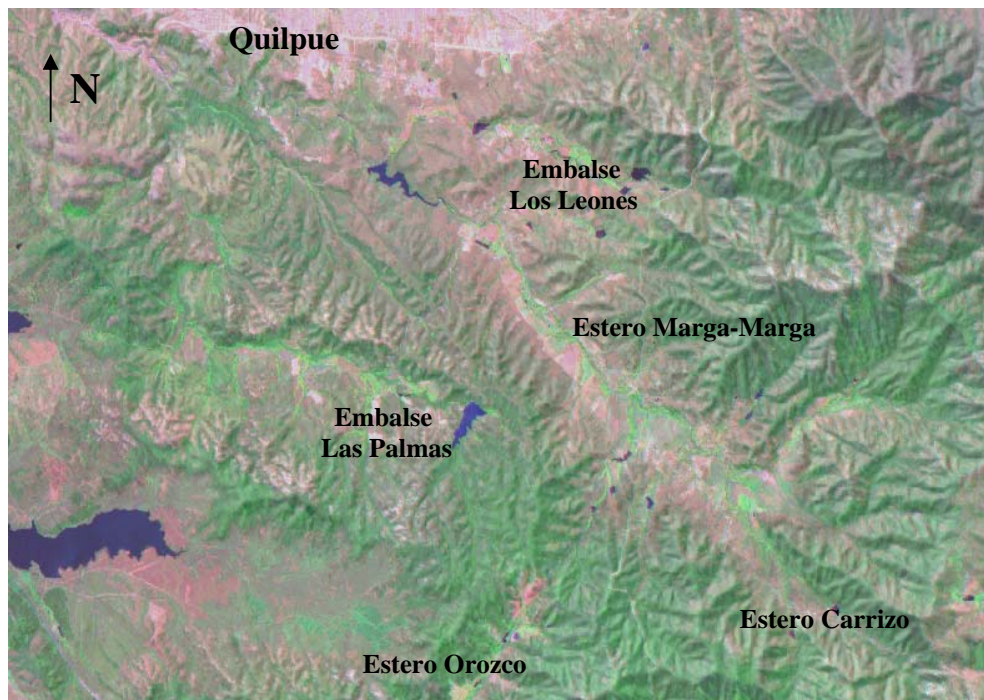
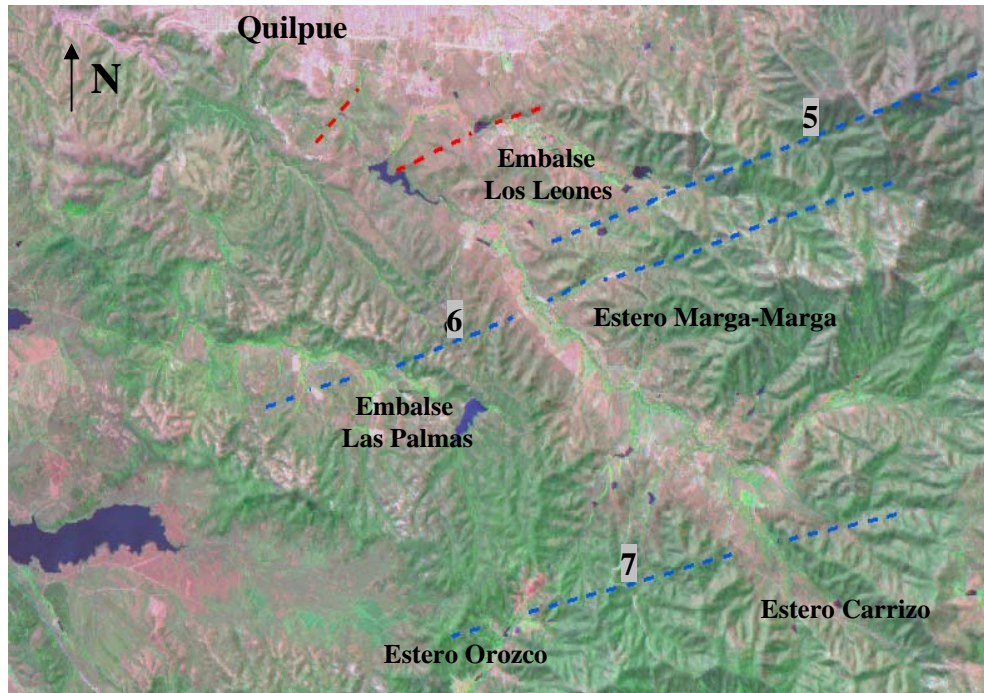
En fotografías aéreas e imágenes satelitales, en las cercanías del embalse Los Leones, al sureste de Quilpue (Figura 4.28), se observa un lineamiento definido por escarpes en rocas, que según el mapa geológico de Gana et al. (1996), corresponden a intrusivos jurásicos (Jllg). Se distingue discontinuo a lo largo de 12,5 km con orientación N70°E (Figura 4.32).

#### **6 Embalse Las Palmas**

En fotografías aéreas e imágenes satelitales se observa, al este del lago Peñuelas, en las cercanías del embalse Las Palmas (Figura 4.28), un lineamiento formado por escarpes en rocas intrusivas jurásicas (Jp y Jlt) y que hacia el noreste se pierde bajo sedimentos holocenos aluviales (Qa) (Gana et al., 1996). Se reconoce discontinuo de 16,5 km con orientación N60°E (Figura 4.32).

#### **7 Sector Estero Carrizo**

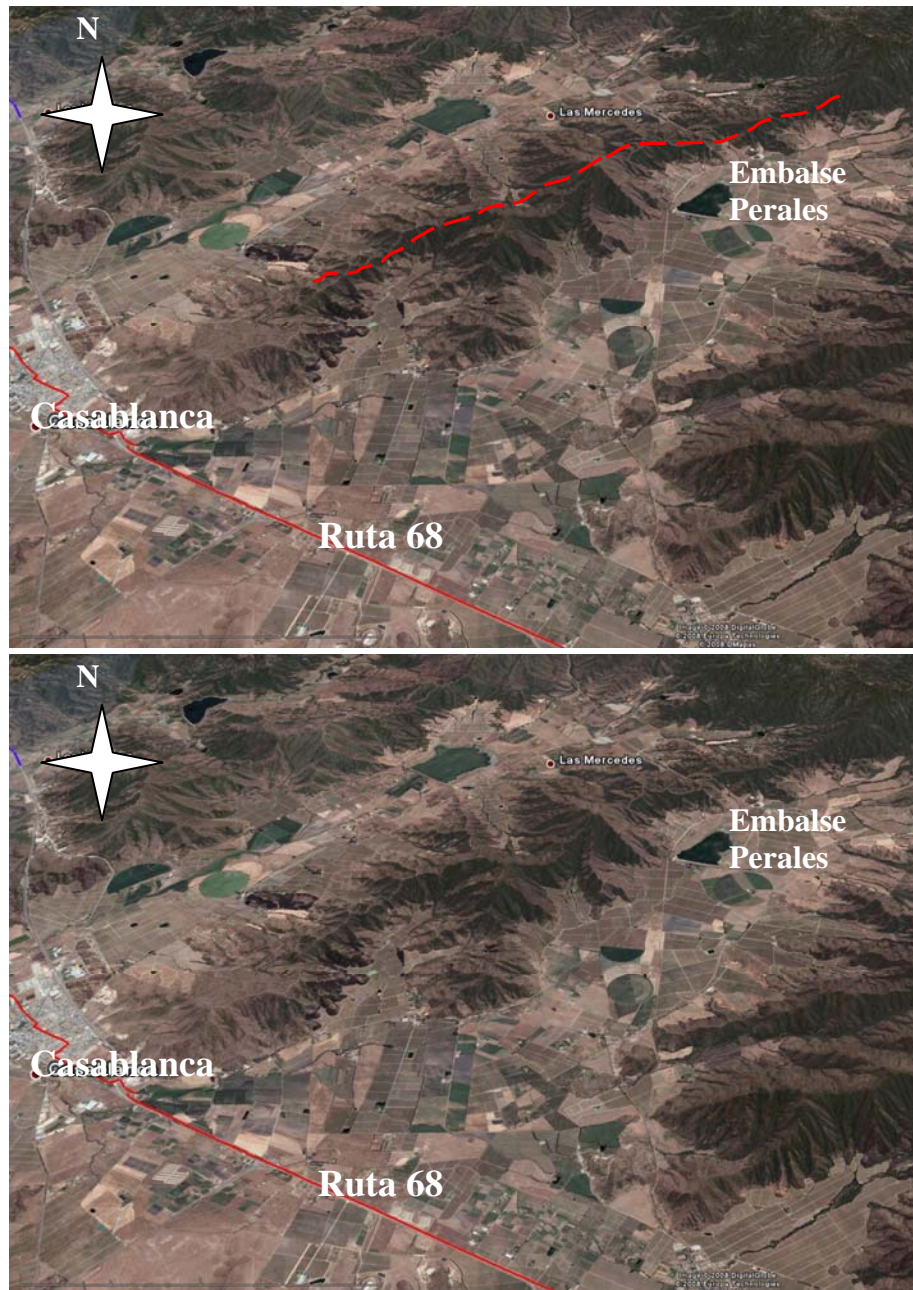
En fotografías aéreas e imágenes satelitales, al este del estero Orozco (Figura 4.28), se observa un lineamiento definido por escarpes en rocas, que según el mapa geológico de Gana et al. (1996), corresponden a intrusivos jurásicos (Jp y Jlt). Se distingue discontinuo a lo largo 11,7 km con orientación N70°E (Figura 4.32).



**Figura 4.32:** Imagen satelital (ASTER) sobre modelo de sombras (hillshade) al sureste de Quilque. La imagen superior muestra en azul los lineamientos correspondientes a las estructuras 5, 6 y 7 del sistema NE, que se indican con números y que se pueden ver en la imagen inferior.

## 8 Sector Embalse Perales

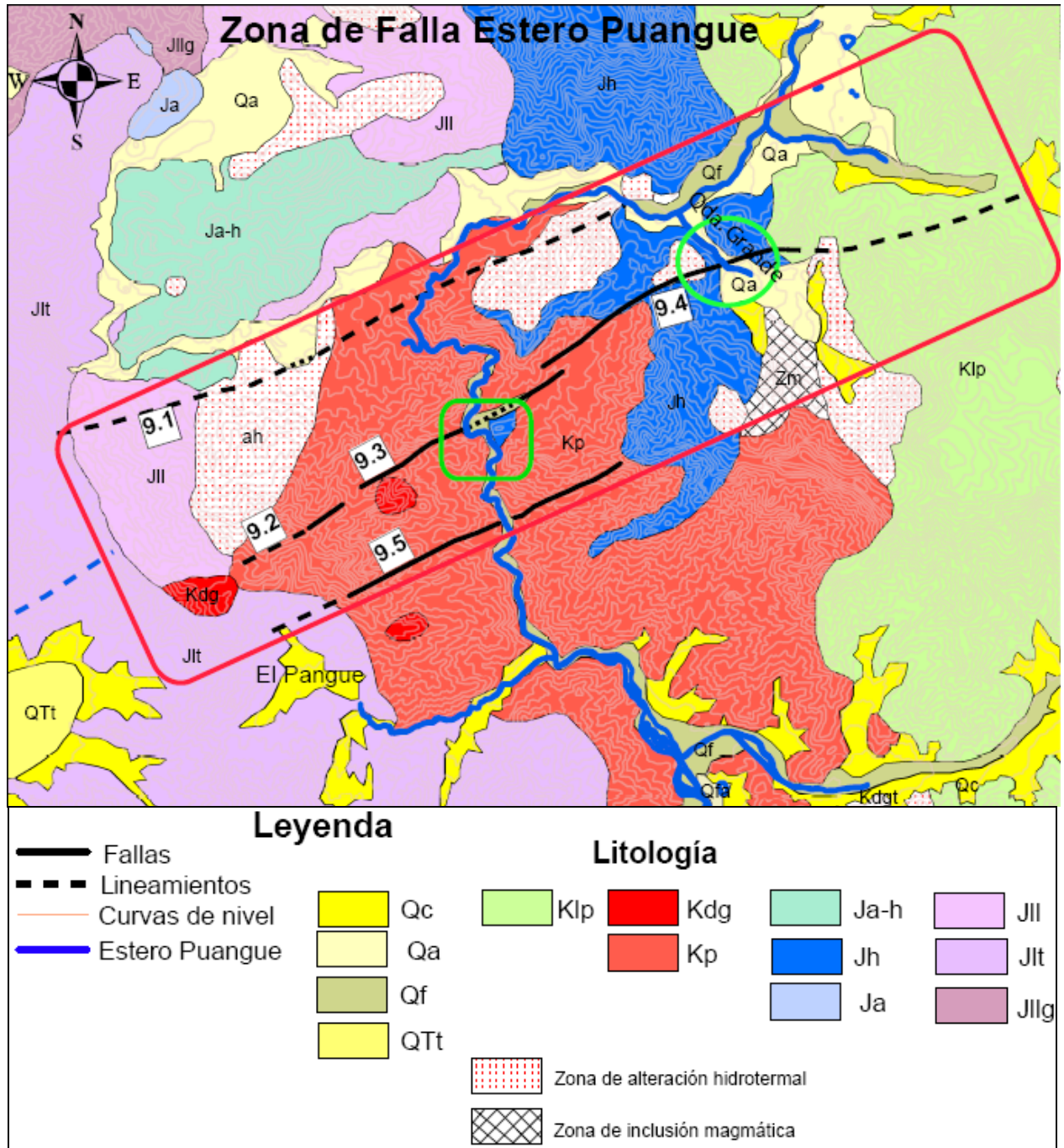
En fotografías aéreas e imágenes satelitales, en las cercanías de Casablanca, se observa un lineamiento definido por escarpes en rocas, que según el mapa geológico de Gana et al. (1996), corresponden a intrusivos jurásicos (Jp y Jlt). Se reconoce a lo largo de 15 km y su orientación es N55°E (Figura 4.33). Hacia el suroeste el lineamiento coincide con una pequeña falla normal que corta a rocas a estos intrusivos con igual orientación. Se estima que este lineamiento es la prolongación hacia el noreste de dicha falla, por lo que la estructura considerada en el análisis de peligro sísmico, corresponde a una falla normal de 16,4 km de largo y orientación N55°E (Figura 4.36).



**Figura 4.33:** Imagen satelital tomada de Google Earth al este de Casablanca. La imagen superior muestra, con una línea roja discontinua, el lineamiento correspondiente a la estructura 8 (Sector Embalse Perales), que se pueden ver en la imagen inferior. La línea roja continua, dibujada en ambas imágenes, corresponde a la ruta 68.

## 9 Zona de Falla Estero Puangue

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías del estero Puangue, se distingue un conjunto de lineamientos que definen una zona de aproximadamente 10 km de ancho, 30 km de largo y orientación N60°E (Figura 4.34). Se observa que estas estructuras afectan al estero provocando inversiones hacia el este en su red de drenaje.



**Figura 4.34:** Zona de Falla Estero Puangue enmarcada en rojo. Se observan inversiones hacia el este de la red de drenaje del estero Puangue (recuadro verde). El círculo verde indica la zona donde la estructura 9.4 corta a depósitos aluviales (Qa) (modificado de Gana et al., 1996).

Las estructuras pertenecientes a la Zona de Falla Estero Puangue se describen a continuación.

### **9.1 Colliguay**

Estructura de 13 km de largo y orientación N60°E, que corta a rocas intrusivas jurásicas y cretácicas. Corresponde a un lineamiento cartografiado (Gana et al., 1996) y fue observado en fotografías aéreas formado por escarpes que se alinean coincidiendo con la cartografía (Figura 4.34).

### **Quebrada Grande**

Estructura que corta a rocas cretácicas y jurásicas (Kp, Klp, Jh). En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con tres trazas cartografiadas que corresponden a los tramos 9.2, 9.3 y 9.4 que se describen a continuación (Figura 4.34).

**9.2 Sector Suroeste:** corta a rocas intrusivas cretácicas (Kp) a lo largo de 2,4 km. Ha sido observada continua por 800 metros, donde no se ha podido determinar su mecanismo. Su orientación es N60°E.

**9.3 Sector estero Puangue:** corta a rocas intrusivas cretácicas (Kp) y se encuentra cubierta por sedimentos holocenos fluviales (Qf) del estero Puangue, cuyo curso se encuentra afectado por esta falla mediante la inversión hacia el este de su red de drenaje (Figura 4.34). Ha sido observada discontinua a lo largo de 4,9 km y su orientación es N65°W. En terreno se observó una zona de cizalle en roca intrusiva de más de 10 m de ancho que correspondería a esta estructura.

**9.4 Sector Noreste:** corta a rocas jurásicas de la Formación Horqueta (Jh), a rocas intrusivas cretácicas (Kp), a rocas cretácicas de la Formación Lo Prado (Klp) y a zonas de alteración hidrotermal (ah). Ha sido observada cortando a depósitos holocenos aluviales (Qa) en el sector de Quebrada Grande (Gana et al., 1996). En imágenes satelitales de esta zona se observan además, algunos deslizamientos que podrían estar asociados a esta falla. La traza es sinuosa y mide 10,8 km de largo. Su orientación varía desde N50°E hasta N70°E hacia el este (Figura 4.35).

### **9.5 El Pangue norte**

Al norte de la localidad El Pangue (Figura 4.34) se observa otra traza cartografiada (Gana et al., 1996) perteneciente a la zona de falla Estero Puangue, que corta a rocas intrusivas cretácicas y jurásicas (Kp y Jlt). La traza se extiende a lo largo de 8,3 km con orientación N60°E. Ha sido observada cortando a rocas intrusivas cretácicas (Kp) a lo largo de 6,5 km desapareciendo sólo bajo sedimentos fluviales holocenos del estero Puangue. Sin embargo su mecanismo no ha sido determinado. En fotografías aéreas se observa un lineamiento formado por escarpes coincidente con la traza cartografiada.



**Figura 4.35:** Imagen tomada de Google Earth en las cercanías del estero Puangue. En la imagen superior se muestran en rojo los tres tramos de la estructura Quebrada Grande (9.2, 9.3 y 9.4), que se pueden ver en la imagen inferior.

## 10 Lagunillas

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías de Lagunillas, al sur de Casablanca, se observa una estructura que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jp y Jpg) y se encuentra cubierta por sedimentos holocenos coluviales (Qc) y fluviales (Qf) del estero Lagunillas, cuyo cauce controla. La traza se extiende a lo largo de 9,2 km con orientación N45°E y se desconoce su mecanismo debido a que la falla no ha sido observada (Figura 4.36).

Al sur de la zona de falla Estero Puangue se observa otra zona que presenta un conjunto de estructuras con similar orientación entre sí. En general sus trazas son sinuosas y disminuyen su rumbo hacia el este. Estas estructuras, que corresponden a los números 11 al 16, se describen a continuación y se muestran en la Figura 4.36, donde se pueden ver además, las estructuras 4, 8 y 10.

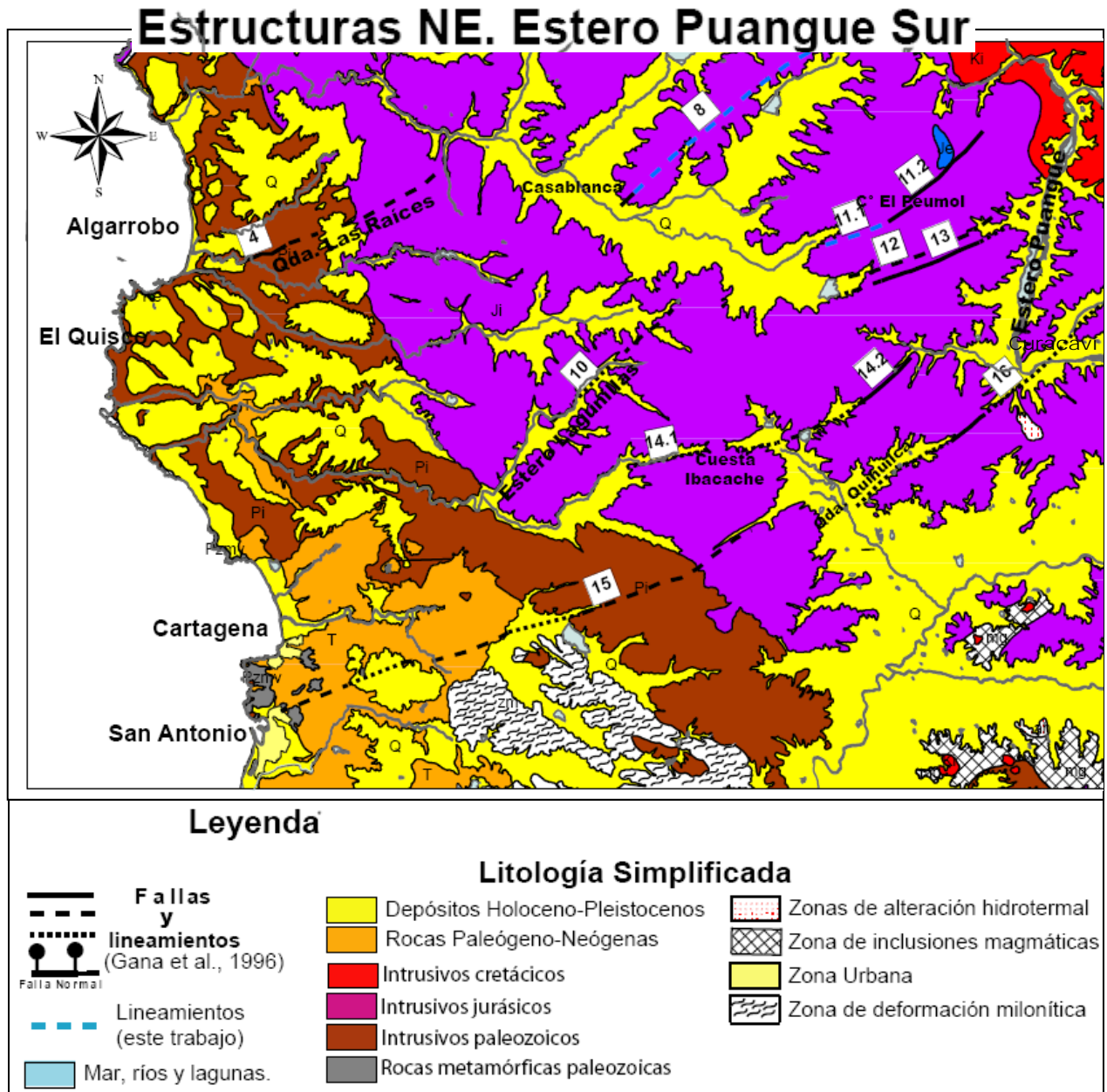


Figura 4.36: Mapa geológico simplificado entre Algarrobo y San Antonio.

## 11 Cerro El Peumol NE

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), al oeste del estero Puangue (Figura 4.36), se observa una estructura que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlg y Jlt) del cerro El Peumol. Esta estructura está formada por dos trazas que se describen a continuación:

**11.1 Sector Suroeste:** estructura cartografiada que ha sido observada por menos de 2 km con orientación N50°E. Su mecanismo no ha sido determinado. En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean con esta estructura extendiéndose hacia el suroeste unos 4 km con orientación N60°W. Así, la estructura a considerar consiste en una traza de 5,4 km de largo y orientación general N60°W (Figura 4.36).

**11.2 Sector Noreste:** estructura cartografiada que ha sido observada por 5,6 km con orientación N50°E. Su mecanismo no ha sido determinado. En fotografías aéreas se observan escarpes que se alinean coincidiendo con esta estructura.

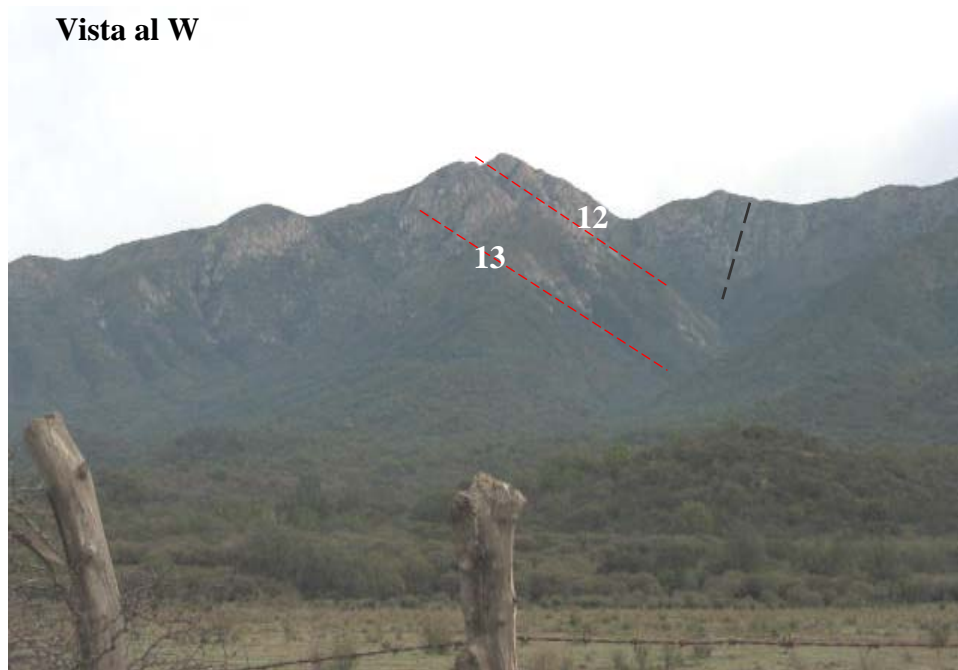
## 12 Estero Mauco Norte

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), al oeste del estero Puangue (Figura 4.36), se observa una falla de rumbo dextral que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlt) y está cubierta por sedimentos holocenos coluviales (Qc). Su traza, de 10,9 km de largo y orientación general N70°E ha sido observada hacia el este, en las cercanías del estero Puangue, a lo largo de 700 m cortando a rocas intrusivas jurásicas (Jlt) con mecanismo dextral (Figura 4.28). En fotografías aéreas se observan escarpes que forman un definido lineamiento coincidente con la estructura cartografiada. En terreno, sector estero el Pangué, 10 km al norte de la ruta 68, se observó un lineamiento con rumbo estimado de 80°, correspondiendo a esta falla (Figura 4.37).

## 13 Estero Mauco Sur

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), al oeste del estero Puangue (Figura 4.36), se observa una estructura que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlt) y está cubierta por sedimentos holocenos coluviales (Qc). Su traza, de 10,2 km de largo y orientación general N70°E ha sido observada al sur del cerro El Peumol, a lo largo de 6 km cortando a rocas intrusivas jurásicas (Jlt), sin embargo no se ha podido determinar su mecanismo. En fotografías aéreas se observan escarpes que forman un definido lineamiento coincidente con la estructura cartografiada. En terreno, sector estero el Pangué 10 km al norte de la ruta 68, se observó un lineamiento con rumbo estimado de 80°, correspondiendo a esta falla (Figura 4.37).





**Figura 4.37:** Fotografía tomada desde el estero Puangue, 10 km al norte de la ruta 68, mirando hacia el oeste. Las dos líneas rojas corresponden a las estructuras 12 (Estero Mauco Norte) y 13 (Estero Mauco Sur) del sistema NE. La línea gris corresponde a la estructura 9 del sistema NW (Cerro Peumol NW) (ver Capítulo 4.2).

## 14 Cuesta Ibacache

En la región sur del mapa geológico de Gana et al. (1996), al sur de la cuesta Zapata y en las cercanías de la cuesta Ibacache (Figura 4.36), se observa una estructura de traza sinuosa formada por los tramos 14.1 y 14.2 que se describen a continuación:

**14.1 Sector suroeste:** traza de 4,5 km de largo y orientación  $N75^{\circ}E$ . Se encuentra completamente cubierta por sedimentos holocenos coluviales (Qc).

**14.2 Sector noreste:** estructura sinuosa de 11,4 km de largo, cuya orientación varía entre  $N70^{\circ}E$  y  $N50^{\circ}E$ . Ha sido observada al este de Curacaví cortando a rocas intrusivas jurásicas (Jlt) y está en gran parte cubierta por sedimentos holocenos coluviales (Qc) y fluviales antiguos (Qfa), también del holoceno (Figura 4.36). En fotografías aéreas se observa este lineamiento formado por escarpes y en terreno, sector cuesta Ibacache, destaca una morfología de cerros bajos y alomados cruzados por una profunda quebrada de orientación coincidente.

## 15 San Antonio

En el mapa geológico de Wall et al. (1996), en las cercanías de San Antonio (Figura 4.36), se observa una estructura que corta a rocas del Mioceno-Plioceno pertenecientes a la Formación Navidad (Tn). Se extiende a lo largo de 28,6 km con orientación  $N70^{\circ}E$ . Hacia el noreste corta a rocas intrusivas paleozoicas (Pzmg). Su mecanismo no ha sido determinado.

## **16 Quebrada Quihuilca**

En el mapa geológico de Gana et al. (1996), en las cercanías de Curacaví (Figura 4.36), se observa una estructura que corta a rocas intrusivas jurásicas (Jlt). Se extiende a lo largo de 18,5 km con orientación N50°E. Está cubierta por sedimentos holocenos coluviales (Qc) y fluviales antiguos (Qfa), cuya disposición y ocurrencia se asocia a la presencia de esta falla. Su traza pasa bajo la ciudad de Curacaví (Figura 4.36) y ha sido observada al suroeste de dicha ciudad a lo largo de 2,5 km, donde no se ha podido determinar su mecanismo. En fotografías aéreas se observan escarpes que coinciden con este lineamiento.

## **17 Estero Yali**

En el mapa geológico de Wall et al. (1996), en las cercanías del Río Maipo (Figura 4.28), se observa una estructura que corta a rocas intrusivas triásicas y jurásicas (TrJtv, Jp, Jlt) con orientación N60°E. Hacia el suroeste, fuera del área de estudio, esta falla ha sido observada de mecanismo normal cortando a rocas post miocenas (TQpa y QTt). Se extiende a lo largo de 28,3 km y hacia el sur, en las cercanías del estero Yali, se observa una curvatura en el curso de dicho estero, que se asocia a la presencia de esta falla.

## 5. SISMICIDAD Y PELIGRO DETERMINISTICO

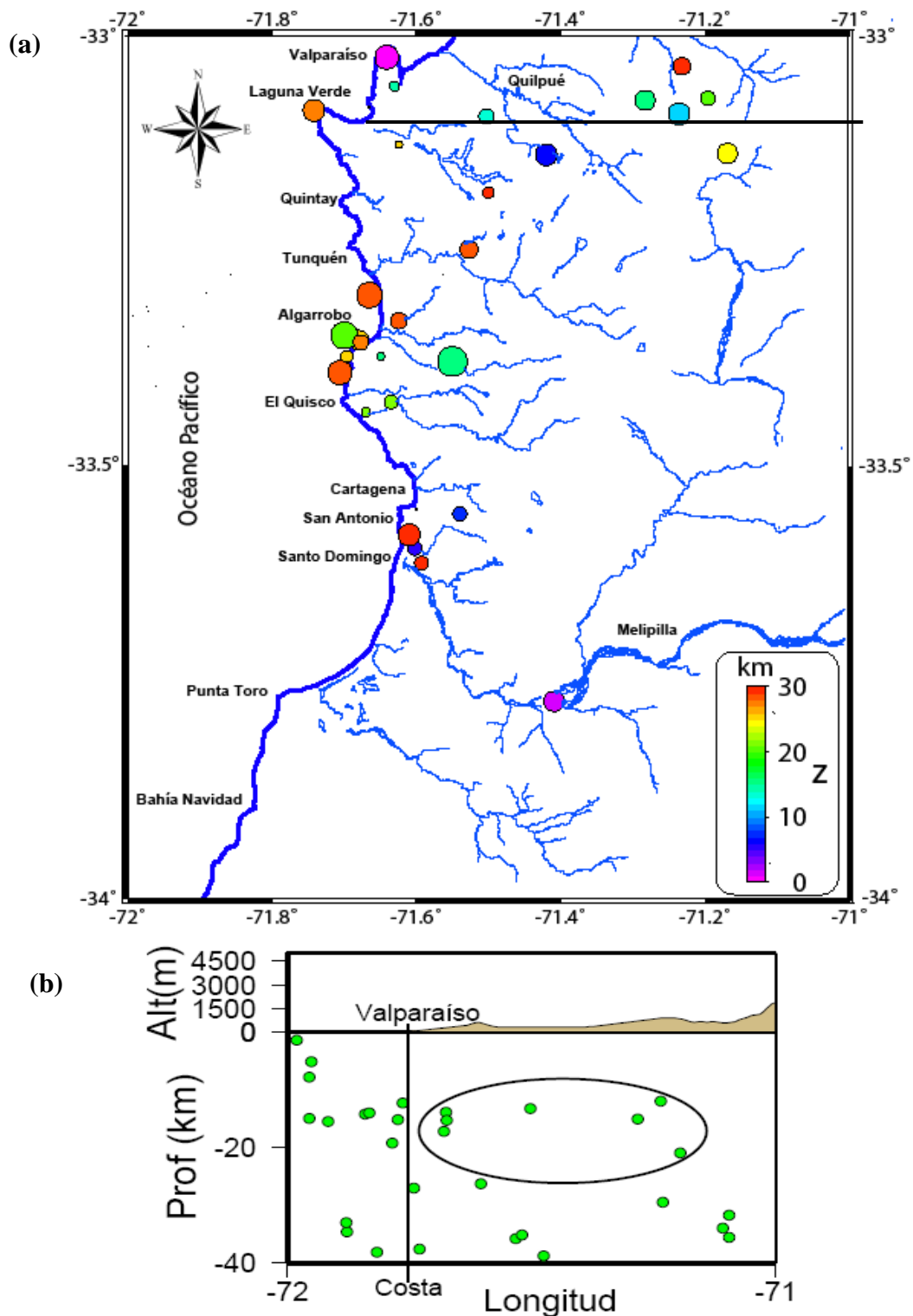
El estudio de peligro sísmico cortical en la región se sustenta en la existencia de numerosas fallas que coinciden fuertemente con la morfología y que presentan evidencias de corresponder a zonas actuales de debilidad. Además, en el registro del Servicio Sismológico Nacional se observa sismicidad con focos de profundidad menor a 30 km que corresponden a sismos cuyos focos se encuentran lejos del contacto entre las placas, por lo que se podrían asociar a actividad cortical (Figura 5.1). Por otro lado, la zona central de Chile y particularmente la región de Valparaíso, tiene gran relevancia para el país tanto por la cantidad de habitantes, como por su importancia económica. De aquí que este estudio corresponde a una primera aproximación en la determinación del peligro sísmico asociado a potenciales fuentes corticales presentes en esta importante zona del país con la finalidad de ayudar a refinar los mapas de peligro sísmico de la región.

En general, el análisis de peligro sísmico se puede realizar mediante dos metodologías, una probabilística y otra determinística. La metodología probabilística consiste básicamente en 5 pasos: (1) definir fuentes sismogénicas, (2) determinar parámetros sísmicos para cada fuente, (3) determinar la productividad sísmica mediante la ley de Gutenberg-Richter, (4) estimar las aceleraciones máximas mediante leyes de atenuación adecuadas y (5) estimar la probabilidad de exceder una cierta aceleración en un período de tiempo determinado.

La metodología determinística en cambio, analiza sólo el peor escenario sin preocuparse de cuándo y con qué probabilidad esto pueda ocurrir. Datos geológicos e históricos muestran que los terremotos no ocurren necesariamente en ciclos, con períodos de recurrencia constantes y por lo tanto, el cuándo va a ocurrir el próximo terremoto es desconocido. Las aproximaciones determinísticas evitan tener que realizar estas especulaciones.

En este trabajo se utiliza la metodología determinística que consistió en los siguientes pasos:

- (1) Identificación y caracterización de las fuentes sismogénicas (estructuras potencialmente activas definidas en el Capítulo 4). En particular se midió el largo de cada estructura en superficie a partir de la cartografía, imágenes satelitales y fotografías aéreas. En los casos en que fue posible, se determinó también el mecanismo (Tabla 1).
- (2) Determinación de la magnitud ( $M_w$ ) del terremoto máximo posible para cada falla (Tabla 2). Los valores de magnitud fueron calculados mediante regresiones empíricas que relacionan el largo de ruptura y el mecanismo con la magnitud. Estas relaciones fueron obtenidas en base a datos mundiales de sismos superficiales (Wells y Coppersmith, 1994). En los casos en que el mecanismo es desconocido, se consideró el valor de magnitud promedio. Dada la falta de información histórica, se consideró el largo de la traza como largo de ruptura en superficie (**LRS**). En algunos casos, sólo una parte de la traza podría ser desplazada y generar por lo tanto, eventos de menor magnitud a los considerados en este estudio.



**Figura 5.1:** (a) Focos sísmicos con profundidades menores a 30 km entre los 33° y 34°S. Se observa que existe sismicidad superficial en la Cordillera de la Costa entre Valparaíso y San Antonio. El tamaño de los círculos se relaciona con la magnitud, siendo la máxima de 6.4. Sismicidad registrada por el Servicio Sismológico Nacional desde el año 2000. La línea negra corresponde al perfil en (b). (b) Perfil W-E a los 33,1°S. Los puntos verdes corresponden a los focos sísmicos. La elipse encierra los sismos con hipocentros a profundidades menores a los 20 km que se encuentran bajo la Cordillera de la Costa y que no pertenecen al contacto interplaca debido a que éste se encuentra a una profundidad promedio mayor a los 30 km en esa longitud, según el ángulo de subducción y la distancia a la fosa.

- (3) Determinación de parámetros sísmicos. A partir de la magnitud previamente estimada, y mediante otras relaciones empíricas (Wells y Coppersmith, 1994), es posible determinar algunos parámetros sísmicos que también dependen del tipo de fuente (mecanismo). Estos parámetros son: largo de ruptura en profundidad (**LRP**), ancho de ruptura medio en profundidad (**H**: hipocentro), desplazamiento máximo (**DM**) y desplazamiento promedio (**DP**) (Tabla 2).
- (4) Estimación del PGA. A partir de la magnitud y del mecanismo de cada falla se estimaron las aceleraciones horizontales máximas (**PGA**) y las distancias (**D**) a las que se alcanzaría diferentes valores del PGA, medidos en % de g, en caso de romper sísmicamente (Tabla 3). Los valores fueron calculados utilizando la relación de atenuación para sismos corticales propuesta por Campbell y Bozorgnia (2003), de las aceleraciones que estos terremotos pueden causar en roca. Las estructuras de mecanismo desconocido se consideraron como fallas inversas debido a que es el mecanismo que genera las mayores aceleraciones. Esta ley de atenuación es útil para analizar los efectos en roca cercanos a la fuente considerando una distancia mínima de 3 km y una máxima de 60 km a la fuente (Figura 5.2).
- (5) Elaboración de un mapa preliminar determinístico de peligro sísmico asociado a estructuras potencialmente activas. Los valores de aceleración horizontal máxima (PGA) obtenidos se utilizaron para definir grados de peligro. El PGA es el parámetro utilizado comúnmente para caracterizar los movimientos del terreno, aunque se sabe que es un indicador inestable y muy pobre de los posibles daños estructurales (Mualchin, 2004). La aceleración efectiva, que se define como un valor de pseudoaceleración, sería un parámetro más estable y adecuado (Laporte, 2006). Sin embargo, no tiene un significado físico claro (comunicación escrita, Felipe Leyton).

Considerando la escala de peligrosidad asociada al PGA, que ha sido definida mundialmente por la GSHAP, se elaboró un mapa de peligro sísmico donde se diferencian los sectores asociados a un grado de peligro bajo, medio, alto y muy alto. Los valores del PGA que definen los grados de peligrosidad regional (GSHAP, 1999) se asocian a terremotos de subducción y se basan en un análisis probabilístico. Así, la región de estudio corresponde, a nivel mundial, a una zona definida como de peligro “alto a muy alto” (Figura 5.3), con valores de aceleración igual o mayor a 0,4g (valor regional de peligro alto). Por otra parte, la norma sísmica chilena, Nch 433 of. 96 considera esta región como “zona 3”, con valores de aceleración efectiva ( $A_0$ ) mayores a 0,4g que, aunque no son comparables con los valores del PGA, también corresponde a la zona de mayor peligrosidad y que coincide con el borde costero a lo largo de casi todo el país (Figura 5.4).

En este estudio, por ser de sismicidad cortical, realizado mediante la metodología determinística y debido a que los valores de aceleración calculados son preliminares y conservadores, se definió para el valor de aceleración de 0,4g, un grado de peligro algo menor al de la escala mundial obteniéndose zonas con nivel de peligro medio y alto en el área de estudio (Figura 5.5).

(7) Estimación de intensidades. Mediante un análisis reciente del terremoto de Las Melosas de 1958, se ha estimado que sismos corticales de magnitud 7.0 pueden generar intensidades máximas de hasta 9 grados en la escala MSK<sup>1</sup>, sin considerar efectos de sitio (Sepúlveda et al., 2008). Este resultado sirve de base para estimar las intensidades esperadas en la región de estudio. Dicho análisis reveló valores de PGA, obtenidos mediante el método de Newmark<sup>2</sup>, entre 0,7g y 1,3g en suelo (Figura 5.6).

**Tabla 2:** Parámetros sísmicos calculados mediante relaciones empíricas (Wells y Coppersmith, 1994). (**Mw**: magnitud, **LRS**: largo de ruptura en superficie; **H**: hipocentros corregidos, **DM**: desplazamiento máximo, **DP**: desplazamiento promedio; N: Falla Normal; ND: mecanismo No Determinado; R: Falla de Rumbo; RS: Falla de Rumbo Sinestral; RD: Falla de Rumbo Dextral).

SET 1: ESTRUCTURAS E-W			LRS	LRP	H	DM	DP
Nombre	Tipo	Mw	(Km.)				
Placilla	N	5,82	5,3	10,7	4,9	0,189	0,164
Placilla	N	6,06	8,1	14,1	5,8	0,311	0,233
Estero Casablanca	ND	6,01	6,3	12,7	5,1	0,292	0,221
Estero El Membrillo	ND	6,38	13,2	21,1	5,4	0,591	0,400
Embalse Lo Orozco	RS	6,41	13,1	25,4	5,7	0,374	0,282
Colliguay Norte	ND	6,19	9,0	16,2	5,7	0,411	0,294
Colliguay Norte	ND	5,28	1,5	4,8	4,4	0,075	0,070
Cartagena	N	5,89	6,0	11,6	5,2	0,218	0,181

SET 2: ESTRUCTURAS NW			LRS	LRP	H	DM	DP
Nombre	Tipo	Mw	(Km.)				
Marga-Marga	N	6,17	9,8	16,0	5,2	0,389	0,273
Marga-Marga	RS	6,16	7,8	17,7	5,0	0,206	0,167
Marga-Marga	ND	6,20	9,2	16,5	5,7	0,419	0,300
Marga-Marga	ND	6,82	31,4	38,2	7,4	1,346	0,800
Marga-Marga	N	6,08	8,4	14,5	5,9	0,325	0,240
Valparaíso	N	6,03	7,7	13,6	5,7	0,293	0,223
Valparaíso	RD	6,76	27,0	42,0	5,8	0,863	0,584
Laguna verde	N	6,67	23,4	28,4	7,8	1,081	0,563
Valparaíso-Curacaví	ND	6,52	17,3	25,4	5,9	0,764	0,497
Valparaíso-Curacaví	ND	6,80	30,5	37,4	7,3	1,311	0,782
Quebrada Los Locos	ND	6,16	8,5	15,6	5,6	0,389	0,281
Embalse Purísima	N	5,96	6,8	12,6	5,4	0,253	0,202
Embalse Purísima	R	6,68	22,6	37,1	5,5	0,704	0,489
San Jerónimo	R	6,48	15,1	28,0	5,9	0,441	0,325
Pino Mar	N	7,01	42,7	42,3	8,3	2,191	0,928
Cerro Peumol NW	ND	6,92	38,7	44,0	7,0	1,645	0,947
Melipilla	N	7,08	48,3	45,9	8,9	2,534	1,029
Estero Ñanco	ND	6,70	25,4	33,0	6,9	1,102	0,676

<sup>1</sup> Monge y Astroza, 1989.

<sup>2</sup> El Método de Newmark calcula el desplazamiento de un deslizamiento (representado por un bloque rígido) bajo la acción de un movimiento sísmico (Figueras et al., 2005).

Tabla 2 (Continuación)

SET 3: ESTRUCTURAS NNW			LRS	LRP	H	DM	DP
Nombre	Tipo	Mw	(Km.)				
Río Maipo	N	6,23	10,9	17,2	5,5	0,440	0,298
Cordón Los Amarillos	RS	6,86	32,8	48,1	6,2	1,081	0,711
Estero Aranda	ND	6,88	35,3	41,4	7,7	1,505	0,879
Estero Puangue	ND	6,10	7,8	14,7	5,4	0,358	0,263
Sector Estero Carén	ND	6,50	16	24,1	5,8	0,710	0,467

SET 4: ESTRUCTURAS NNE			LRS	LRP	H	DM	DP
Nombre	Tipo	Mw	(Km.)				
Las Melosillas	ND	5,74	3,7	8,8	4,4	0,176	0,145
Las Melosillas	ND	5,98	6,0	12,3	5,0	0,279	0,213
Quebrada El Membrillo	ND	5,91	5,2	11,1	4,8	0,244	0,190
Estero Orozco	ND	6,22	9,7	17,1	5,8	0,441	0,313
Lo Ovalle	ND	6,76	28,0	35,4	7,1	1,211	0,732
Embalse La Arena	ND	6,11	8,0	14,7	5,4	0,358	0,263
Estero El Sauce	ND	6,10	7,5	14,3	5,4	0,345	0,254
Esteros de Cartagena	ND	6,30	11,2	18,8	5,1	0,505	0,351
Falla Puangue	N	6,90	36,0	37,8	8,5	1,793	0,805

SET 5: ESTRUCTURAS NE			LRS	LRP	H	DM	DP
Nombre	Tipo	Mw	(Km.)				
Embalse El Críquet	ND	6,34	12,3	20,1	5,2	0,552	0,378
Quintay norte	ND	6,01	6,3	12,7	5,1	0,292	0,221
Quintay norte	ND	6,12	8,0	14,8	5,4	0,362	0,265
Lago Peñuelas	ND	6,45	15,2	23,2	5,7	0,676	0,448
Quebrada Las Raíces	ND	6,34	12,2	20,0	5,2	0,548	0,376
Embalse Los Leones	ND	6,35	12,5	20,2	5,2	0,556	0,380
Embalse Las Palmas	ND	6,50	16,5	24,7	5,9	0,734	0,480
Sector Estero Carrizo	ND	6,32	11,7	19,4	5,1	0,527	0,363
Sector Embalse Perales	N	6,46	16,4	22,5	6,6	0,713	0,419
Colliguay	ND	6,37	13,0	20,9	5,3	0,582	0,395
Quebrada Grande	ND	5,52	2,4	6,6	4,9	0,117	0,102
Quebrada Grande	ND	5,88	4,9	10,7	4,7	0,230	0,181
Quebrada Grande	ND	6,28	10,8	18,4	6,0	0,488	0,341
El Pangué norte	ND	6,15	8,3	15,4	5,5	0,380	0,276
Lagunillas	ND	6,20	9,2	16,5	5,7	0,419	0,300
Cerro El Peumol NE	ND	5,93	5,4	11,4	4,9	0,253	0,196
Cerro El Peumol NE	ND	5,95	5,6	11,7	4,9	0,261	0,201
Estero Mauco Norte	RD	6,32	10,9	22,4	5,4	0,303	0,234
Estero Mauco Sur	ND	6,25	10,2	17,7	5,9	0,462	0,326
Cuesta Ibacache	ND	5,84	4,5	10,1	4,6	0,212	0,169
Cuesta Ibacache	ND	6,31	11,4	19,1	5,1	0,514	0,356
San Antonio	ND	6,80	28,6	35,8	7,2	1,232	0,742
Quebrada Quihuilca	ND	6,55	18,5	26,6	6,1	0,815	0,524
Estero Yali	N	6,80	28,3	32,2	7,5	1,351	0,659

**Tabla 3:** Distancias a las que se alcanzan diferentes valores de PGA para cada estructura calculados en base a la ley de atenuación propuesta por Campbell y Bozorgnia, 2003. La columna **PGA** corresponde a los valores del PGA máximo calculado a una distancia mínima de 3 km. de la falla. (N: Falla Normal; ND: mecanismo No Determinado; R: Falla de Rumbo; RS: Falla de Rumbo Sinestral; RD: Falla de Rumbo Dextral).

SET 1: ESTRUCTURAS E-W		LRS (Km)	PGA (% g)	D (Km)										
Nombre	Tipo			55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Placilla	N	5,3	38,8					4,2	5,8	7,7	10,3	14,3	21,8	42,8
Placilla	N	8,1	39,4					4,7	6,6	8,8	11,9	16,5	25,1	49,5
Estero Casablanca	ND	6,3	41,8				3,6	5,1	6,8	8,9	11,8	16,2	24,5	48,0
Estero El Membrillo	ND	13,2	48,7			4,1	5,6	7,3	9,2	11,7	15,1	20,6	30,9	60,5
Embalse Lo Orozco	RS	13,1	47,8			3,9	5,5	7,3	9,3	11,8	15,4	20,9	31,5	61,5
Colliguay Norte	ND	9,0	42,6				3,9	5,7	7,6	9,9	13,1	18,0	27,3	53,5
Colliguay Norte	ND	1,5	31,6					3,5	5,2	7,3	10,3	16,0	31,6	
Cartagena	N	6,0	38,8					4,3	6,0	8,0	10,8	14,9	22,8	44,8

SET 2: ESTRUCTURAS NW		LRS (Km)	PGA (% g)	D (Km)										
Nombre	Tipo			55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Marga-Marga	N	9,8	44,8				4,5	6,0	7,8	10,0	13,1	17,9	27,1	53,0
Marga-Marga	RS	7,8	45,7			3,2	4,6	6,1	7,9	10,1	13,1	17,9	27,0	52,8
Marga-Marga	ND	9,2	42,9				4,0	5,7	7,6	10,0	13,2	18,2	27,5	54,0
Marga-Marga	ND	31,4	49,5			5,1	7,2	9,4	12,0	15,3	19,9	27,1	40,8	79,8
Marga-Marga	N	8,4	39,3					4,7	6,6	8,9	12,0	16,7	25,5	50,0
Valparaíso	N	7,7	39,2					4,6	6,5	8,7	11,7	16,3	24,8	48,8
Valparaíso	RD	27,0	56,1	3,4	4,9	6,4	8,1	10,0	12,3	15,3	19,7	26,5	39,6	77,0
Laguna verde	N	23,4	44,1				5,2	7,5	10,1	13,3	17,6	24,3	36,8	72,3
Valparaíso-Curacaví	ND	17,3	49,3			4,5	6,1	7,9	10,0	12,7	16,5	22,4	33,8	65,8
Valparaíso-Curacaví	ND	30,5	49,6			5,1	7,1	9,3	11,9	15,2	19,7	26,9	40,4	79,0
Quebrada Los Locos	ND	8,5	42,5				3,9	5,6	7,4	9,7	12,9	17,7	26,8	52,5
Embalse Purísima	N	6,8	39,2					4,5	6,3	8,4	11,2	15,6	23,8	46,6
Embalse Purísima	R	22,6	55,5	3,2	4,6	6,1	7,6	9,4	11,6	14,5	18,6	25,1	37,5	73,0
San Jerónimo	R	15,1	48,4			4,2	5,8	7,6	9,7	12,4	16,1	21,9	32,9	64,3
Pino Mar	N	42,7	50,6		3,4	5,9	8,3	10,8	13,7	17,4	22,7	30,9	46,5	90,8
Cerro Peumol NW	ND	38,7	54,1		4,7	6,6	8,5	10,7	13,4	16,8	21,6	29,3	43,9	85,5
Melipilla	N	48,3	50,0		3,0	5,9	8,5	11,1	14,2	18,2	23,7	32,3	48,6	95,0
Estero Ñanco	ND	25,4	49,1			4,8	6,7	8,8	11,2	14,3	18,6	25,3	38,1	74,5

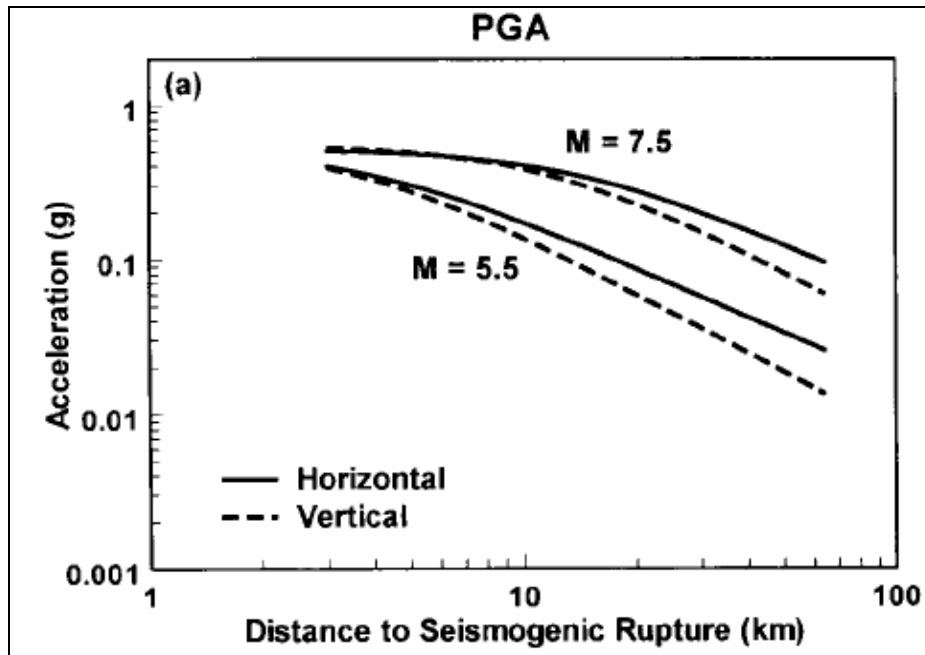
SET 3: ESTRUCTURAS NNW		LRS (Km)	PGA (%g)	D (Km)										
Nombre	Tipo			55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Río Maipo	N	10,9	44,6				4,5	6,1	8,0	10,4	13,6	18,6	28,1	55,0
Cordón Los Amarillos	RS	32,8	56,4	3,5	5,2	6,8	8,6	10,6	13,1	16,3	20,9	28,2	42,1	82,0
Estero Aranda	ND	35,3	49,6			5,3	7,4	9,7	12,4	15,9	20,7	28,2	42,4	82,8
Estero Puangue	ND	7,8	42,6				3,9	5,5	7,3	9,5	12,6	17,3	26,1	51,3
Sector Estero Carén	ND	16,0	48,9			4,3	5,9	7,7	9,7	12,4	16,1	21,9	32,9	64,3



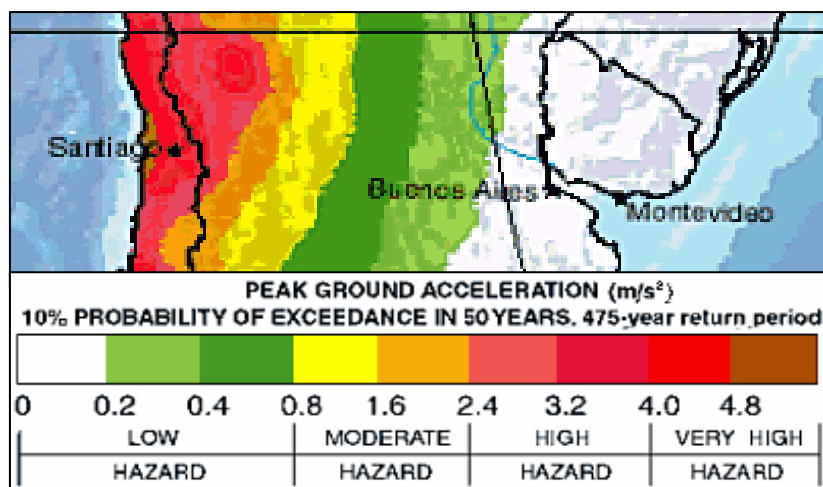
**Tabla 3 (Continuación)**

SET 4: ESTRUCTURAS NNE		LRS (Km)	PGA (%g)	D (Km)										
Nombre	Tipo			55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Las Melosillas	ND	3,7	39,9					4,3	5,8	7,6	10,0	13,8	20,9	41,0
Las Melosillas	ND	6,0	41,8				3,5	5,1	6,7	8,8	11,6	16,0	24,2	47,3
Quebrada El Membrillo	ND	5,2	41,3				3,4	4,8	6,4	8,4	11,1	15,3	23,1	45,3
Estero Orozco	ND	9,7	43,0				4,1	5,8	7,8	10,2	13,4	18,5	28,0	54,8
Lo Ovalle	ND	28,0	49,4			4,9	6,9	9,1	11,6	14,8	19,2	26,1	39,3	76,8
Embalse La Arena	ND	8,0	42,6				3,9	5,5	7,3	9,5	12,6	17,3	26,1	51,3
Estero El Sauce	ND	7,5	42,1				3,7	5,3	7,1	9,4	12,4	17,0	25,8	50,6
Esteros de Cartagena	ND	11,2	48,4			4,0	5,4	6,9	8,8	11,1	14,4	19,6	29,4	57,3
Falla Puangue	N	36,0	47,3			4,4	6,9	9,5	12,4	16,0	21,0	28,8	43,4	85,0

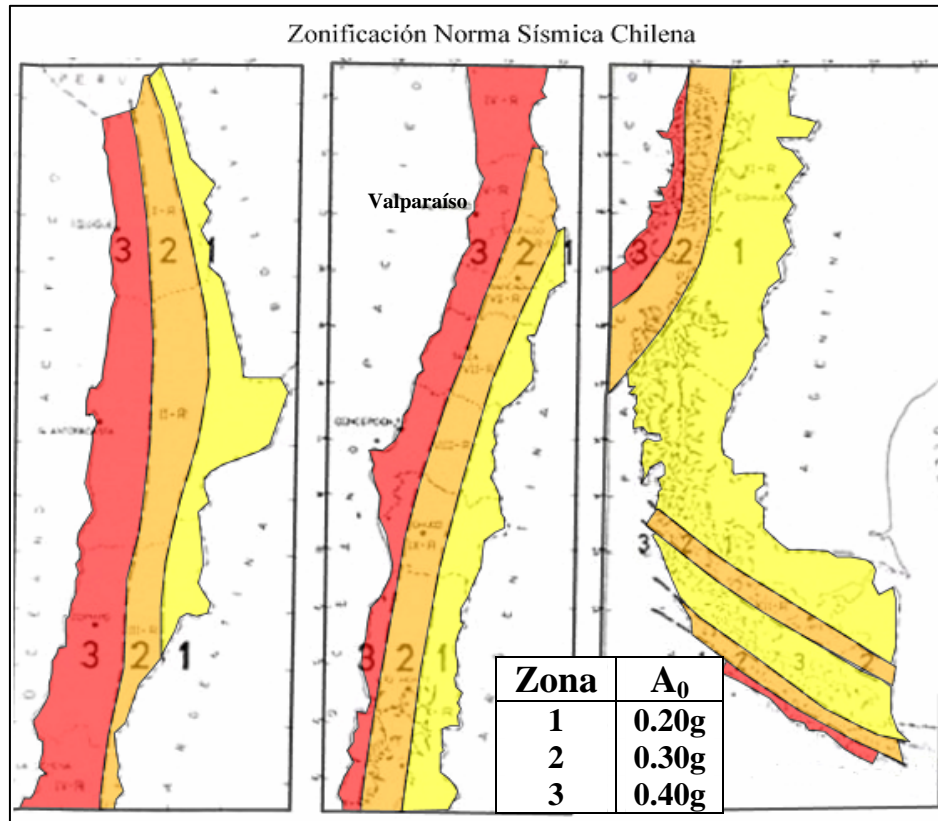
SET 5: ESTRUCTURAS NE		LRS (Km)	PGA (% g)	D (Km)										
Nombre	Tipo			55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Embalse El Críquet	ND	12,3	48,9			4,1	5,6	7,2	9,0	11,5	14,8	20,2	30,3	59,0
Quintay norte	ND	6,3	41,8				3,6	5,1	6,8	8,9	11,8	16,2	24,5	48,0
Quintay norte	ND	8,0	42,7				3,9	5,5	7,3	9,6	12,6	17,3	26,3	51,5
Lago Peñuelas	ND	15,2	48,8			4,2	5,8	7,5	9,6	12,2	15,8	21,5	32,3	63,3
Quebrada Las Raíces	ND	12,2	48,8			4,1	5,6	7,1	9,0	11,4	14,8	20,1	30,3	59,0
Embalse Los Leones	ND	12,5	49,0			4,2	5,6	7,2	9,1	11,5	14,9	20,2	30,3	59,3
Embalse Las Palmas	ND	16,5	48,8			4,3	6,0	7,7	9,8	12,5	16,3	22,1	33,3	65,0
Sector Estero Carrizo	ND	11,7	48,9			4,1	5,5	7,1	8,9	11,3	14,6	19,8	29,8	58,3
Sector Embalse Perales	N	16,4	44,6				4,9	6,9	9,1	11,8	15,6	21,4	32,4	63,5
Colliguay	ND	13,0	49,0			4,2	5,7	7,3	9,2	11,7	15,1	20,5	30,8	60,0
Quebrada Grande	ND	2,4	33,3						4,1	6,0	8,3	11,8	18,3	36,1
Quebrada Grande	ND	4,9	41,2				3,3	4,8	6,3	8,3	10,9	15,0	22,8	44,5
Quebrada Grande	ND	10,8	43,2				4,2	6,0	8,0	10,5	13,9	19,1	28,9	56,8
El Pangue norte	ND	8,3	42,7				3,9	5,6	7,4	9,7	12,8	17,6	26,6	52,3
Lagunillas	ND	9,2	42,9				4,0	5,7	7,6	10,0	13,2	18,2	27,5	54,0
Cerro El Peumol NE	ND	5,4	41,2				3,4	4,8	6,5	8,5	11,2	15,4	23,4	45,8
Cerro El Peumol NE	ND	5,6	41,6				3,5	4,9	6,6	8,6	11,4	15,6	23,7	46,3
Estero Mauco Norte	RD	10,9	47,3			3,7	5,2	6,9	8,8	11,2	14,5	19,8	29,8	58,3
Estero Mauco Sur	ND	10,2	43,0				4,1	5,9	7,9	10,3	13,6	18,8	28,4	55,8
Cuesta Ibacache	ND	4,5	40,9				3,2	4,6	6,2	8,1	10,6	14,7	22,2	43,5
Cuesta Ibacache	ND	11,4	48,6			4,0	5,4	7,0	8,8	11,2	14,5	19,7	29,6	57,8
San Antonio	ND	28,6	49,2			4,9	6,9	9,1	11,6	14,8	19,3	26,3	39,5	77,3
Quebrada Quihuilca	ND	18,5	49,1			4,5	6,2	8,0	10,2	12,9	16,8	22,9	34,4	67,3
Estero Yali	N	28,3	48,0			4,5	6,7	8,9	11,5	14,8	19,3	26,3	39,8	77,8



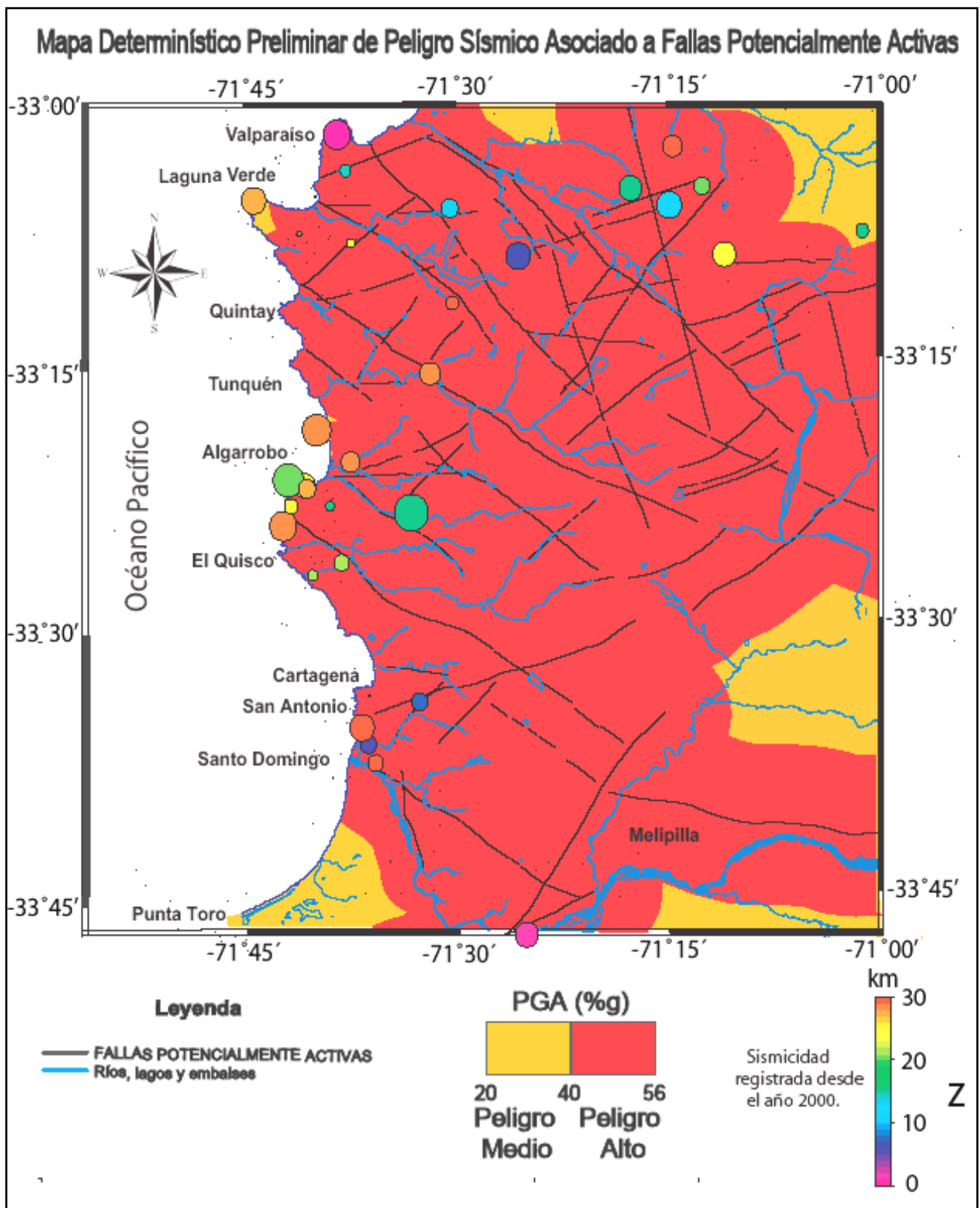
**Figura 5.2:** Ley de atenuación del PGA en roca para fallas de rumbo. La relación considera una distancia a la fuente mínima de 3 km y un máxima de 60 km. (Campbell y Bozorgnia, 2003).



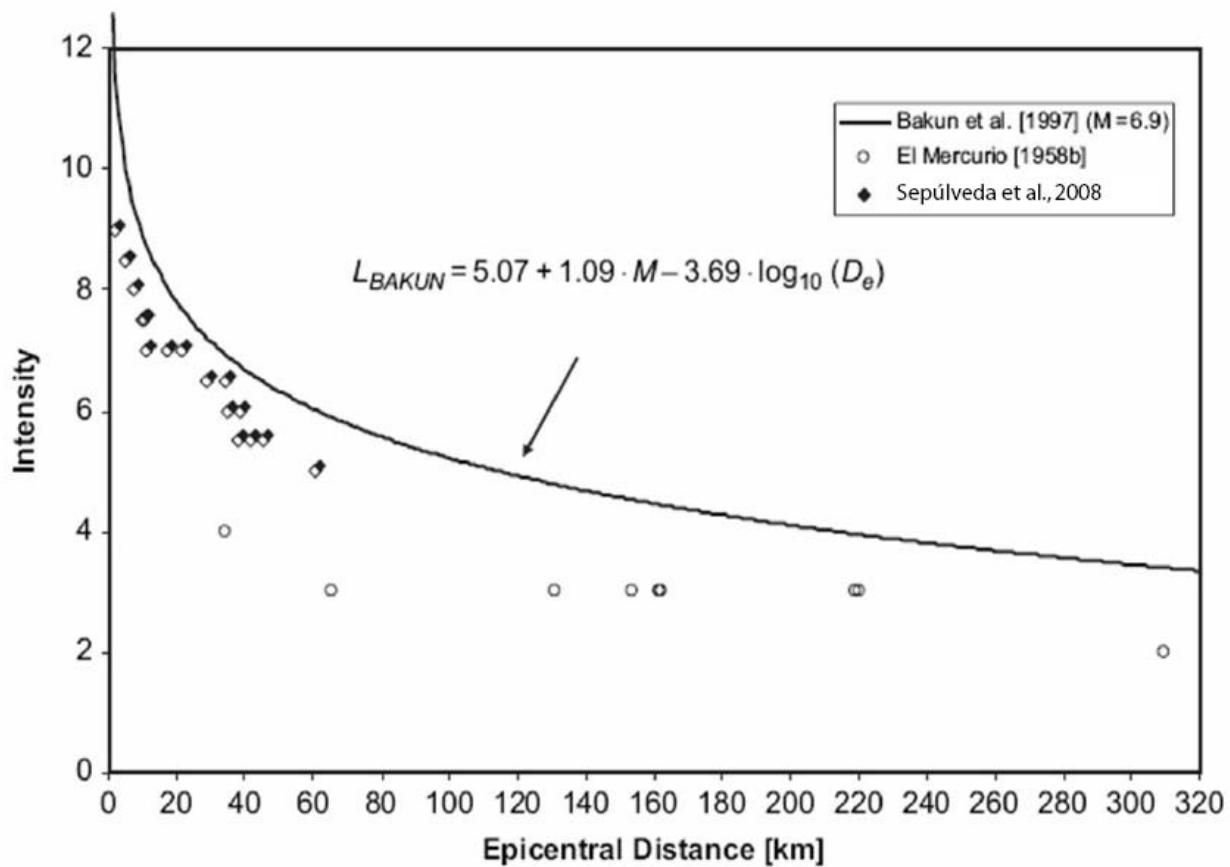
**Figura 5.3:** Extracto del Mapa de sismicidad Global (GSHAP, 1999) para la región de estudio. Se observa que el grado de peligro sísmico disminuye hacia el este, lo que coincide con un alejamiento desde la zona de contacto entre la placa de nazca y la placa Sudamericana. Se muestra además la escala que asocia los valores de aceleración (PGA) con peligro sísmico a nivel mundial.



**Figura 5.4:** Esquema modificado de la zonificación sísmica según la norma sismorresistente chilena (Nch 433 OF. 96). Se observa que el área de estudio de este trabajo (Cordillera de la Costa, región de Valparaíso), se encuentra dentro de la zona 3 (zona de mayor peligro sísmico) con valores de aceleración efectiva ( $A_0$ ) igual o mayor a 0,4g.



**Figura 5.5:** Mapa determinístico preliminar de peligro sísmico en base a las aceleraciones horizontales máximas (PGA) estimadas para las fallas potencialmente activas definidas en este trabajo. Los círculos muestran la sismicidad registrada por el Servicio Sismológico Nacional desde el año 2000. El tamaño de los círculos hace referencia a las magnitudes, siendo 6,4 la mayor.



**Figura 5.6:** Ley de atenuación de intensidades en suelo para el sismo cortical de Las Melosas de 1958 (M= 6.9) (Sepúlveda et al., 2008).

## 6 DISCUSIONES

Para la caracterización de las estructuras identificadas en la zona de estudio se definieron 5 sets estructurales. Sin embargo, los resultados obtenidos tanto en el análisis geológico, como sísmico, indican que las estructuras pertenecientes a los sistemas NNE y NNW tienen características similares a los sistemas NE y NW respectivamente. Por esta razón, aunque la clasificación en 5 sistemas resultó muy útil para la caracterización, las estructuras, que por su expresión morfológica y datos de terreno, se consideran como fallas potencialmente activas, pueden ser agrupadas en solamente tres sistemas estructurales de orientaciones E-W, NW y NE.

Se reconocieron seis estructuras con orientación cercana a la dirección E-W que se distinguen principalmente por ser de corta extensión. Se observaron mecanismos normales y de rumbo sinistral para estas estructuras. Los parámetros sísmicos calculados en estas fallas corresponden a los menores valores obtenidos para la región, aunque, en la mayoría de los casos, los PGA horizontales máximos calculados sobrepasan el valor de aceleración regional (40%g).

Las direcciones NW y NE predominan coincidiendo con la morfología del sector estudiado. En el dominio occidental de la Cordillera de la Costa, destaca el sistema de estructuras potencialmente activas con orientación NW, mientras que hacia el este las estructuras que más coinciden con rasgos morfológicos corresponden al sistema NE.

Al sistema NW pertenecen las estructuras de mayor extensión y ocurrencia en la zona de estudio. Estas estructuras fueron observadas coincidiendo en gran medida con la morfología, principalmente en el dominio occidental de la Cordillera de la Costa y son, en su mayoría, fallas de mecanismo normal, aunque se reconocieron también algunas fallas de rumbo tanto dextral como sinistral y en muchos casos el mecanismo es desconocido. Hacia el sector nororiental del área de estudio el rumbo de estas estructuras varía acercándose a la dirección N-S, reconociéndose estructuras con rumbos de hasta 350°. A este sistema pertenecen las fallas que generan las mayores magnitudes (7,1 para la Falla Melipilla), mayores aceleraciones horizontales (56%g para la falla Cordón Los Amarillos) y, por lo tanto, el mayor grado de peligro.

El sistema NE, al igual que el sistema NW, es de amplia ocurrencia en la zona de estudio. Muchas de estas estructuras corresponden a lineamientos aportados en este trabajo, que se observaron coincidiendo fuertemente con rasgos morfológicos del sector. Se distribuyen en toda la región, pero destacan en el sector oriental de la Cordillera de la Costa en la zona de estudio. Hacia el oeste varían su rumbo acercándose a la dirección N-S, reconociéndose estructuras con rumbos de hasta 20°. Estas estructuras son en general, de menor extensión que las del sistema NW, por lo que no generan el mismo grado de peligro. Para las estructuras de este sistema se calcularon magnitudes máximas de 6,9 (Falla Puangue) y PGA horizontales máximos de hasta 49%g (Lo Ovalle).

Con respecto al mapa preliminar de peligro sísmico asociado a fallas potencialmente activas obtenido en este estudio mediante la metodología determinística, se observa que existen en la zona dos grados de peligro: uno medio (zonas amarillas) y otro alto (zonas rojas) (Figura 5.5).

Este resultado es consistente con la metodología, ya que se asume que todas las estructuras son fallas activas sin considerar su real potencial, para lo cual se requieren estudios más detallados de cada una de ellas. Además, se consideró el largo en superficie como largo de ruptura, es decir, que la falla se rompe completamente, lo que nos pone en el peor escenario posible obteniendo valores de aceleración horizontal (PGA) máximos esperables para cada estructura.

Las zonas rojas en el mapa, corresponden a las áreas donde se excedería la aceleración regional (40%g) con un PGA horizontal máximo en roca para la región de 56,4%g, dado por la estructura Cordón Los Amarillos (N°2 en Capítulo 4.3), cuya orientación es N20°W. Esta estructura corresponde principalmente a un lineamiento observado en fotografías aéreas e imágenes satelitales coincidiendo con la morfología y que fue considerado como la continuación hacia el sur de una falla de mecanismo sinistral que se encuentra en la cartografía en que se basó este trabajo (Gana et al., 1996). Este valor de aceleración máximo no difiere mucho del valor inmediatamente inferior (56,1%g) que corresponde al tramo 2 de la falla Valparaíso (N°2.2 en Capítulo 4.2). Esta estructura se encuentra cartografiada como falla de mecanismo dextral y fue observada en fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Lo relevante de este resultado es que, por las características de las fallas presentes en el sector, se justifica, y es incluso necesario, hacer estudios más detallados para tratar de determinar la real actividad de algunas de ellas, ya que las aceleraciones horizontales máximas (PGA) en muchos casos sobrepasan el valor regional (0,4g). Es decir, que la presencia de estas fallas no es indiferente para el peligro sísmico de la zona, sobretodo a nivel local, en las zonas más cercanas a las trazas, que como se ha dicho anteriormente, corresponden a zonas pobladas y de gran interés económico para el país. Por esta razón, las zonas donde la aceleración resultó igual o mayor al 40%g, se consideran, de manera preliminar, de alto peligro sísmico determinístico asociado a fallas geológicas potencialmente activas.

Sin embargo, la probabilidad de que estas fallas estén activas y su potencial de peligrosidad es la cuestión más importante. De este trabajo se puede inferir de manera preliminar, cuáles son las fallas con mayor potencial de actividad y peligrosidad y, por lo tanto, cuáles se recomienda estudiar con más detalle. Sobre la base, tanto de los antecedentes geológicos, como de las características sísmicas obtenidas en este estudio, se considera que las fallas con mayor potencial sísmogénico son las siguientes (Tabla 4):

## **1 Zona de Falla Marga-Marga**

Según datos bibliográficos, se sabe que los daños de algunos terremotos ocurridos en la zona, se han concentrado en esta zona de falla y que es muy probable que estas fallas se encuentren reactivadas (Thorson, 1999). Durante este estudio se observaron importantes morfologías y estructuras menores con rumbo NW, afectando a una superficie de erosión actual, asociadas principalmente a la traza más larga de esta zona de falla (1.4 en Capítulo 4.2). Se calculó que un sismo en esta falla podría alcanzar una magnitud de 6,8 y aceleraciones horizontales en roca de hasta 49,5%g. El valor de aceleración regional (40%g) se sobrepasaría en los 7,15 km circundantes a la traza, afectando a la ciudades de Quilpue, Villa Alemana y a la localidad El Pangué, entre otras.

## **2 Falla Valparaíso**

El tramo 2 de la falla Valparaíso (N°2.2 en Capítulo 4.2) se encuentra cartografiado como falla de mecanismo dextral y fue observado en fotografías aéreas e imágenes satelitales. De orientación NW y 27 km de largo, un sismo originado a lo largo de esta falla tendría una magnitud máxima cercana a 6,8 y produciría un PGA horizontal máximo de 56,1%g, alcanzando el valor regional a una distancia de 8 km desde la falla, afectando a las ciudades de Viña del Mar, Valparaíso y Casablanca.

## **3 Laguna Verde**

La falla Laguna Verde (N°3 en Capítulo 4.2) es una falla de mecanismo normal, orientación NW y 23,4 km de largo. Esta estructura se encuentra afectando a rocas de edad post-miocena por lo que, según la definición utilizada en este trabajo, correspondería a una falla potencialmente activa. El mayor sismo que se generaría en esta falla sería de magnitud 6,7 y la roca cercana sufriría aceleraciones de hasta 44,1%g. El valor de aceleración regional se alcanzaría a los 5 km, por lo que sectores como Laguna Verde, Placilla y el lago Peñuelas, son zonas de peligro alto.

## **4 Valparaíso-Curacaví**

En este trabajo la falla Valparaíso-Curacaví de orientación NW, se dividió en dos tramos (N°4.1 y N°4.2 en Capítulo 4.2). Considerando la larga extensión de las trazas y debido a que en profundidad esta estructura podría ser continua, los valores de magnitudes y aceleraciones horizontales máximas calculados en este trabajo, podrían eventualmente ser superados. Debido a este gran potencial de peligrosidad y a que fue observada coincidiendo fuertemente con la morfología del sector, se incluye en este listado como una estructura que debe ser estudiada con más detalle. La magnitud máxima calculada para el tramo más largo (N°4.2) resultó de 6,8 y se alcanzarían aceleraciones horizontales de hasta 49,6%g que, por su cercanía a la traza de esta falla, se producirían en Casablanca.

## **5 Embalse Purísima**

El tramo N°6.2 de esta falla (en Capítulo 4.2) corresponde a una de las estructuras que se puede considerar con mayor potencial de actividad. Se observó en terreno un escarpe de falla reciente en roca intrusiva foliada y suelo deprimido, además de estrías subhorizontales que indican movimientos de rumbo NW. La magnitud calculada para un sismo generado en esta falla es de 6,7 y se obtuvo un PGA horizontal máximo de 55,5%g. El valor de aceleración regional se alcanzaría a los 7,6 km, en las cercanías de Algarrobo.

## **6 Pino Mar**

La falla Pino Mar (N°8 en Capítulo 4.2) es una falla de mecanismo normal, orientación NW y de casi 43 km de largo. Esta estructura coincide con una profunda quebrada observada en el sector noroeste y se encuentra afectando a rocas de edad post-miocena hacia el sureste, por lo que correspondería a una falla potencialmente activa. El mayor sismo que se generaría en esta falla es



de magnitud 7 y la roca cercana sufriría aceleraciones horizontales de hasta 50,6%g en Algarrobo y El Quisco. El valor de aceleración regional se alcanzaría a los 8,3 km, por lo que otros sectores como Isla Negra, Las Cruces y hasta Cartagena, son también zonas de peligro alto.

## **7 Falla Melipilla**

Esta estructura no ha sido observada en superficie (N°10 en Capítulo 4.2), sin embargo algunos estudios proponen su existencia e indican que habría tenido movimientos de tipo normal posteriores al Mioceno-Plioceno (Yáñez et al., 1998). La magnitud para un sismo generado en esta falla resultó ser la máxima magnitud calculada para la zona, con un valor de 7,1 aunque las aceleraciones horizontales no superan el 50%g. Según estos valores, y en base a la estimación de intensidad discutida en el Capítulo 5, de producirse un sismo en esta falla, la ciudad de Melipilla podría sufrir intensidades cercanas a los 9 grados en la escala MSK.

## **8 Río Maipo**

Falla de orientación NNW (N°1 en Capítulo 4.3), que controla el cauce del río Maipo cerca de su desembocadura. En terreno se observó un escarpe marcado por un dique en el que se reconocieron estructuras de cizalle con orientación coincidente a la falla Río Maipo. La magnitud calculada para esta falla es de 6,2 y la aceleración horizontal máxima es de 44,6%g. La aceleración regional se alcanzaría a los 4,5 km de la falla, en San Antonio y Santo Domingo.

## **9 Cordón Los Amarillos**

Este lineamiento de orientación NNW (N°2 en Capítulo 4.3), fue considerado como la continuación hacia el sur de una falla de mecanismo sinistral que se encuentra en la cartografía en que se basó este trabajo. En esta estructura se pueden generar las máximas aceleraciones horizontales de la región de estudio (56,4%g), alcanzando valores de aceleración horizontal de hasta 50%g en Casablanca, de producirse el mayor sismo posible en ella afectando también a las ciudades de Quilpue y Villa Alemana. Este sismo podría alcanzar una magnitud de hasta 6,9.

## **10 Esteros de Cartagena**

La falla Esteros de Cartagena (N°7 en Capítulo 4.4) de orientación NNE, ha sido observada afectando a rocas de edad post-miocena por lo que, según la definición utilizada en este trabajo, correspondería a una falla potencialmente activa, aunque su mecanismo no ha sido determinado. El mayor sismo que se generaría en esta falla sería de magnitud 6,3 y la roca cercana sufriría aceleraciones horizontales de hasta 48,4%g. El valor de aceleración regional se alcanzaría a los 5,4 km, por lo que se considera a las cercanías de San Antonio, como zonas de peligrosidad alta.

## **11 Falla Puangue**

Esta falla normal de orientación NNE y 36 km de largo (N°8 en Capítulo 4.4), es de importancia regional en el área de estudio. Fue observada en fotografías aéreas e imágenes satelitales, como

un lineamiento que coincide fuertemente con rasgos morfológicos de la zona. La magnitud asociada a su máximo terremoto posible es de 6,9 y la aceleración horizontal máxima es de 47,3%g, alcanzando el valor regional a los 6,9 km de la falla.

## **12 Zona de Falla Estero Puangue**

De las estructuras pertenecientes a la Zona de Falla Estero Puangue de orientación NE (N°s 9 en Capítulo 4.5), el tramo más largo de la falla Quebrada Grande (N°9.4) resultó ser una estructura con importante potencial sismogénico, ya que ha sido observada cortando a depósitos holocenos aluviales (Qa) en el sector de Quebrada Grande (Gana et al., 1996) y en imágenes satelitales de esta zona se observaron además, algunos deslizamientos que podrían estar asociados a esta falla. La magnitud máxima estimada para un sismo generado en esta falla es de 6,3 y la aceleración horizontal máxima resultó mayor al valor regional (43,2%g).

## **13 Cuesta Ibacache**

El tramo 2 de esta falla de orientación NE (14.2 en Capítulo 4.5), coincide con una profunda quebrada que cruza una zona con morfología de cerros bajos y alomados en el sector cercano a la cuesta Ibacache. Para esta falla, de mecanismo no determinado, se obtuvo una magnitud máxima de 6,3 y aceleraciones horizontales máximas de 48,6%g.

## **14 San Antonio**

La falla San Antonio (N°15 en Capítulo 4.5), de orientación NE, ha sido observada afectando a rocas de edad post-miocenas correspondiendo a una falla potencialmente activa, aunque su mecanismo no ha sido determinado. El mayor sismo que se podría generar en esta falla es de magnitud 6,8 y aceleraciones horizontales de hasta 49,2%g que se podrían producir en Cartagena y San Antonio. El valor de aceleración regional se alcanzaría a los 6,9 km, por lo que se considera de peligro alto hasta Santo Domingo hacia el sur.

## **15 Quebrada Quihuilca**

La traza de esta falla de orientación NE (N°16 en Capítulo 4.5), pasa bajo la ciudad de Curacaví. De aquí, la importancia de estudiarla en detalle para conocer su real potencial de actividad. En este trabajo se observaron morfologías asociadas a esta falla y se estimó, para un sismo máximo posible, una magnitud de 6,5. Las aceleraciones horizontales máximas que se alcanzarían en la ciudad de Curacaví son de 49,1%g y, considerando la intensidad alcanzada en la zona epicentral durante el terremoto de Chumiza del 2001 (Mw=6,3), se estiman intensidades cercanas a los 7 grados en la escala MSK para Curacaví.

De las cerca de 20 estructuras con orientación NE descritas en el Capítulo 4.5, 8 corresponden a lineamientos no cartografiados. En general, para este set de lineamientos, aportados en este trabajo, se obtuvieron magnitudes de entre 6 y 6,5. Las aceleraciones horizontales máximas resultaron entre 40 y 50%g para estas estructuras, es decir, que en general alcanzan valores de

aceleración mayores al valor regional. Por esta razón se recomienda estudiar estos lineamientos para determinar si efectivamente corresponden a fallas potencialmente activas.

Utilizando los valores de intensidad en función de la distancia epicentral obtenidos para el terremoto de Las Melosas de 1958 (Sepúlveda et al., 2008), se pueden estimar las intensidades esperadas en las zonas de peligro alto para las 15 fallas mencionadas. Se observa que las intensidades varían entre 7 y 9 para estas localidades, que se encuentran a menos de 15 km de alguna de estas fallas (Figura 5.6). El sismo de Las Melosas tuvo magnitudes de entre 6,7 y 6,9, por lo que para los casos de las fallas Río Maipo, Esteros de Cartagena, Quebrada Grande, Cuesta Ibacache y Quebrada Quihuilca, cuyas magnitudes máximas calculadas no superan los 6,5, las intensidades obtenidas corresponden a valores sobredimensionados (Tabla 4).

**Tabla 4:** Datos sísmicos para las 15 fallas consideradas de mayor potencial sismogénico. (N: falla normal; R: falla de rumbo; RD: falla de rumbo dextral; RS: falla de rumbo sinistral; ND: mecanismo no determinado; **Mw**: magnitud, **LRS**: largo de ruptura en superficie; **H**: hipocentros corregidos, **DM**: desplazamiento máximo, (**DP**): desplazamiento promedio).

Nombre	Tipo	Rumbo	Mw	LRS (Km)	PGA (%g)	D (Km) 40%g	Localidades con peligro alto (PGA>40%g)	Intensidad (MSK)
Marga-Marga	ND	315	6,8	31,4	49	7,2	Quilpué Villa Alemana El Pangue	8 8 9
Valparaíso	RD	320	6,8	27,0	56	8,1	Viña del Mar Valparaíso Placilla Casablanca	8 8 9 9
Laguna verde	N	310	6,7	23,4	44	5,2	Laguna Verde Placilla Lago Peñuelas	9 9 9
Valparaíso-Curacaví	ND	300	6,8	30,5	50	7,1	Casablanca	9
Embalse Purísima	R	305	6,7	22,6	56	7,6	Algarrobo	8
Pino Mar	N	305	7,0	42,7	51	8,3	Algarrobo El Quisco Isla Negra Las Cruces Cartagena	9 9 9 9 8
Melipilla	N	305	7,1	48,3	50	8,5	Melipilla	9
Río Maipo	N	335	6,2	10,9	45	4,5	San Antonio Santo Domingo	9 9
Cordón Los Amarillos	RS	340	6,9	32,8	56	8,6	Quilpue Villa Alemana Casablanca	8 8 9
Esteros de Cartagena	ND	45	6,3	11,2	48	5,4	San Antonio	8
Falla Puangue	N	40	6,9	36,0	47	6,9	Cercanías de Melipilla	7
Quebrada Grande	ND	60	6,3	10,8	43	4,2	Colliguay	9
Cuesta Ibacache	ND	60	6,3	11,4	49	5,4	Cuesta Ibacache	9
San Antonio	ND	70	6,8	28,6	49	6,9	Cartagena San Antonio Santo Domingo	9 9 8
Quebrada Quihuilca	ND	50	6,5	18,5	49	6,2	Curacaví	9

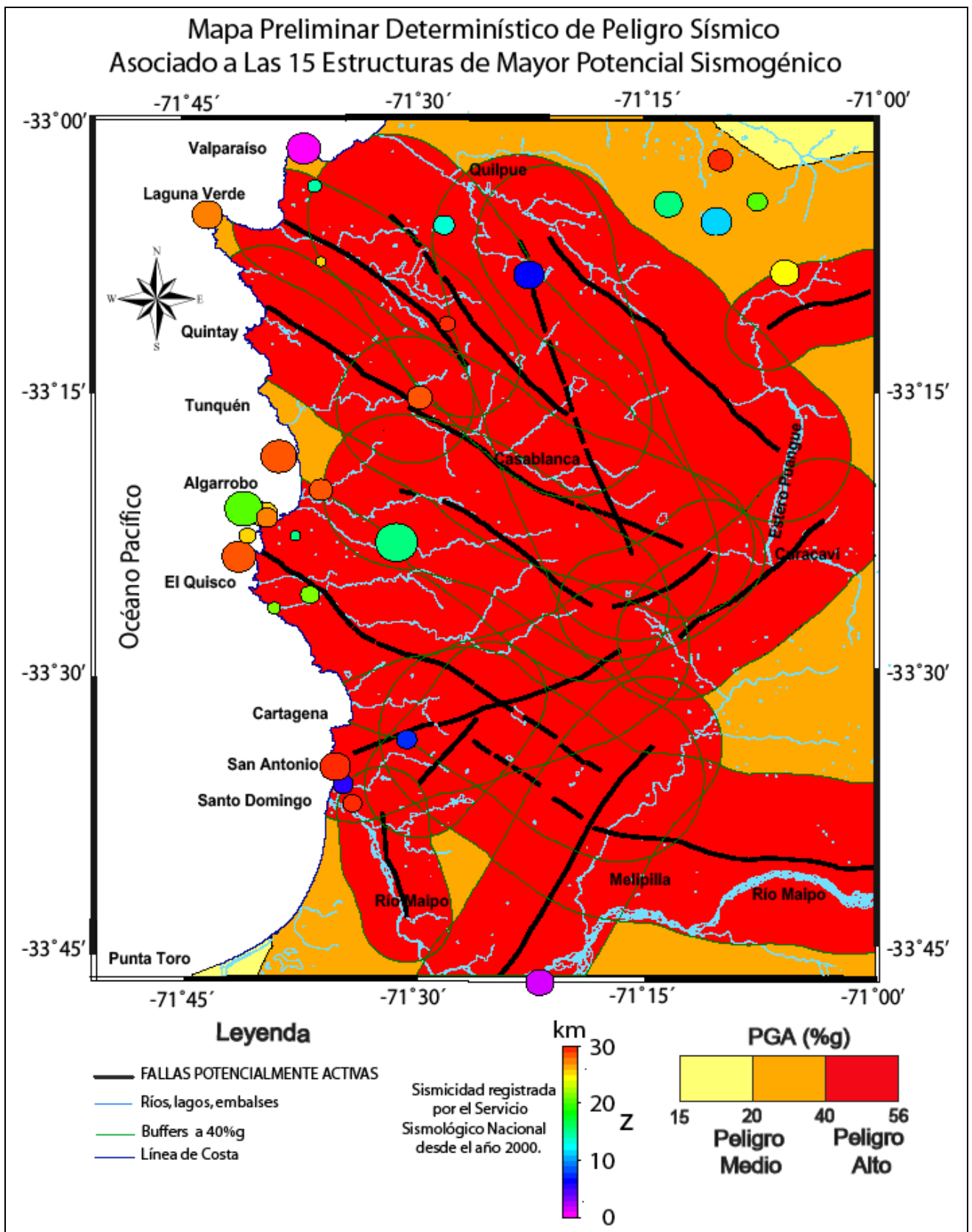
Es importante recalcar que lo anteriormente expuesto se basa en los valores calculados de manera preliminar y conservadora en este estudio, con todos los errores, aproximaciones y estimaciones que estos cálculos implican. Además, las observaciones geológicas realizadas corresponden a una primera revisión de las estructuras existentes en la zona, por lo que no existen mapeos de detalle de estas fallas que indiquen actividad ni se tienen datos sísmicos que aseguren que podrían ser sismogénicas y, por lo tanto, generar los sismos anteriormente descritos.

Al construir un mapa de peligro considerando solamente las 15 fallas discutidas (Figura 6.1), se observó que no existen mayores cambios con respecto al mapa que considera todas las estructuras estudiadas en este trabajo (Figura 5.5). Esto sugiere que la Figura 5.5 representa bien el peligro determinístico de sismicidad asociado a fallas potencialmente activas estimado preliminarmente para la zona y no corresponde a una exageración producto de la gran cantidad de estructuras consideradas como fallas potencialmente activas.

De las 15 estructuras consideradas como de mayor potencial sismogénico, 9 son de orientación NW y más de la mitad de ellas son de mecanismo normal, coincidiendo con la idea de que estas fallas, que en general afectan a rocas antiguas, fueron reactivadas como fallas normales después del Mioceno-Plioceno (Gana et al., 1996).

Por otro lado, muchas de las estructuras identificadas como potencialmente activas de orientación NW corresponden a dos o más segmentos de diferente mecanismo. Hacia el oeste predominan las fallas normales, mientras que hacia el este las estructuras muestran características de movimientos de rumbo. Esto indica la ocurrencia de al menos dos eventos de deformación en estas estructuras y considerando la configuración tectónica actual se esperaría que las estructuras con mecanismo de rumbo correspondan a las fallas que han sido reactivadas recientemente.

Finalmente se debe destacar que no es posible relacionar la sismicidad superficial observada (Figura 5.1) con las fallas potencialmente activas definidas en este trabajo debido a la falta de mecanismos focales y a la escasez de estaciones. Un análisis detallado de esta sismicidad podría ser de gran utilidad en estudios futuros.



**Figura 6.1:** Mapa preliminar determinístico de peligro sísmico asociado a 15 estructuras identificadas como las de mayor potencial sismogénico en la zona de estudio.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

Las estructuras identificadas en la zona de estudio, que por su expresión morfológica y datos de terreno se consideran como fallas potencialmente activas, son más de 50 y se pueden clasificar en 3 sistemas estructurales de orientaciones E-W, NW y NE.

Predominan las direcciones NW y NE coincidiendo con la morfología del sector. En el dominio occidental de la Cordillera de la Costa, destaca el sistema de estructuras con orientación NW, mientras que hacia el este, las estructuras que más coinciden con rasgos morfológicos corresponden al sistema NE.

En general, las fallas de mayor peligro para la zona de estudio pertenecen al sistema NW. Muchas de ellas son de mecanismo normal con el bloque sur hundido. Este resultado concuerda con la hipótesis de que estas fallas estarían reactivadas como fallas normales desde el Mioceno y con un aparente desplazamiento del antearco hacia el norte. Sin embargo, los datos de terreno y la configuración actual del margen indican que las estructuras con evidencias de movimientos recientes serían más bien de rumbo.

Las magnitudes preliminares calculadas mediante relaciones empíricas obtenidas en base a datos mundiales de sismos superficiales resultaron en el rango entre 5,8 y 7,1. Estos valores son consistentes con las magnitudes que se han observado para sismos corticales en Chile.

Las aceleraciones horizontales (PGA) preliminares, calculadas utilizando la relación de atenuación para sismos corticales en roca, propuesta por Campbell y Bozorgnia (2003), resultaron en el rango entre 20%g y 56%g. En base a estos valores, el peligro de sismicidad cortical para la zona de la Cordillera de la Costa comprendida entre los 33° y los 33°45'S es principalmente alto, con algunos sectores de peligro medio (Figura 5.5).

## 7.2 Recomendaciones

Sobre la base de los antecedentes geológicos y de las características sísmicas obtenidas en este estudio, se considera que las fallas con mayor potencial sismogénico y por lo tanto, las que se recomienda estudiar con más detalle son principalmente las siguientes:

1. **Zona de Falla Marga-Marga**, en especial la estructura 1.4 descrita en el Capítulo 4.2.
2. **Falla Valparaíso**, en especial la estructura 2.2 descrita en el Capítulo 4.2.
3. **Laguna Verde**, estructura 3 descrita en el Capítulo 4.2.
4. **Valparaíso-Curacaví**, en especial la estructura 4.2 descrita en el Capítulo 4.2.
5. **Embalse purísima**, en especial la estructura 6.2 descrita en el Capítulo 4.2.
6. **Pino Mar**, estructura 8 descrita en el Capítulo 4.2.
7. **Falla Melipilla**, estructura 10 descrita en Capítulo 4.2.
8. **Río Maipo**, estructura 1 descrita en Capítulo 4.3.
9. **Cordón Los Amarillos**, estructura 2 descrita en Capítulo 4.3.
10. **Esteros de Cartagena**, estructura 7 descrita en Capítulo 4.4.
11. **Falla Puangue**, estructura 8 descrita en Capítulo 4.4.
12. **Zona de Falla Estero Puangue**, en particular la estructura 9.4 descrita en el Capítulo 4.5.
13. **Cuesta Ibacache**, en especial la estructura 14.2 descrita en Capítulo 4.5.
14. **San Antonio**, estructura 15 descrita en Capítulo 4.5.
15. **Quebrada Quihuilca**, estructura 16 descrita en Capítulo 4.5.

Por otra parte, se recomienda analizar la sismicidad superficial que muestra el registro del Servicio Sismológico Nacional mediante la relocalización de hipocentros, determinación de mecanismos focales e incluso aumentando la red de estaciones, para obtener datos sísmicos que permitan relacionar, si es posible, esta actividad sísmica con las estructuras potencialmente activas descritas en este trabajo. Un análisis detallado de esta sismicidad, así como un estudio tectónico del sector, serían de gran utilidad y aportarían importantes antecedentes para determinar la potencial actividad de cada una de las fallas identificadas y caracterizadas en este trabajo.

## 8. REFERENCIAS

- Astroza, M. y Sepúlveda, S.A., 2006. Intensity and Ground Shaking Estimates of the September 1958 Las Melosas Earthquake. Proceedings, F. Montessus de Ballore International Conference, Santiago, paper N°GT3-01
- Campbell, K. y Bozorgnia, Y., 2003. Updated Near-Source Ground-Motion (Attenuation) Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 1, pp. 314–331, February 2003.
- Campos, J.; Hatzfeld, D.; Madariaga, R.; López, G.; Kausel, E.; Zoilo, A.; Innacone, G.; Fromm, R.; Barrientes, S.; Lyon-Caen, H. 2002. A seismological study of the 1835 seismic gap in the South Central Chile. *Physical Earth Planetary Interior* 132: 177-195.
- Campos J., Ruiz S., Pérez, A., Ruiz, J., Kausel, E., Thiele, R., Saragoni, R. y Sepúlveda, S.A. 2005. Terremotos corticales de Las Melosas 1958, Chusmiza 2001 y Curicó 2004: Un análisis comparativo de los terremotos de Northridge 1994 y Kobe 1995. Nuevos antecedentes para el peligro sísmico de Chile, Proc. IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Paper A01-28, Concepción, Chile.
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, E., Flynn, J., Iturra, I., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R., Wyss, A., 2005. The Abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion, and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh.* 236, (1-2): 43-77 (MAY 2005).
- Charrier, R., Farías, M., Comte, D., Pardo, M., 2004. Active tectonics in the southern Central Andes, a Recent example: the 28 August 2004 shallow Mw=6.5 earthquake. *Eos. Trans. AGU*, 85 (47), Fall Meeting Suppl. Abstract S43C-1015.
- Farías, M., 2007. Tectónica y erosión en la evolución del relieve de Los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis de Doctorado, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Figueras, S., Macau, A., Goula, X., González, M., 2005. Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia, 21-24 de Junio de 2005.
- Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S. Tesis de Magíster, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Gana, P., Wall, R., Gutiérrez, A., 1996. Geología del área Valparaíso-Curacaví: Regiones de Valparaíso y Metropolitana, Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN, Mapa geológico N°1).
- Gana, P., Zentilli, M., 2000. Historia termal y exhumación de intrusivos de la Cordillera de la Costa de Chile Central. *Actas IX Congreso Geológico Chileno*, Vol. 2, p. 664-668. Puerto Varas.



González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Educación. Madrid. 744 p.

GSHAP, 1999. Global Seismic Hazard Assessment Program.

Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A. y Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. Geological Society of America, Bulletin 94: 341-361.

Kay, S.M., Mpodozis, C., Ramos, V.A., Munizaga, F., 1991. Magma source variations for mid to late Tertiary volcanic rocks erupted over shallowing subduction zone and through a thickening crust in the Main Andean Cordillera (28° S – 33° S). Andean magmatism and its tectonic setting. Harmon, R.S., Rapela, C., (Eds). Geological Society of America, Special Paper 265, p. 113-137.

Laporte, M. 2006. Correlación entre las aceleraciones pico y pico efectiva y valores de PGV/PGA y  $PGA \cdot PGD / PGV^2$  del banco de datos de movimientos fuertes de América Central. IX Seminario Nacional de Geotecnia – IV Encuentro Centroamericano de Geotecnistas. San José, Costa Rica, 14 al 18 de noviembre del 2006.

Lavenu, A., 2006. Neotectónica de los Andes entre 1°N y 47°S (Ecuador, Bolivia y Chile): una revisión. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, out./dez., vol.61, no.4, p.504-524. ISSN 0004-4822.

Lavenu, A., Cembrano, J., 1999. Compressional- and transpressional-stress pattern for Pliocene and Quaternary brittle deformation in fore arc and intra-arc zones (Andes of Central and Southern Chile). *Journal of Structural Geology*, Vol. 21, p. 1669-1691.

Lavenu, A., Thiele, R., Machette, M. N., Dart, R. L., Bradley, L.-A., and Haller, K. M., 2000. Maps and Database of Quaternary Faults in Bolivia and Chile. Open File Report 00-0283, U.S. Geological Survey.

Mualchin, L. 1996. A technical report to accompany the Caltrans California seismic hazard map 1996 (based on maximum credible earthquakes). California Department of Transportation Engineering Service Center, Office of Earthquake Engineering. Sacramento, California.

Mualchin, L. 2004. Seismic Hazard Analysis for Critical Infrastructures in California. California Department of Transportation (Caltrans), Sacramento, California, United States.

Norma NCh 433.Of 96, (1996), Diseño sísmico de edificios, Instituto de Normalización. INN-Chile, 42 p, Santiago.

Pardo, M.; Comte, D.; Monfret, T.; 2001. Seismotectonic and stress distribution in the central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Sciences*; Vol. 15, Issue 1; P. 11-22.

Pilger, R., 1984. Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. *Journal of Geological Society of London*, Vol. 141, p- 793-802.

Rauld, R.A., 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la Quebrada Macul. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 57 p.

Sepúlveda, S., Astroza, M., Kausel, E., Campos, J., Casas, E., Rebolledo, S., y Verdugo, R., 2008 New Findings on the 1958 Las Melosas Earthquake Sequence, Central Chile: Implications for Seismic Hazard Related to Shallow Crustal Earthquakes in Subduction Zones, *Journal of Earthquake Engineering*, 12:3, 432 - 455

Servicio Sismológico Nacional [www.sismologia.cl](http://www.sismologia.cl)

Somoza, R., 1998. Updated Nazca (Farallón) – South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 11, N° 3, p. 211 -215.

Thomas, H., 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de la Ligua y la Cuesta de Barriga. *Boletín N° 2*, Instituto de Investigaciones Geológicas, 86 p.

Thorson, R., 1999. La falla geológica Marga-Marga Viña del Mar. Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Uyeda, S., 1987. Chilean v/s Mariana type subduction zones with remarks on arc volcanism and collision tectonics. *Circum Pacific Orogenic Belts and Evolution of the Pacific Ocean Basin*. Morgan y Francheteau (Ed). *Geodynamics Series*, vol 18. pp 1-7.

Uyeda, S., Kanamori, H., 1979. Back-Arck Opening and the Mode of Subduction. *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, NO B3, pp 1049-1059.

Wall, R., Gana, P., Gutiérrez, A., 1996. Geología del área San Antonio-Melipilla: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y Del Libertador Bernardo O'Higgins, Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN, Mapa Geológico N°2.

Wells, D y Coppersmith, K., 1994: New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement.

Yáñez, G., Gana, P. y Fernández, R., 1998. Origen y significado geológico de la Anomalía Melipilla, Chile central. *Rev. geol. Chile*, dic. 1998, vol.25, no.2, p.175-198. ISSN 0716-0208.