



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**EVOLUCIÓN HISTORIOGRÁFICA DE LA EXPOSICIÓN DE SANTIAGO A LA
AMENAZA SÍSMICA DE LA FALLA SAN RAMÓN Y SU POSIBLE RELACIÓN CON
EL TERREMOTO DEL 13 DE MAYO DE 1647**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA
TAMARA FRANCISCA ARÁNGUIZ MEDEL**

**PROFESOR GUÍA:
GABRIEL VARGAS EASTON**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS
JORGE INZULZA CONTARDO**

**SANTIAGO DE CHILE
2018**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Tamara Francisca Aránguiz Medel
FECHA: 20/03/2018
PROFESOR GUÍA: Gabriel Vargas Easton

EVOLUCIÓN HISTORIOGRÁFICA DE LA EXPOSICIÓN DE SANTIAGO A LA AMENAZA SÍSMICA DE LA FALLA SAN RAMÓN (FSR) Y SU POSIBLE RELACIÓN CON EL TERREMOTO DEL 13 DE MAYO DE 1647

Santiago, ciudad capital de Chile, alberga al 40,5% de la población nacional (INE, 2017). Esta concentración ha sido el resultado de su constante crecimiento y expansión areal hacia la periferia. Con el desarrollo urbano la capital ha aumentado su exposición a las amenazas naturales, de las cuales se cuenta cada vez con mayor información gracias al conocimiento científico. La Falla San Ramón (FSR) aparece como una de las potenciales amenazas de Santiago, sobre todo para las comunas precordilleranas. Esta estructura de comportamiento inverso cuenta con evidencias que comprueban su carácter activo, el cual representa dos tipos de peligros: ruptura en superficie y sacudida del movimiento sísmico. A pesar que se ha demostrado la peligrosidad de la FSR, aún no existen medidas para manejar los posibles efectos que un potencial sismo en esta estructura geológica podría tener sobre la megaciudad de Santiago.

En este trabajo se busca evidenciar la relación entre la amenaza natural de la FSR y la expansión historiográfica de Santiago. Se analizan además las características y efectos del terremoto del 13 de mayo de 1647, uno de los más destructivos en la historia de la ciudad y cuya fuente aún no está clara, evaluando su posible relación con la FSR.

Mediante la georreferenciación de mapas históricos y mapeo de imágenes satelitales se determinan los límites urbanos de Santiago para los años 1552, 1600, 1841, 1895, 1960, 1985, 1994 y 2017. A partir de perfiles topográficos del frente cordillerano se identifican escarpes morfotectónicos. Ambos resultados se unen para determinar que los límites de Santiago han avanzado entre 1960 y 2017 a una tasa promedio de 100,51 ha/año hacia el este de la FSR, cuya traza se ubica en los escarpes. Considerando uno de los múltiples escenarios de ruptura, el área expuesta al riesgo específico de la FSR corresponde a 337.000 has, que constituye el 42 % del área total urbanizada del Gran Santiago.

Por medio del análisis de reportes históricos se discute la génesis del terremoto de 1647. El estudio comparativo indica que este terremoto, que afectó al Santiago colonial, correspondería ya sea a un sismo intraplaca de profundidad intermedia o a uno intraplaca superficial (FSR). Se propone al terremoto del 13 de mayo de 1647 como un evento intraplaca de profundidad intermedia de Ms ~7 con epicentro en Santiago a 70 km de profundidad. Sin embargo, no se cuenta con suficientes argumentos para descartar la fuente cortical asociada a la FSR.

Se evidencia, a partir de los resultados de este trabajo, que las normas y planes territoriales requieren modificaciones que sean capaces de incluir en ellas la amenaza representada en este estudio. Esto, con el fin de contrarrestar el crecimiento irresponsable, preponderantemente regido por el mercado, que ha llevado a Santiago a ser una ciudad poco o nada sustentable, y en riesgo.

*Perdonadme si pierdo la razón
En el jardín de la naturaleza
Pero debo gritar hasta morir
¡¡Viva la Cordillera de los Andes!!
¡¡¡Muera la Cordillera de la Costa!!!*

Nicanor Parra.

A mi pequeña y amada
familia.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mi profesor guía el Dr. Gabriel Vargas, por darme la oportunidad de realizar un trabajo de mi interés absoluto, por sus acotaciones y su labor, por su cercanía y su rol como geólogo, el cual admiro. Además quiero agradecer a mis profesores miembros de la comisión Sofía y Jorge por sus sugerencias desde sus distintas miradas y conocimiento, y por confiar en mi trabajo.

Debo mencionar también a quienes estuvieron ahí para apoyarme como compañeras y compañeros geólogos: al Pepe por ayudarme a darle vueltas a los resultados y siempre intentar darme una respuesta; a la Luna por acompañarme a trabajar y tener paciencia a mis distracciones, a los chiquillos de la oficina por su buena onda y enseñanzas, particularmente a la Katy que me ayudó desde el minuto 1 en que me conoció; a la Pau Loncón por su talento de edición; y a todos los que permitieron que mis días fueran más felices. Obviamente debo mencionar a la Blanquis que siempre supo contestar mis dudas (incluso repetidas) y a Don Carlos que me alegraba cada vez que nos topábamos en el hall, a todos los funcionarios que permiten que el departamento funcione.

¡A profesoras y profesores! Sobre todo a los buenos, los que se preocuparon de entregar no solo conocimientos, gracias por ser inspiradores y enseñarme de esta hermosa carrera que muy bien elegí. Me voy sabiendo mucho más de lo que sabía, pero con la misma sed de conocimiento.

A mis amigas y amigos de la vida: mis carmelianas que me celebran todo y están a la hora que las necesite ¡las amo!; a mi querida amiga Valita porque sin ti el plan común no habría sido así de colorido; y a mis improvisadores con los que crecí y aprendí de la técnica y arte que me permitió ser una estudiante y actriz muy plena a lo largo de estos últimos años.

A mi gatita Julieta, mi fiel compañera en cada noche de desvelo y trabajo.

A mi familia querida, a mi papá, por su cariño inmenso y su comprensión muchas veces desde la incompreensión; a mi mamá, que con su amor incondicional y su aliento me impulso desde siempre a darme cuenta de que era capaz de cualquier cosa; a mi tía Pau por siempre estar ahí queriéndome y enseñándome cuando fuera necesario; y a mi hermosa Yeyita la más amada del mundo, por su ayuda, su paciencia, su infinito amor de abuelita y disposición, ¡te amo mochita!

Por último, no puedo dejar de agradecer a la vida por todos los buenos y no tan buenos momentos que he vivido, finalmente fueron esas dificultades las que me desafiaron a lograr con mayor ahínco cada meta que me he propuesto.

¡Gracias a todos por su apoyo estoy feliz de que sean parte de mi vida!

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 FORMULACIÓN DEL TRABAJO	1
1.2 MOTIVACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 ÁREA DE ESTUDIO	4
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 RIESGO	5
2.2 PELIGRO.....	6
2.3 VULNERABILIDAD.....	7
2.4 HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL	9
Capítulo 3 ANTECEDENTES GEOLÓGICOS.....	14
3.1 GEOLOGÍA DE LA CIUDAD DE SANTIAGO.....	14
3.2 PELIGROS GEOLÓGICOS DE LA CIUDAD DE SANTIAGO.....	28
Capítulo 4 MARCO METODOLÓGICO	34
4.1 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	34
4.2 EVOLUCIÓN HISTORIOGRÁFICA DE LA OCUPACIÓN URBANA.....	35
4.3 GEOMORFOLOGÍA DEL PIEDEMONTTE	37
4.4 TERREMOTO DEL 13 DE MAYO DE 1647	38
Capítulo 5 LÍMITES URBANOS	39
5.1 SANTIAGO COLONIAL (1500-1800).....	39
5.2 SANTIAGO DE LA REPÚBLICA (1800-1900).....	44
5.3 SANTIAGO EN EL SIGLO XX (1900-1999).....	49
5.4 SANTIAGO DEL SIGLO XXI (2000-Presente).....	58
5.5 ANÁLISIS DE LA EXPANSIÓN DE SANTIAGO	64
Capítulo 6 GEOMORFOLOGÍA URBANA SOBRE LA TRAZA DE LA FSR	66
6.1 GEOMORFOLOGÍA.....	66
6.2 GEOMORFOLOGÍA, URBANIZACIÓN, PELIGRO Y RIESGO.....	72
Capítulo 7 TERREMOTO DEL 13 DE MAYO 1647.....	80
7.1 EFECTOS DEL TERREMOTO DEL 13 MAYO DE 1647.....	81
7.2 ANÁLISIS DE LA FUENTE SÍSMICA DEL TERREMOTO DEL 13 DE MAYO 1647	90
Capítulo 8 DISCUSIÓN	96
8.1 LÍMITES URBANOS.....	96

8.2 GEOMORFOLOGÍA URBANA.....	100
8.3 TERREMOTO DEL 13 DE MAYO DE 1647	102
Capítulo 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
BIBLIOGRAFÍA	108
Capítulo 10 ANEXOS	115
ANEXO I: Base de datos escarpes identificados y seleccionados.....	115
ANEXO II: perfiles topográficos.....	121

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Área de estudio, a la izquierda área en rojo en escala regional, a la derecha a escala local. Imagen satelital corresponde a un mapa base del software ArcGIS 10.....	4
Figura 2.1: Factores que componen la vulnerabilidad. Tomado de Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD), 2004.	7
Figura 3.1: Placas tectónicas margen chileno. Tomado de “Terremotos y Sismicidad en Chile”, Centro Sismológico Nacional (CSN), Universidad de Chile, 2014.	15
Figura 3.2: Zona de subducción y zonas sismogénicas. Tomado de “Terremotos y Sismicidad en Chile”, Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, 2014.	16
Figura 3.3: Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35° S. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yáñez (2003). Tomado de Fock (2005).....	18
Figura 3.4: Extracto de Mapa Geológico Área TilTil-Santiago, Región Metropolitana. Modificado de Wall et al. (1999).	24
Figura 3.5: Sección estructural interpretada para la Cordillera Principal Occidental, con rampa plana con manteo al este para la Falla San Ramón. Tomado de (Armijo et al., 2010).	26
Figura 3.6: A: Extensión del West Andean thrust a escala continental en lado occidental de los Andes. B: Vista tridimensional de Santiago con Falla San Ramón. Tomado de Vargas et al. (2014).	26
Figura 3.7: Sección estructural a la latitud del Maipo con sismicidad superficial. Modificado de Farías et al. (2010).....	27
Figura 3.8: Sismos ocurridos en los últimos 20 años entre los 32.7° y 34.4° de latitud. Datos extraídos del Search Earthquake Catalog de la USGS sobre imagen satelital de Google Earth. Las elipses representan clúster de sismicidad cortical. Clúster Santa Rosa, Clúster Tupungatito, Clúster Andina-Los Bronces, y Clúster El Teniente.	29
Figura 3.9: Valores de aceleración horizontal máxima esperados producto del terremoto máximo creíble Mw 7.4 en la Falla San Ramón. Tomado de "Estudio de riesgo y modificación PRMS Falla San Ramón", (Seremi MINVU, 2012).	31
Figura 5.1: Mapa Histórico de Santiago en 1552. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Tomas Thayer Ojeda "Santiago en el siglo XVI".	41
Figura 5.2: Mapa Histórico de Santiago en 1600. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Tomas Thayer Ojeda.	42
Figura 5.3: Límites urbanos históricos de Santiago Colonial, años 1552 y 1600. Elaborado en ArcGIS 10.....	43

Figura 5.4: Mapa Histórico de Santiago 1841. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Herbace, Arquitecto. Boloña, Cartógrafo.	46
Figura 5.5: Mapa Histórico de Santiago 1895. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Nicanor de Boloña.....	47
Figura 5.6: Evolución del crecimiento urbano para los años 1552, 1600, 1841 y 1895. Elaborado en ArcGIS 10.....	48
Figura 5.7: Plano del Gran Santiago 1960. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Geochile....	54
Figura 5.8: Imagen Satelital de Santiago 1985. Fuente: Google Earth.	55
Figura 5.9: Imagen Satelital de Santiago 1994. Fuente: Google Earth.	56
Figura 5.10: Evolución del crecimiento urbano para los años 1552, 1600, 1841, 1895, 1960, 1985 y 1994. Elaborado en ArcGIS 10.	57
Figura 5.11: Plano de zonas de urbanización condicionada (ZUC) incorporadas por el PRMS. Fuente: Asociación de Arquitectos Tasadores de Chile A.G.	59
Figura 5.12: Imagen Satelital de Santiago 2017. Fuente: Google Earth.	61
Figura 5.13: Mapa de evolución histórica del crecimiento de Santiago. Elaborado en Arcgis 10.	62
Figura 5.14: Mapa de evolución histórica de límites urbanos del frente cordillerano de Santiago. Elaborado en ArcGIS 10.....	63
Figura 6.1: Mapa de pendientes en grados decimales para frente cordillerano de Santiago. Elaborado en ArcGIS 10.....	67
Figura 6.2: Proyección de los escarpes morfológicos del piedemonte entre los ríos Mapocho y Maipo. Arriba: Perfil transversal del frente con exageración vertical, con base y techo de los escarpes indicando con color su clasificación por tamaño. Abajo: Proyección de los escarpes de base y techo en planta. Escala 1:70.000.	69
Figura 6.3: En color zona escarpada del sector de Alto Macul. Fuente: Google Earth.....	71
Figura 6.4: Evolución de los límites urbanos del frente cordillerano sobre los abanicos aluviales y escarpes morfológicos.	73
Figura 6.5: Mapa de peligro sísmico y evolución de los límites urbanos de Santiago. Elaboración propia (2018) con base en “Estudio de Riesgo y Modificación del PRMS Falla San Ramón” (SEREMI & MINVU, 2012).	76
Figura 6.6: Escala de intensidad de colores de Worden et al. (2010).....	77
Figura 6.7: Mapa de Riesgo FSR. Elaboración propia (2018).	78
Figura 7.1: Escala de intensidad de colores de Worden et al. (2010).....	91
Figura 7.2: Atenuación de la intensidad con la distancia hipocentral para 3 eventos chilenos. Tomado de “Comparación de los daños producidos por terremotos chilenos con diferentes fuentes sísmogénicas” de Astroza & Astroza (2008).....	92
Figura 7.3: Tabla ESI-2007, Fuente: Michetti et al., (2007).	93
Figura 8.1: Ubicación de condominio Las Pircas y viviendas sociales “Casas Chubi” sobre abanico aluvial de Quebrada de Macul en comuna de Peñalolen. Fuente: Google Earth.	98
Figura 8.2: Mapa de intensidades para el terremoto del 13 de mayo de 1647 con fuente intraplaca de profundidad intermedia referencial.....	104
Figura 10.1: Proyección de perfiles topográficos sobre frente cordillerano de Santiago.....	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Síntesis del aumento de población para el Gran Santiago (1907-1960). Fuente: Historia de Santiago, Leon Echaiz (1975).....	50
Tabla 2: Población y mancha urbana 1970-2002. Modificado de Petermann, 2006.....	52
Tabla 3: Evolución de la superficie de Santiago entre 1960 y 2017. Elaboración propia.....	64
Tabla 4: Áreas calculadas para polígonos de urbanización. Hanging-wall como bloque sobre la traza de la falla limitada por los escarpes.	74
Tabla 5: Valores de la aceleración horizontal máxima (PGA) en función de la distancia, para un evento de magnitud $M_w=7.4$. Tomado de Estudio de Riesgo y Modificación del PRMS Falla San Ramón (SEREMI & MINVU, 2012).....	75
Tabla 6: Áreas urbanas en riesgo sísmico por la FSR. Elaboración propia (2018).....	77
Tabla 7: Recopilación bibliográfica sobre terremoto del 13 mayo de 1647.....	83
Tabla 8: Duraciones del terremoto de mayo de 1647 con base en la oración del credo. Elaboración propia.....	94
Tabla 9: Instrumentos de Planificación Territorial y sus modificaciones. Tomado de Aguirre (2010).	96
Tabla 10: Factores a favor y en contra para fuente intraplaca y cortical para terremoto de mayo de 1647.	102
Tabla 11: Condiciones de borde mapa de intensidades.....	103

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL TRABAJO

La zona de estudio corresponde a la cuenca de Santiago, Región Metropolitana, ciudad capital de Chile, que alberga -según datos preliminares del último Censo 2017 (Instituto Nacional de Estadísticas, INE)- a 7.112.808 de personas, las cuales representan el 40,5% de la población nacional. Esta metrópolis caracterizada por su estilo de vida intenso, se ha encontrado expuesta a peligros naturales desde el emplazamiento de los Incas y la llegada de los españoles en el siglo XVI, hasta la actualidad. De esta forma, el registro de inundaciones, aluviones, terremotos, y otras amenazas, son parte de la historia y cultura local.

El conocimiento e información de los peligros que amenazan a la ciudad se ha visto incrementado durante las últimas décadas. Parte de este conocimiento ha sido la identificación en el frente cordillerano de la estructura geológica denominada Falla San Ramón (FSR) y los principales abanicos aluviales activos de la capital (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011).

La FSR es una estructura con comportamiento inverso, que monta las rocas del frente cordillerano sobre los sedimentos de la depresión central. La importancia de la FSR para la ciudad de Santiago se ve representada por su amenaza sísmica, constituida por dos tipos de peligros: la generación de un sismo con ruptura superficial, o la ocurrencia de un sismo sin ruptura en superficie, para ambos casos la ciudad se vería afectada por la sacudida del movimiento sísmico.

De acuerdo a Vargas et al. (2014), la FSR ha producido dos grandes terremotos, hace 17.000-19.000 años y el último hace 8.000 años. Estos sismos se encuentran evidenciados por escarpes tectónicos en el piedemonte, identificados a partir de trincheras paleosismológicas. Son estos escarpes los que representan la manifestación del carácter activo de la FSR, asociado a terremotos con ruptura en superficie. Unidades como abanicos aluviales de edad pleistocena a holocena, y terrazas fluviales basculadas en el valle del Río Maipo se encuentran afectados por escarpes de la FSR (Armijo et al., 2010). Se han cuantificado escarpes con alturas mínimas de 3-4 m hasta escarpes mayores y más antiguos de 100-200 m (Rauld, 2011).

La expresión superficial semi-continua de la FSR ha sido identificada al menos entre el Río Mapocho y el Río Maipo (Armijo et al., 2010), abarcando las comunas de Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto. Se ha estimado que la magnitud para un nuevo terremoto generado por la falla sería de $M_w=7.5$ (Vargas et al., 2014), si se activan los 35 km de longitud de la traza, reconocida por Armijo et al. (2010).

El tipo de terremotos generados por la FSR se clasifican dentro de la categoría de sismos superficiales intraplaca, reconocidos por su alta peligrosidad, la que radica en la poca profundidad en que estos ocurren. Ejemplo de ello es el terremoto de Kobe de 1995, de magnitud 7.2 en Escala de Richter, originado por la Falla de Nojima en Japón, que con un desplazamiento vertical de 1,3 m dejó más de 6000 muertos. En Chile, el terremoto de Las Melosas de 1958 de $M_s=6.9$ e intensidad IX en escala MSK (Sepúlveda et al., 2008), es también un ejemplo de sismo superficial intraplaca. El terremoto de Las Melosas refleja además el carácter local de estos

sismos, que a diferencia de los terremotos por subducción, afectan fuertemente a las cercanías del epicentro, pero pueden no provocar daños de consideración a decenas de kilómetros de distancia.

En cuanto al desarrollo de la capital, desde los años cuarenta Santiago ha mostrado un crecimiento explosivo, que según Hurtado (1996) se relaciona a las migraciones campo-ciudad. Este aumento en la población se ve reflejado en una expansión areal de la ciudad y en un incremento en la densidad (Ferrando, 2008).

Estimaciones del INE proyectan para los próximos 3 años (2017-2020) un aumento de 242.244 habitantes en la población total de Santiago, donde las comunas de Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto representan, con 28.983 habitantes, casi un 12% del incremento total de la capital. El continuo crecimiento ocupacional de este sector se podría explicar debido a que estas comunas han simbolizado una posibilidad de mejora en la calidad de vida y en las condiciones ambientales, lo que trae consigo una ocupación en zonas de mayor riesgo natural.

Desde disciplinas, como el urbanismo, la geografía y la economía, se ha caracterizado el desarrollo urbano de Santiago durante las últimas décadas (Galetovic & Jordán, 2006), se ha estudiado la evolución de las medidas de planificación por parte del Estado (Pavez, 2011), y se han realizado numerosas tesis sobre estudios territoriales de Santiago y sus barrios.

Los estudios indican que es un hecho que la ciudad se ha ido montando sobre el piedemonte, respecto a ello, Ferrando (2008) plantea que se requiere tomar especial atención a los desastres desencadenados por procesos naturales en ciudades tan expuestas como Santiago, cuya amenaza se ve agravada por una acción de planificación urbana interrumpida, en particular desde 1979 cuando se adopta de forma radical el modelo de libre mercado. Una evidencia de este ordenamiento territorial insuficiente es que el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) y los Planes Reguladores Comunales (PRC) respectivos, aún no consideran dentro de su normativa a la FSR y su amenaza sísmica (SEREMI & MINVU, 2012).

Por consiguiente, se hace necesario reevaluar el riesgo geológico al que se expone Santiago, el cual ha ido en aumento y que probablemente seguirá creciendo si la ocupación no es debidamente normada en el corto plazo.

Esta memoria busca evidenciar la relación entre la amenaza natural de la FSR y la expansión de Santiago¹. Estudiando como Santiago se ha montado sobre los escarpes de la FSR, mediante el análisis de los escarpes tectónicos en el piedemonte y la caracterización de la evolución historiográfica de los límites de la urbanización de Santiago. Se analizarán además las características del terremoto del 13 de mayo de 1647, uno de los eventos más destructivos en la historia de Santiago y cuya fuente aún no está clara, proponiéndose una posible relación de este sismo con la FSR. De esta manera, se busca reflejar el desarrollo, el uso actual del territorio en Santiago, y los efectos posibles de una amenaza sísmica en la capital, para demostrar así la necesidad de adaptación de los instrumentos locales de planificación territorial.

¹ Se entenderá a lo largo de esta memoria al hablar sobre la expansión de Santiago como el crecimiento de la mancha urbana.

1.2 MOTIVACIÓN

Esta memoria busca vincular el conocimiento geocientífico con la sociedad y sus necesidades, específicamente en el área de gestión territorial y riesgos geológicos, promoviendo desde su elaboración la importancia del rol social del geólogo junto con la relevancia de la argumentación científica en las decisiones relativas a la planificación urbana y la reducción del riesgo de desastres.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Determinar la evolución historiográfica de los límites urbanos de la ciudad de Santiago y su exposición frente al peligro sísmico asociado a la Falla San Ramón, especialmente en relación a sus escarpes tectónicos en el piedemonte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar evolución historiográfica de la ocupación urbana de Santiago hacia la FSR.
- Determinar la relación entre los escarpes geomorfológicos de la FSR y la urbanización de Santiago.
- Evaluar la posible relación del terremoto de mayo de 1647 con la FSR.

1.3.3 Hipótesis de trabajo

En esta investigación se asume como supuesto que la FSR corresponde a una falla activa con potencial sísmico que representa un peligro para toda la ciudad de Santiago, especialmente para el sector oriente y específicamente para las comunas de Vitacura, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto. Se propone inicialmente una posible relación entre el terremoto de mayo de 1647 y la FSR.

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada al este de Santiago, en el frente cordillerano de la capital. El área involucra gran parte del sector urbano y parte de la cordillera de los Andes. Se extiende específicamente entre los $33^{\circ}19'$ y los $33^{\circ}37'$ de latitud sur (Figura 1.1).

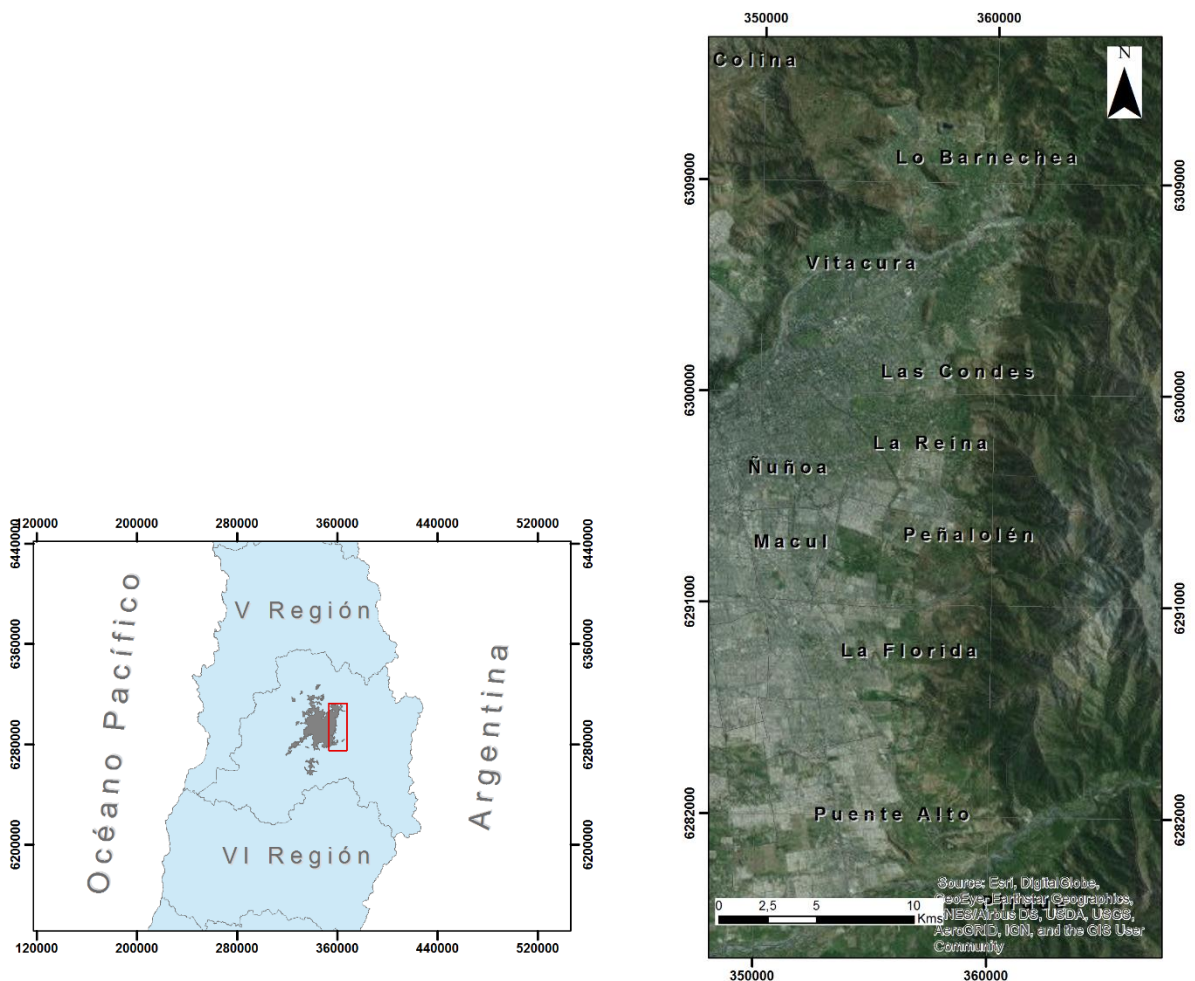


Figura 1.1: Área de estudio, a la izquierda área en rojo en escala regional, a la derecha a escala local. Imagen satelital corresponde a un mapa base del software ArcGIS 10.

Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

Los conceptos descritos a continuación son necesarios para entender el desarrollo de esta memoria. Las definiciones fueron tomadas de libros que abordan la ingeniería geológica y de publicaciones del área geográfica.

2.1 RIESGO

El riesgo es una condición que ha acompañado a la sociedad y a las comunidades desde el inicio de su desarrollo y forma parte de la vida diaria. Variados fenómenos pueden producir situaciones de riesgo, por lo que el conocimiento de la naturaleza del riesgo es esencial para poder reducirlo y emprender acciones que permitan gestionarlo.

Primeramente, el riesgo se encuentra definido por la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD) (2004) como la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental) como resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad.

Por otro lado, Burton & Kates (1964) definen los riesgos naturales como “todo fenómeno extremo del medio físico que resulta perjudicial para el hombre y que está originado por fuerzas externas a él, siendo estas fuerzas incontrolables e imprevisibles, de manera que otorgan al desastre un carácter azaroso que lo convierte en riesgo para la sociedad”. Bajo esta definición, Camarasa et. al (2001) plantea que los dos componentes que determinan el riesgo son: el evento físico que origina el desastre y los impactos negativos que produce sobre la sociedad que lo sufre.

Desde otro punto de vista, González de Vallejos (2002) define el riesgo como las pérdidas potenciales debidas a un fenómeno natural determinado (vidas humanas, pérdidas económicas directas e indirectas, daños a edificios o estructuras, etc.). Este autor propone que el riesgo se evalúa a partir de la peligrosidad correspondiente a un determinado proceso y de los efectos del evento sobre los elementos expuestos, los cuales pueden ser expresados por parámetros como la vulnerabilidad, pérdidas, costes, exposición, etc. También plantea que el riesgo como el peligro, están referidos a un periodo de tiempo determinado, que se puede evaluar de forma determinista o probabilista. Para ello plantea la siguiente ecuación.

$$R = P \times V \times C$$

Dónde P es peligrosidad del proceso, V es vulnerabilidad de los elementos expuestos, y C es el costo o valor de los mismos. El riesgo se expresa en unidades de pérdidas económicas o humanas. Si alguno de estos factores es nulo, el riesgo será nulo.

Esta formulación de riesgo se reduce a *Riesgo = Amenaza x Vulnerabilidad*, es decir, amenaza y vulnerabilidad como elementos fundamentales (EIRD, 2004).

Complementando las visiones anteriores, Camarasa et. al (2001) destaca que el hombre no actúa solo como un agente pasivo víctima de las pérdidas, sino que puede jugar un papel activo interviniendo en el evento físico, provocando o modificando la naturaleza del evento.

El aspecto social está estrechamente relacionado con la toma de decisiones para enfrentar los riesgos, pues se vincula a las percepciones del riesgo y sus causas subyacentes (EIRD, 2004).

2.2 PELIGRO

La peligrosidad o peligro (hazard) se refiere a la frecuencia con que ocurre un determinado proceso, al lugar en que sucede y a una cierta magnitud (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002). Según Camarasa et. al (2001), peligro alude al evento físico y a la probabilidad de alcanzar valores extremos.

Por otro lado, Mardones y Vidal (2001) describen la amenaza como un fenómeno natural, cuya dinámica puede desbordar sus umbrales más frecuentes de intensidad, magnitud y localización, pudiendo ocasionar daños a las personas y sus bienes.

Existe una amplia variedad de amenazas: geofísicas, meteorológicas, hidrológicas, ambientales, tecnológicas, biológicas e incluso sociopolíticas, que pueden poner en peligro la vida de las personas y el desarrollo sostenible (EIRD, 2004).

Es menester conocer el carácter de la amenaza natural, y para ello es necesario ocuparse de casi todos los fenómenos físicos que ocurren en la tierra (EIRD, 2004).

La amenaza geológica es definida por la UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2009) como un proceso o fenómeno geológico que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos en la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales. Entre este tipo de amenazas se incluyen procesos como terremotos, actividad y emisiones volcánicas, movimiento de masas, aludes, desprendimiento de rocas, derrumbes en la superficie y corrientes de barro o escombros. Los factores hidrometeorológicos contribuyen a desencadenar procesos geológicos.

Específicamente en geología la peligrosidad se refiere al proceso geológico, y para su evaluación es necesario conocer:

- Dónde y cuándo ocurrieron los procesos en el pasado.
- La intensidad y magnitud que tuvieron.
- Las zonas en que pueden ocurrir procesos futuros.
- La frecuencia con que ocurre (periodo de retorno).

La forma de indicar el valor de la peligrosidad, puede ser una probabilidad de ocurrencia de un determinado evento e intensidad en un lapso de tiempo, o un periodo de retorno, es decir, los años transcurridos entre dos eventos con similares características (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Surge la definición de un término interesante conocido como “amenaza socionatural”, propuesto como un fenómeno de mayor ocurrencia de eventos relativos a ciertas amenazas geofísicas e hidrometeorológicas (aludes, inundaciones, subsidencia de la tierra y sequías) producto de la interacción de las amenazas naturales con los suelos y los recursos ambientales explotados en exceso o degradados (UNISDR, 2009). Este término se ha usado más en el último

tiempo, pues se utiliza para los casos en que las actividades humanas incrementan la ocurrencia de las amenazas por sobre su probabilidad natural.

Es importante entender que la mayoría de las amenazas naturales son inevitables, a diferencia de los desastres o las amenazas siconaturales. El estudio del pasado y monitoreo de las situaciones del presente por parte de las comunidades, autoridades e instituciones, permite anticiparse y comprender futuras amenazas, pudiendo minimizar el riesgo de desastre (EIRD, 2004) y generando una gestión prudente que pueda evitar llegar a niveles de catástrofe.

2.3 VULNERABILIDAD

Este concepto se encuentra definido por la UNISDR (2009) como las características y circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza. Este término está ligado a factores físicos, sociales, económicos y ambientales. Dentro de una comunidad, la vulnerabilidad varía considerablemente y con el transcurso del tiempo. La definición dada por esta agrupación no considera el grado de exposición de los elementos.

Por otro lado, Cardona (2001) entiende la vulnerabilidad como un factor de riesgo interno que está expresado matemáticamente como la factibilidad de que el sujeto o el sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza. Además, destaca que la condición de vulnerabilidad no existe si no se está amenazado, y no existe condición de amenaza para un elemento si no está expuesto y es vulnerable a la acción de la potencial amenaza.

La vulnerabilidad está muy ligada al ámbito y factores sociales, y por tanto, para su evaluación y administración las áreas sociológicas son las que se encargan en general de su estudio. En esta misma línea, se agrega a la vulnerabilidad la capacidad de hacer frente a las circunstancias, y las formas en que las personas y organizaciones utilizan los recursos y capacidades disponibles para enfrentar las condiciones adversas que podrían conducir a un desastre (EIRD, 2004). En resumen, se consideran cuatro factores principales que influyen en el grado de vulnerabilidad: físicos, económicos, sociales y ambientales (Figura 2.1).

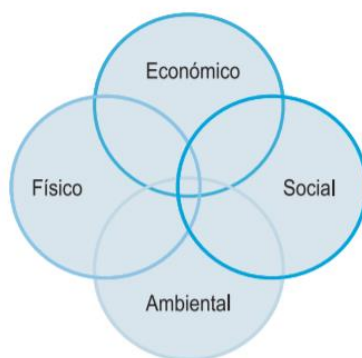


Figura 2.1: Factores que componen la vulnerabilidad. Tomado de Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD), 2004.

Los factores físicos son aquellos que tienen mayor relación con las áreas de ordenamiento territorial, de la ingeniería y la arquitectura. Se relacionan principalmente con consideraciones y susceptibilidades respecto a la ubicación y al entorno construido, es decir, a la exposición. Puede determinarse por aspectos como la densidad de población, la adaptación de un asentamiento, el lugar, diseño y materiales de construcción (EIRD, 2004).

Por otro lado, la EIRD (2004) postula que la vulnerabilidad social está relacionada con el bienestar de las personas, comunidades y la sociedad. Comprende aspectos como la alfabetización, educación, condiciones de seguridad y paz, acceso a derechos humanos fundamentales, sistemas de buena gobernabilidad y equidad social, valores tradicionales de carácter positivo, costumbres, convicciones ideológicas y sistemas de organización colectiva. De esta forma, para una misma exposición puede existir un grupo más vulnerable que otro: en general, las personas menos privilegiadas por razones de clase, etnias minoritarias, muy jóvenes o muy ancianos, entre otros, están expuestos a mayor riesgo.

En cuanto a los factores económicos, la población pobre es mucho más vulnerable que los segmentos más acomodados de la sociedad (EIRD, 2004). Esto se vincula con el efecto de resiliencia, pues quienes posean una mejor situación económica al producirse un desastre, probablemente sufrirán menos pérdidas y su capacidad de recuperación será mayor. Se añaden a este factor la magnitud de reservas económicas, el grado de endeudamiento y acceso a créditos, préstamos y seguros. De esta manera, el acceso inadecuado a la infraestructura socioeconómica esencial y básica expone a las personas a mayor riesgo.

Finalmente, los aspectos más importantes de la vulnerabilidad ambiental son el grado de agotamiento de los recursos naturales y su estado de degradación. La exposición a contaminación, el aumento sostenido de degradación de suelos, la escasez de agua, la disminución al acceso a aire limpio, agua potable y saneamiento, entre otros factores, contribuyen a la vulnerabilidad ambiental. Al disminuir los recursos naturales, se limitan las alternativas de las comunidades para enfrentar situaciones de riesgo y la resiliencia local (EIRD, 2004).

Estudios de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2005) exponen que la vulnerabilidad puede analizarse desde las perspectivas física, social, política, tecnológica, ideológica, cultural y educativa, ambiental e institucional, y que están relacionadas entre sí; plantean que “su gestación se vincula con factores de orden antrópico, esto es, de la interacción humana con la naturaleza. En tanto que una amenaza es un peligro que causa una emergencia, la vulnerabilidad a esa amenaza ocasiona un desastre”.

Debido al énfasis de esta memoria, es importante definir el grado de exposición, factor de la vulnerabilidad, que se describe como el tiempo y el modo de sometimiento de un ecosistema y sus componentes a los efectos de una actividad o energía potencialmente peligrosa, es decir, la cantidad y duración de la energía potencialmente destructiva que recibe (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas, 2005).

Se han reconocido los factores que caracterizan la vulnerabilidad en América Latina (CEPAL, Naciones Unidas, 2005), entre los cuales destacan:

- Debilidad institucional, restricciones o inexistencia de políticas públicas, legislación y normas de prevención; sistemas de información, observación y alerta temprana

insuficiente, escasos recursos financieros, humanos, y de equipamiento; conflictos interinstitucionales y centralización administrativa.

- Ignorancia del nexo conceptual entre actividad humana, impacto ambiental y desastre, y ausencia de un concepto claro del correcto uso del espacio y otros recursos naturales.
- Baja calidad de las obras, debido a la inexistencia o incumplimiento de normas, procesos preventivos y de gestión ambiental.
- Falta de mentalidad preventiva en la valoración y tratamiento de amenazas y desastres por parte de la población, relacionada con la carencia de memoria histórica sobre causas y consecuencias de los desastres y la ausencia de opciones para los más pobres, lo que los hace más vulnerables.
- Poca participación del sector privado, las organizaciones de la sociedad civil y los gobiernos locales, lo que hace ineficientes la prevención de desastres y su atención. La debilidad de la democracia y los problemas de gobernabilidad limitan el desarrollo participativo.
- Ausencia o escasa importancia de la prevención en el discurso político y las directrices de gobierno y de Estado.
- Incomprensión e ignorancia del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres, consideración de los costos de prevención con una perspectiva economicista y no de inversión. La opción de privatizar el costo de los desastres por medio de los seguros no encuentra espacio en la inversión.
- Poca vinculación entre la comunidad científica y el resultado de sus estudios, con el proceso de formulación de políticas en materia de desastres y prevención.

Es importante conocer que a diferencia de las amenazas, el control y reducción de la vulnerabilidad es siempre posible, para ello existen varios métodos de gestión en materia de prevención. Al identificar los factores descritos anteriormente se puede notar la estrecha relación entre la reducción de la vulnerabilidad y el incremento de la capacidad organizativa y participativa de las comunidades, el sector privado y el gobierno (CEPAL, Naciones Unidas, 2005).

2.4 HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

Dentro de los mecanismos de coordinación y orientación normativa para la reducción del riesgo de desastres, existen planes de ordenamiento territorial que intentan mitigar los efectos de eventos peligrosos, que en general están elaborados por autoridades, sectores, organizaciones o empresas donde se establecen los riesgos potenciales y las medidas necesarias para enfrentarlos.

La importancia de la prevención de riesgos ha presentado cambios destacados en las últimas décadas, donde en varios de los países de América se han revisado las normas relativas a los desastres de origen socionatural y reforzado la institucionalidad en la materia, mejorando la capacidad de respuesta frente a situaciones de emergencia (CEPAL, Naciones Unidas, 2005).

En Chile, existen mecanismos de planificación territorial y normativas que se encargan preventivamente de riesgos y amenazas. Sin embargo, la mayor parte de los espacios urbanos chilenos presenta situaciones de riesgo, debido a la ocupación no solo irregular y desprovista de planificación, sino que también a la presión ejercida desde el sector inmobiliario para la construcción en tales lugares (Arenas, Lagos, & Hidalgo, 2010).

Actualmente el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) cuenta con categorías de Instrumentos de Planificación Territorial IPT, las cuales son: Plan Regional Desarrollo Urbano, Plan Regulador Intercomunal, Plan Regulador Comunal, y Plan Seccional. Para estos se establecen las siguientes definiciones estipuladas en el Decreto con Fuerza de Ley N° 458 Ley General de Urbanismo y Construcciones, que se pueden encontrar en la página: <http://minvu.cl>.

Plan Regional Desarrollo Urbano

“Artículo 30°.- Se entenderá por Planificación Urbana Regional aquella que orienta el desarrollo de los centros urbanos de las regiones”.

“Artículo 31°.- La Planificación Urbana Regional se realizará por medio de un Plan Regional de Desarrollo Urbano, que fijará los roles de los centros urbanos, sus áreas de influencia recíproca, relaciones gravitacionales, metas de crecimiento, etc.”

“Artículo 32°.- El Plan Regional de Desarrollo Urbano será confeccionado por las Secretarías Regionales del Ministerio de la Vivienda y Urbanismo, de acuerdo con las políticas regionales de desarrollo socio-económico.”

“Artículo 33°.- Los planes regionales de desarrollo urbano serán aprobados por el consejo regional y promulgados por el intendente respectivo, debiendo sus disposiciones incorporarse en los planes reguladores metropolitanos, intercomunales y comunales.”

Plan Regulador Intercomunal

“Artículo 34°.- Se entenderá por Planificación Urbana Intercomunal aquella que regula el desarrollo físico de las áreas urbanas y rurales de diversas comunas que, por sus relaciones, se integran en una unidad urbana.

Cuando esta unidad sobrepase los 500.000 habitantes, le corresponderá la categoría de área metropolitana para efectos de su planificación.

La Planificación Urbana Intercomunal se realizará por medio del Plan Regulador Intercomunal o del Plan Regulador Metropolitano, en su caso, instrumentos constituidos por un conjunto de normas y acciones para orientar y regular el desarrollo físico del área correspondiente.

Las disposiciones de los artículos siguientes, referentes al Plan Regulador Intercomunal, regirán igualmente para los Planes Reguladores Metropolitanos.”

“Artículo 35°.- El Plan Regulador Intercomunal estará compuesto de:

- a) Una memoria explicativa, que contendrá los objetivos, metas y programas de acción;*
- b) una Ordenanza, que contendrá las disposiciones reglamentarias pertinentes; y*
- c) los planos, que expresen gráficamente las disposiciones sobre zonificación general, equipamiento, relaciones viales, áreas de desarrollo prioritario, límites de extensión urbana, densidades, etc.*

Para los efectos de su aprobación, modificación y aplicación, estos documentos constituyen un solo cuerpo legal.”

“Artículo 38°.- Las disposiciones de los Planes Reguladores Intercomunales que constituyan alteraciones a las disposiciones de los Planes Reguladores Comunales existentes, se entenderán automáticamente incorporadas a éstos como modificaciones.

En las comunas que carezcan de Plan Regulador Comunal harán las veces de tal las disposiciones del Plan Regulador Intercomunal, sin perjuicio de la exigencia establecida en la letra a) del artículo 47°.”

Plan Regulador Comunal

“Artículo 41°.- Se entenderá por Planificación Urbana Comunal aquella que promueve el desarrollo armónico del territorio comunal, en especial de sus centros poblados, en concordancia con las metas regionales de desarrollo económico-social.

La planificación urbana comunal se realizará por medio del Plan Regulador Comunal.

El Plan Regulador es un instrumento constituido por un conjunto de normas sobre condiciones adecuadas de higiene y seguridad en los edificios y espacios urbanos, y de comodidad en la relación funcional entre las zonas habitacionales, de trabajo, equipamiento y esparcimiento.

Sus disposiciones se refieren al uso del suelo o zonificación, localización del equipamiento comunitario, estacionamiento, jerarquización de la estructura vial, fijación de límites urbanos, densidades y determinación de prioridades en la urbanización de terrenos para la expansión de la ciudad, en función de la factibilidad de ampliar o dotar de redes sanitarias y energéticas, y demás aspectos urbanísticos.”

“Artículo 42°.- El Plan Regulador Comunal estará compuesto de:

a) Una Memoria explicativa, que contendrá los antecedentes socio-económicos; los relativos a crecimiento demográfico, desarrollo industrial y demás antecedentes técnicos que sirvieron de base a las proposiciones, y los objetivos, metas y prioridades de las obras básicas proyectadas;

b) un estudio de factibilidad para ampliar o dotar de agua potable y alcantarillado, en relación con el crecimiento urbano proyectado, que requerirá consulta previa al Servicio Sanitario correspondiente de la Región;

c) una Ordenanza Local que contendrá las disposiciones reglamentarias pertinentes, y

d) los planos, que expresan gráficamente las disposiciones sobre uso de suelo, zonificación, equipamiento, relaciones viales, límite urbano, áreas prioritarias de desarrollo urbano, etc. Para los efectos de su aprobación, modificación y aplicación, estos documentos constituyen un solo cuerpo legal.”

Plan Seccional

“Artículo 46°.- En los casos en que, para la aplicación del Plan Regulador Comunal, se requiera de estudios más detallados, ellos se harán mediante Planos Seccionales, en que se fijarán con exactitud los trazados y anchos de calles, zonificación detallada, las áreas de construcción obligatoria, de remodelación, conjuntos armónicos, terrenos afectados por expropiaciones, etc.

En las comunas en que no exista Plan Regulador podrán estudiarse Planes Seccionales, los que se aprobarán conforme a lo prescrito en el inciso primero del artículo 43.

La confección de Planos Seccionales tendrá carácter obligatorio en las comunas de más de 50.000 habitantes que cuenten con Asesor Urbanista, para los efectos de fijar las líneas oficiales de edificación, y lo será también en aquellas que califique especialmente la Secretaría Regional

correspondiente del Ministerio de la Vivienda y Urbanismo, por sus condiciones topográficas, o por urgencia en materializar determinadas obras públicas o expropiaciones.”

Límite Urbano

“Artículo 52º.- Se entenderá por límite urbano, para los efectos de la presente ley y de la Ley Orgánica de Municipalidades, la línea imaginaria que delimita las áreas urbanas y de extensión urbana que conforman los centros poblados, diferenciándolos del resto del área comunal.”

“Artículo 53º.- La fijación de límites urbanos de los centros poblados que no cuenten con Plan Regulador y sus modificaciones, se sujetarán a la misma tramitación señalada en el inciso primero del artículo 43, debiendo recabarse, además, informe de la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura, organismo que deberá emitirlo dentro del plazo de 15 días, contado desde que le sea requerido por la municipalidad. Vencido dicho plazo, se tendrá por evacuado sin observaciones.”

“Artículo 54º.- En las ciudades en que se aprobare un plan regulador el límite urbano fijado por éste reemplazará automáticamente al límite urbano anterior. Cuando se amplíe el límite urbano de un Plan Regulador, se definirá simultáneamente el uso del suelo, que corresponda a los terrenos que se incorporen al área urbana.”

Específicamente sobre lo que compete a riesgos naturales en los planes reguladores, el Artículo 2.1.17 del Decreto con Fuerza de Ley N° 458 Ley General de Urbanismo y Construcciones se establece que:

“Artículo 2.1.17. En los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un peligro potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas se denominarán "zonas no edificables" o bien, "áreas de riesgo", según sea el caso, como se indica a continuación:

Por "zonas no edificables", se entenderán aquellas que por su especial naturaleza y ubicación no son susceptibles de edificación, en virtud de lo preceptuado en el inciso primero del artículo 60º de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. En estas áreas sólo se aceptará la ubicación de actividades transitorias.

Por "áreas de riesgo", se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole suficientes para subsanar o mitigar tales efectos.

(...)

Las "zonas no edificables" corresponderán a aquellas franjas o radios de protección de obras de infraestructura peligrosa, tales como aeropuertos, helipuertos, torres de alta tensión, embalses, acueductos, oleoductos, gasoductos, u otras similares, establecidas por el ordenamiento jurídico vigente.

Las "áreas de riesgo" se determinarán en base a las siguientes características:

1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.

2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.

3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.

4. Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.”

Pese a que los términos aquí referidos se encuentran establecidos hace unos años, aún generan intensa discusión, pues se plantea que no existe coherencia en el uso de los instrumentos disponibles.

Según Bustos (1998), en Chile aún se carece de un cuerpo disciplinario integrado a la realidad territorial chilena, tal como existe en Europa en su Carta Europea de Ordenamiento del Territorio (1983), cuyo objetivo es la utilización racional del mismo. Estudios más recientes coinciden en este aspecto, y proponen que tanto la planificación territorial como la ambiental, debieran tener un carácter transversal, incorporando para una adecuada delimitación de zonas de riesgo o protección criterios ambientales y funcionales y no solo administrativos, para asegurar de esta forma la propiedad privada y pública de manera sustentable (Arenas, Lagos, & Hidalgo, 2010).

Por otra parte, en las problemáticas principales indicadas en el diagnóstico de la Política Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU) se menciona la falta de articulación entre las herramientas de planificación territorial. Sin embargo su última promulgación, ocurrida en 2014, sigue teniendo un enfoque promercado que no pone solución a la desconexión y la poca defensa en las herramientas de planificación sobre los riesgos naturales.

Para el tema en estudio, cabe destacar que las zonas urbanas que se encuentren expuestas a fallas geológicas, para la regulación chilena se consideran “áreas de riesgo” lo que implica que pueden habitarse si el plan regulador así lo aprueba. Idealmente estas áreas de riesgo deben proponer medidas de mitigación o acciones que permitan subsanar efectos, lo que no se ve implementado en el caso de la FSR.

Capítulo 3 ANTECEDENTES GEOLÓGICOS

3.1 GEOLOGÍA DE LA CIUDAD DE SANTIAGO

Numerosos autores han estudiado la formación de la cuenca de Santiago y sus alrededores, caracterizando la geología local y regional. El contexto tectónico es esencial para definir la geología de Chile central, donde la subducción y magmatismo han afectado al territorio desde el Jurásico Inferior.

Durante el proceso de formación de esta cuenca han transcurrido y se han superpuesto eventos tectónicos, volcánicos, erosivos, entre otros. El desarrollo de la cuenca de Santiago ha sido interpretado por Thiele (1980) como un episodio tectónico extensivo, donde la cuenca correspondería a un graben limitado por fallas normales, que fue rellenado por sedimentos provenientes de la Cordillera Principal. Por otro lado, Farias et al. (2008) propone que la Cordillera Principal y la Cordillera de Costa se habrían alzado simultáneamente, y que la cuenca tendría un origen erosivo. Otros estudios (Armijo et al., 2010) indican que la formación de la cuenca de Santiago estaría asociada a procesos tectónicos compresivos.

En cuanto a la actividad volcánica, ésta ha quedado como relictos en Santiago en los cerros islas que se distinguen en la ciudad. El estudio realizado por Vergara et al. (2004) identifica tres episodios subvolcánicos entre el Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano, donde las rocas son del tipo basalto a andesitas y se ven representadas por cerros como San Cristóbal, Santa Lucía, Las Canteras, Cerro Renca, entre otros.

Teniendo en cuenta las múltiples interpretaciones, la cuenca de Santiago se habría formado en un régimen de subducción, con un periodo de extensión favorecido por la baja tasa de subducción durante el Paleógeno-Oligoceno, que ha cambiado durante el Cenozoico tardío hacia una tectónica inversa caracterizada por estructuras como la FSR (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011) que han tenido incidencia sobre procesos exhumativos y erosivos, cuyo carácter activo se ha demostrado a partir de trabajos paleosismológicos (Vargas et al., 2014).

3.1.1 Marco Tectónico

Chile está ubicado en el margen occidental de Sudamérica y se encuentra emplazado sobre la placa Sudamericana, la cual se pone en contacto al oeste del continente con las placas de Nazca y Antártica. Este contacto es convergente y genera zonas de subducción con diferentes tasas y vectores de convergencia (Figura 3.1). La placa de Nazca se subduce bajo la Sudamericana a una tasa de 6.8 cm/año (Vigny et al., 2009) y la placa Antártica subduce a una tasa de 2 cm/año, provocando deformación en el continente y grandes terremotos en todo Chile. La mayor tasa de convergencia entre las placas Nazca y Sudamericana produce los mayores terremotos del país en esta zona de contacto.

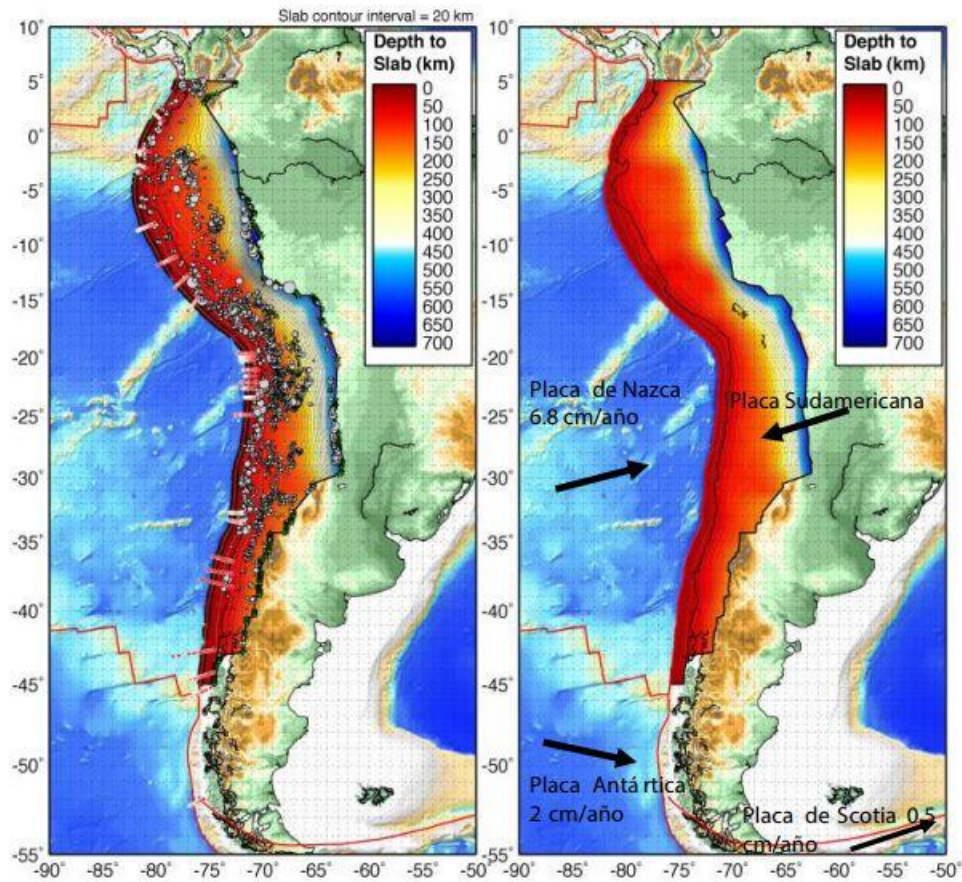


Figura 3.1: Placas tectónicas margen chileno. Tomado de "Terremotos y Sismicidad en Chile", Centro Sismológico Nacional (CSN), Universidad de Chile, 2014.

Producto de la penetración de la placa de nazca bajo el continente, se produce en el primer contacto la morfoestructura denominada fosa o trinchera, la cual tiene profundidades máximas de ~6 kilómetros a la latitud de Santiago (CSN, 2014).

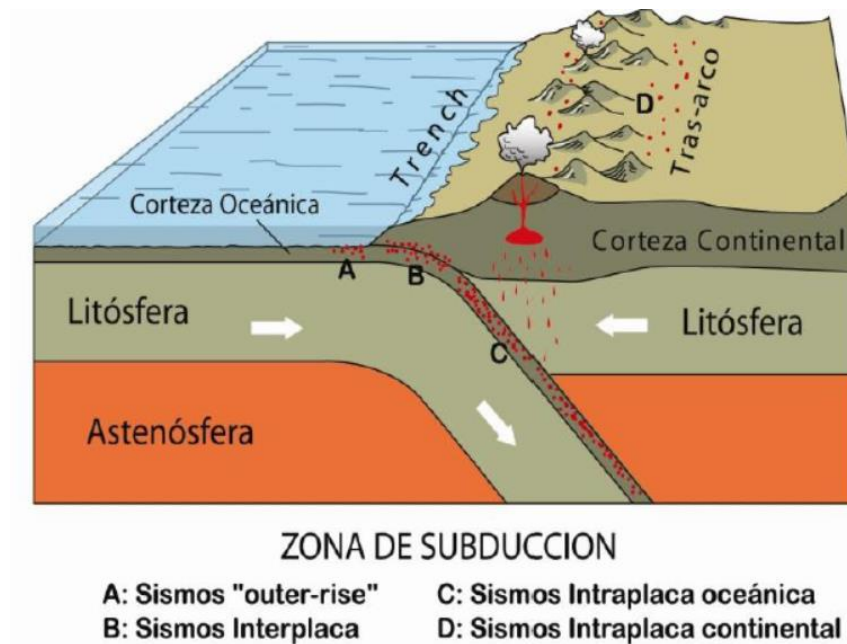


Figura 3.2: Zona de subducción y zonas sísmogénicas. Tomado de "Terremotos y Sismicidad en Chile", Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, 2014.

Gracias a las observaciones sísmicas, el margen de subducción chileno se puede dividir en cuatro tipos de terremotos tectónicos o zonas sísmogénicas (Figura 3.2):

- A. Sismos outer-rise:** ocurren fuera de la fosa o trench, y suceden debido a la deformación de la placa de Nazca al subducir bajo el continente, produciendo esfuerzos extensivos antes de la zona de contacto, que no se mueve por estar acoplada. No suelen causar daños significativos en zonas pobladas de la placa sudamericana, pero pueden producir tsunamis. En general tienen magnitudes menores a 8. Ejemplo de este tipo de sismos es el de 2001 de $M_w=6.7$ frente a la costa de Valparaíso (Centro Sismológico Nacional, 2014).
- B. Sismos interplaca:** están asociados al contacto interplaca, se producen debido a que la fuerza de roce entre las placas traba el movimiento entre ellas y acumula energía, la cual es liberada en terremotos de gran magnitud. Si el terremoto desplaza el fondo oceánico verticalmente generará un tsunami. Ejemplos de este tipo de sismos son el de Valdivia de 1960 ($M_w=9.5$), el de Valparaíso 1985 ($M_w=8.0$) y el terremoto del Maule de 2010 ($M_w=8.8$).
- C. Sismos intraplaca oceánica o de profundidad intermedia:** son terremotos como el ocurrido en Punitaqui en 1997 ($M_w=7.1$) o el de Chillán de 1939 ($M_w=7.8$). Se producen por el fracturamiento tensional de la placa de Nazca que se quiebra por su propio peso o por el roce con el manto viscoso (Rauld, 2011). Ocurren a profundidades mayores a 60 km hasta ~700 km (límite frágil-dúctil) y tienen un alto potencial de daño.
- D. Sismos intraplaca continental o superficiales intraplaca:** ocurren en la placa continental, en la corteza, a profundidades someras menores a 30 km. Son resultado del esfuerzo inducido por la subducción y esfuerzos locales. La deformación principal producto de la convergencia entre las placas es el alzamiento de la cordillera de los Andes, y estos sismos ocurren en torno a ella tanto en Chile como en Argentina. Se

encuentran asociados a fallas superficiales que pueden tener cinemática normal, inversa o de rumbo, con campos de esfuerzos comprensivos o extensivos (Rauld, 2011). Ejemplo de este tipo de sismo es el de Las Melosas de 1958 ($M_w=6.3$).

3.1.2 Dominios Morfoestructurales

La serie de procesos geotectónicos que han tenido lugar en el margen chileno desde el Jurásico Temprano (Mpodozis & Ramos, Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones?, 2008), por la interacción de la Placa de Nazca y Sudamericana, han generado como resultado la segmentación del territorio en dominios morfoestructurales (Isacks, 1988).

En Chile central entre los 32° y los 35° S el relieve de los Andes presenta cinco unidades morfoestructurales distribuidas en forma de franjas alargadas de orientación aproximada NS. De este a oeste las unidades son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Precordillera, encontrándose estas dos últimas en territorio argentino.

La zona de estudio se emplaza en la Depresión Central, donde la FSR se ubica al este, en el límite con la Cordillera Principal Occidental. A continuación se describen los dominios ya mencionados (Figura 3.3):

- La Cordillera de la Costa es un cordón montañoso que no supera los 2500 m s.n.m., y su morfología suavizada evidencia un relieve maduro (Rauld, 2011). Está compuesta por granitoides del Paleozoico Superior que afloran en su flanco oeste, y por secuencias volcánicas y sedimentarias del Mesozoico en la parte oriental (Wall et al., 1999; Sellés & Gana, 2001).
- La Depresión Central se extiende desde los 33° S hasta los 40° S (Fock, 2005), y está rellena por hasta 500 metros de depósitos sedimentarios no consolidados de edad Pleistocena a Holocena (Rauld, 2002). En la Región Metropolitana se limita al norte por el cordón de Chacabuco y al sur por los cerros de Paine. Posee alturas de entre 450 a 650 m s.n.m. y sobresalen en ella algunos cerros islas (Cerro Santa Lucía, Cerro Renca, Cerro Colorado, entre otros). Los depósitos corresponden a sedimentos de origen fluvial, aluvial, fluvio-glacial, y a cenizas de la Ignimbrita Pudahuel en algunos sectores (Leyton et al., 2011). La mayor parte de los sedimentos que rellenan la cuenca de la Región Metropolitana provienen de la hoya parcial del Maipo superior, siendo el abanico de este río el de mayor tamaño, cubriendo más del 50% de la superficie del relleno (Fernández, 2001).
- La Cordillera Principal presenta una importante elevación en comparación con la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, alcanzando alturas de ~ 6570 m s.n.m en la frontera con Argentina. Se puede dividir en tres dominios según sus características geológicas: dominio occidental, central y oriental. La Cordillera Principal Occidental está conformada por rocas de edad Cenozoica, constituida por las formaciones Abanico (Oligoceno-Mioceno Superior) y Farellones (Mioceno Medio-Superior). El dominio central está conformado por estas mismas formaciones del Cenozoico, pero la deformación es mucho más intensa, está

caracterizado por pliegues con vergencia oeste que también afectan a unidades Mesozoicas, aflorando su contacto (Armijo et al., 2010). Por último, el dominio oriental está caracterizado por una serie de corrimientos con vergencia al este en las unidades mesozoicas con repetición de secuencias propia de una faja plegada y corrida de piel delgada (Rauld, 2011), conocida como la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua (Armijo et al., 2010; Farias et al., 2008). Es en este dominio donde se emplaza el arco volcánico actual.

- La Cordillera Frontal se presenta a lo largo de más de 700 kms en Los Andes orientales, con alturas sobre los 5000 m s.n.m y está constituida por rocas pre-Jurásicas volcánicas ácidas del Grupo Choyoi. Éstas se encuentran sobre el basamento cristalino del Proterozoico (Mpodozis & Ramos, 1989).
- La Precordillera está conformada por rocas del Paleozoico Inferior principalmente, al este de las unidades descritas se han desarrollado cuencas de antepaís desde el Mioceno hasta el Holoceno (Fock, 2005).

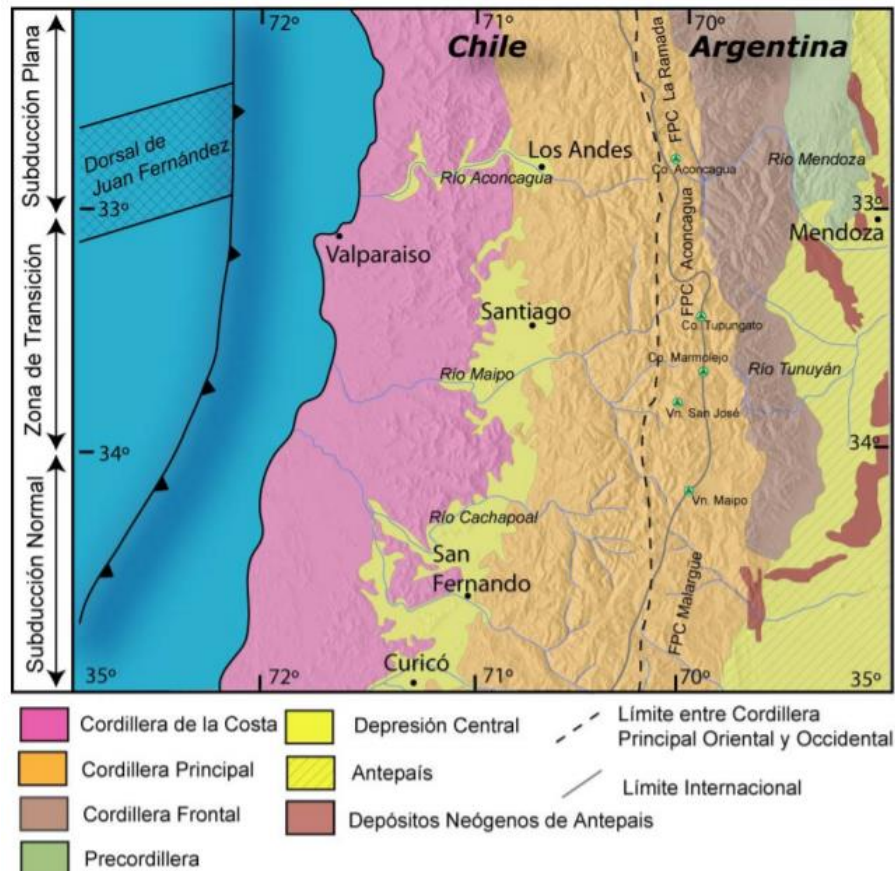


Figura 3.3: Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35° S. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yáñez (2003). Tomado de Fock (2005).

3.1.3 Marco Geológico

Como ha sido mencionado, la zona de estudio se emplaza principalmente en la Depresión Central y en el borde de la Cordillera Principal Occidental. Es por ello que a continuación se describirán las unidades que caracterizan estos dominios a la latitud de Santiago.

En el cordón montañoso andino las rocas presentes en el área de estudio corresponden a secuencias de ambiente continental de edad Cenozoica, representadas principalmente por estratos volcánicos con algunas intercalaciones sedimentarias (Thiele, 1980).

Respecto a las rocas plutónicas, se han reconocido dos unidades del Terciario Superior que intruyen las rocas estratificadas. Corresponden a granodioritas, monzonitas y tonalitas cuarcíferas (Thiele, 1980).

Hacia el oeste, en la cuenca de Santiago y en las quebradas y valles de la Cordillera Principal, los depósitos sedimentarios de origen fluvial, aluvial, coluvial y glacial, rellenan y modelan la geomorfología local.

En relación a los rasgos estructurales que destacan en la zona de estudio, la FSR aparece como una de las estructuras principales involucradas en el alzamiento de Los Andes a la latitud de Santiago (Armijo et al., 2010), la cual pone en contacto a rocas cenozoicas con depósitos no consolidados de la cuenca de Santiago (Rauld, 2002).

3.1.3.1 Unidades de Roca Estratificadas

Formación Lo Valle (Maastrichtiano – Paleoceno?) (Thomas, 1958)

Secuencia de tobas de composición andesítica a riolítica que presenta intercalaciones de lavas y rocas sedimentarias continentales de hasta 1800 m de espesor (Wall, Selles, & Gana, Mapa geológico del área de Tiltil-Santiago, Región Metropolitana, 1999). En la zona de estudio aflora en el Cerro Colorado de Renca y subyace a la Formación Abanico. Evidencias geocronológicas confirman un hiatus Maastrichtiano superior (Paleoceno?)-Eoceno entre las formaciones Lo Valle y Abanico (Gana & Wall, 1997)..

Formación Abanico (Eoceno Superior? – Mioceno Inferior) (Aguirre L., 1960)

Es una unidad conformada por dos franjas con disposición ~NS que está constituida por lavas básicas a intermedias, rocas piroclásticas ácidas, e intercalaciones sedimentarias continentales (fluviales, aluviales y lacustres) dispuestas en forma de lentes cuyo espesor alcanza los 500 m (Charrier et al., 2002; Nyström et al., 2003).

En la parte inferior de la unidad predominan las brechas volcánicas y tobas gruesas sobre las lavas (andesitas y riolitas), y sedimentitas clásticas (Thiele, 1980). Estas últimas son escasas y corresponden a areniscas de grano medio a fino, lutitas y limos con estratificación fina, con restos carbonosos y flora fósil (Thiele, 1980).

El espesor de la unidad se estima en unos 3000 m, que se ven aumentados por las numerosas intrusiones de filones-manto y lacolitos andesíticos (Thiele, 1980). Dataciones

radiométricas efectuadas en la zona la ubican entre 28-20 Ma (Wall, Selles, & Gana , Mapa geológico del área de Tilttil-Santiago, Región Metropolitana, 1999).

Sobreyace a formaciones mesozoicas y su contacto está dado por grandes fallas regionales (Charrier et al., 2002), se encuentra en contacto por falla con la Formación Lo Valle (entre el cerro Renca y Colorado), pero en otros sectores con un hiatus erosivo de 37 Ma (Gana & Wall, 1997). Su techo está marcado por una discordancia angular con la Formación Farellones (Thiele, 1980).

Formación Farellones (Mioceno) (Klohn, 1960)

Esta formación es una unidad de gran potencia constituida por sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, riolíticas y basálticas y rocas piroclásticas con intercalaciones de brechas volcánicas (Klohn, 1960).

La secuencia la componen lavas, tobas de lapilli e ignimbritas con intercalaciones de brechas volcánicas, donde las lavas predominan claramente sobre las tobas y brechas (Thiele, 1980). El espesor se estima en 2500 a 3000 m, que aparece aumentando con los mantos intrusivos y lacolitos intercalados en la secuencia (Thiele, 1980).

Se dispone sobre la Formación Abanico de forma irregular con variaciones norte-sur y este-oeste, contacto interpretado como discordante o pseudo-concordante (Charrier et al., 2002). El techo de la formación lo constituye la actual superficie de erosión (Fock, 2005).

3.1.3.2 Intrusivos

Thiele (1980) reconoce dos unidades con base en sus características petrográficas y estructurales. Para el área de estudio, en los cerros isla de la ciudad de Santiago aflora la Unidad II (microgranodioritas y pórfidos dioríticos, dacitas y andesíticos), en cambio, la Unidad I (granodiorita, monzogranito y monzonita cuarcífera) aflora en la entrada del Cajón del Maipo en el sector sur de la zona de estudio, en el reconocido Intrusivo La Obra.

En la Hoja TilTil – Santiago de Wall, Selles, & Gana (1999), los cuerpos intrusivos se registran de la siguiente forma en la zona de estudio:

Intrusivos hipabisales andesíticos y dacíticos (20-19 Ma)

Corresponden a stocks y diques andesíticos y dacíticos de anfíbola que intruyen a la Formación Lo Valle y la Formación Abanico. En el área de estudio aflora el Cerro Manquehue. Son rocas leucocráticas porfídicas con fenocristales de plagioclasas principalmente. Los stocks del cerro Manquehue presentan enclaves máficos microgranulares de anfíbola y plagioclasa (Wall, Selles, & Gana , 1999).

Intrusivos hipabisales (34-19 Ma)

Son andesita, andesitas basálticas y dacitas que afloran en los cerros Santa Lucía, San Cristóbal, Renca, en los cerros de Conchalí, e intruyen a la Formación Abanico (Wall, Selles, & Gana , 1999). Parte de estos intrusivos corresponden a la Unidad Intrusiva II de Thiele (1980).

Forman stocks de hasta 2 km de diámetro y filones manto o lacolitos de hasta 150 m de espesor. Edades radiométricas K-Ar en roca total dieron valores de $21,8 \pm 0,5$ Ma (Cerro Renca-Colorado) (Thiele, 1980), y $21,2 \pm 1,0$ Ma (Sellés, 1999).

3.1.3.3 Depósitos no consolidados

Los depósitos no consolidados son de edad cuaternaria. A continuación se describen con base en su origen.

Ignimbrita Pudahuel (Pleistoceno Medio)

Está constituida por depósitos de más de 20 m de espesor (Leyton et al., 2011) de ceniza volcánica con líticos, pómez y escasos cristales de composición riolítica (Stern et al., 1984) que corresponden a un depósito de flujo piroclástico macizo cuyos afloramientos ocupan un área de aproximadamente 60 km^2 en el sector de Pudahuel. Por el sur llegan hasta Maipú y limitan al poniente con el lado oriental de la Cordillera de la Costa (Wall et al., 1996).

Hay afloramientos aislados en el cerro Apoquindo y al este de Peñalolen intercalados con los abanicos aluviales del piedemonte (Wall, Selles, & Gana, 1999).

Depósitos lacustres (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a sedimentos no consolidados impermeables, conformados por limos, arcillas y arenas limosas, con laminaciones finas o macizas. Se ubican en zonas deprimidas donde la napa está a profundidades menores de 5 m, o aflorando en superficie.

La mayor parte de los afloramientos son una franja longitudinal entre Batuco y Lo Aguirre, adosada a la Cordillera de la Costa oriental, donde los sedimentos lacustres se interdigitan con facies distales de abanicos aluviales de los esteros Colina, Lampa y del río Mapocho. Otros afloramientos menores están adosados a los cerros de Conchalí. Son áreas susceptibles a inundación en estaciones de alta pluviosidad (Wall, Selles, & Gana, 1999).

Depósitos aluviales (Pleistoceno Medio-Pleistoceno Superior)

Estos sedimentos no consolidados rellenan gran parte de la cuenca de Santiago y del valle del estero Chacabuco. Son abanicos aluviales antiguos muy extensos con suave pendiente hacia el oeste. Proviene de las principales hoyas hidrográficas, y hacia las cabeceras estos depósitos se interdigitan con coluvios y aluviones de piedemonte (Wall, Selles, & Gana, 1999).

Están conformados por sedimento de grano grueso, gravas, areniscas conglomerádicas (Leyton et al., 2011) con menor proporción de finos. Estos últimos predominan al oeste intercalados con granulometría más gruesa (Wall, Selles, & Gana, 1999). Se reconocen los depósitos aluviales del río Maipo que ocupan el sector sur de la zona, los depósitos del río Mapocho en la mayor parte del área, y los depósitos aluviales del estero Lampa, Colina y Chacabuco (Wall, Selles, & Gana, 1999).

En los depósitos del río Mapocho se han identificado restos óseos de mamíferos pleistocenos (Wall, Selles, & Gana, 1999).

La tesis de Rauld (2011) destaca la identificación de una unidad de abanicos aluviales del Pleistoceno Inferior-Medio, que conforma el relleno sedimentario producto de la migración y encajamiento hacia el norte del cauce del río Mapocho. Esta unidad aflora en los cerros Calán, Apoquindo y Los Rulos. Tiene una edad relativa mayor a los principales abanicos del Mapocho y Maipo.

Estos depósitos se encuentran fallados con su superficie desplazada entre 20 y 60 m, manteniendo su forma de abanico a pesar de su deformación (Rauld, 2011).

Depósitos aluviales de piedemonte (Pleistoceno Superior-Holoceno)

Corresponden a los abanicos aluviales más recientes y activos (Rauld, 2011) con pendientes de 3° a 6°, formados por sedimentos no consolidados en la desembocadura de quebradas mayores. Se ubican en el frente cordillerano al oriente de Santiago.

Están constituidos por alternancia de flujos de detritos con depósitos fluviales y mantos de crecida que se interdigitan y progradan sobre los depósitos aluviales de los ríos Mapocho y Maipo (Wall, Selles, & Gana, 1999). Poseen bloques heterogéneos y angulosos de tamaños variables (10 cm a 3 m) en una matriz de grano fino con intercalaciones arenosas y de finos. Presentan una morfología de abanico escasamente erosionada (Rauld, 2011).

En esta unidad se incluyen los flujos de detritos y barro del 1993 provenientes desde las quebradas San Ramón y de Macul, los que cubrieron un área de ~18 km² transportando bloques angulosos de hasta 10 m de diámetro (Wall, Selles, & Gana, 1999).

Según Rauld (2011), en los abanicos más recientes bajo el cerro Apoquindo se reconocen escarpes de entre 2 y 3 metros.

Depósitos coluviales (Pleistoceno Superior-Holoceno)

Son sedimentos no consolidados que se ubican en las faldas, pies de cerros y de la cadena montañosa. Están a la salida de quebradas y en pequeños valles intermontanos. Su constitución está dada por clastos y bloques de mala selección con escasa matriz (Ceballos, 2016). Se incluyen escombros de falda. Se encuentran adosados a los cerros que presentan pendientes de 4° a más de 10° con estratificación grosera en forma paralela a las laderas (Wall, Selles, & Gana, 1999).

Depósitos fluviales antiguos (Pleistoceno-Holoceno)

Son depósitos no consolidados que se relacionan con cauces antiguos abandonados. Lo constituyen ripios, gravas, gravas arenosas, arenas y limos. Existen depósitos aterrizados emplazados sobre 3 a 20 m del cauce actual, con suelo bien desarrollado, y depósitos con menor altura sobre el cauce actual con una capa de suelo delgada. Estos últimos se inundan esporádicamente en épocas de crecida (Wall, Selles, & Gana, 1999).

Depósitos fluviales (Holoceno)

Corresponden a los depósitos fluviales recientes y por tanto activos, que están constituidos por depósitos no consolidados de ripios, gravas, gravas arenosas clasto-soportadas, clastos redondeados, e imbricados (facies de relleno del canal). Se incluyen lentes de arena

estratificados de forma plana y cruzada. Los niveles de limo son escasos y con laminación fina (planicie de inundación) (Wall, Selles, & Gana , 1999).

Depósitos de remoción en masa (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a flujos de detritos, barro, deslizamientos, desprendimiento de bloques, reptación y hundimiento. En la zona de estudio afloran en la zona de Lo Curro, las quebradas San Ramón y Macul, el cerro San Cristóbal, cerro Renca, entre otros lugares. En Lo Curro los sedimentos incorporan bloques de hasta 10 m de diámetro por colapso gravitacional del cerro Manquehue. (Wall, Selles, & Gana , 1999)

Relleno Artificial (Holoceno)

Son depósitos de distinta composición, orgánicos e inorgánicos, que están conformados por desechos urbanos, industriales mineros y otros productos de actividad antrópica (Wall, Selles, & Gana , 1999).

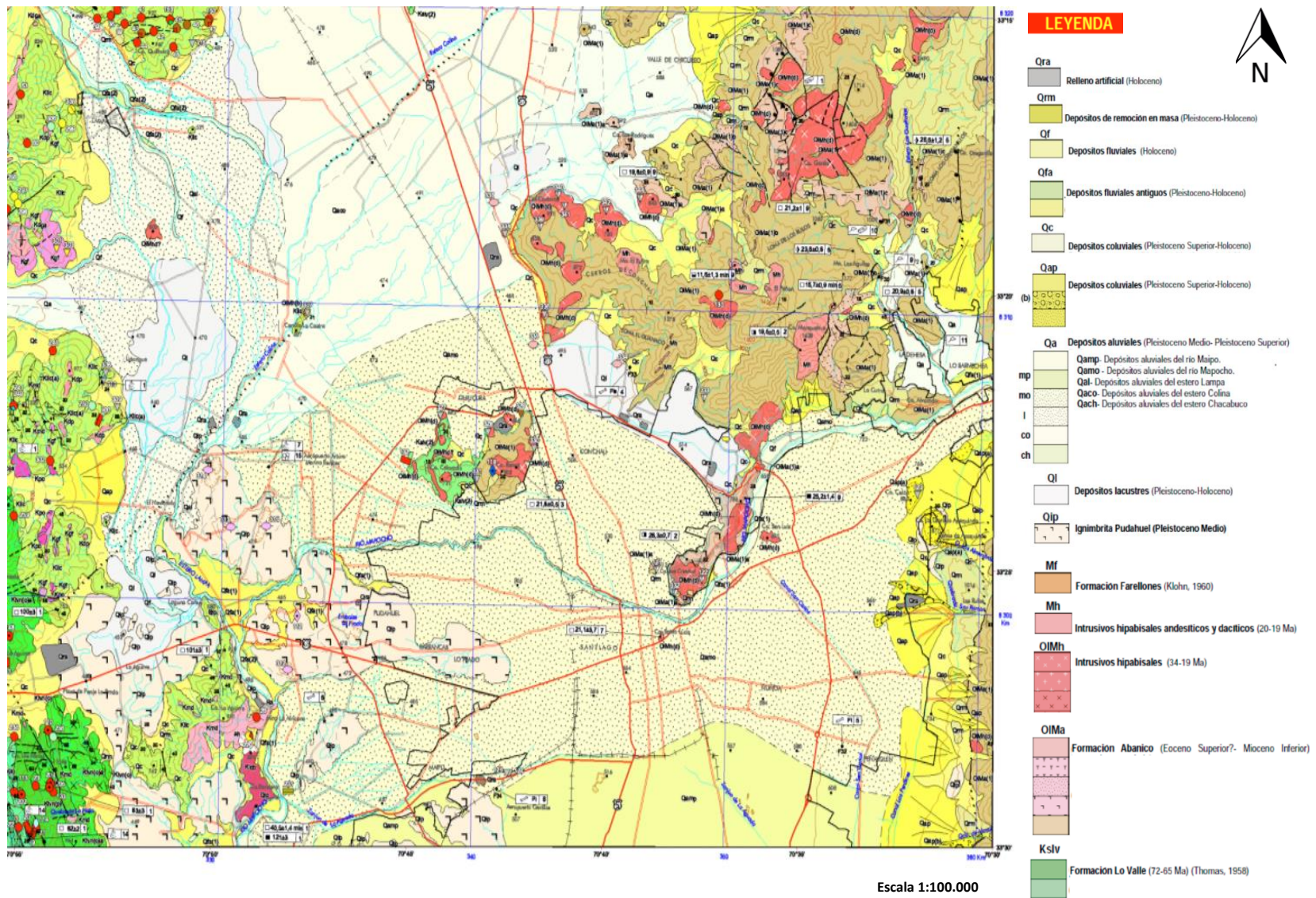


Figura 3.4: Extracto de Mapa Geológico Área Tiltil-Santiago, Región Metropolitana. Modificado de Wall et al. (1999).

3.1.3.4 Estructuras

Como rasgo esencial del área de estudio se ha reconocido desde 1950 la estructura que delimita la depresión central al oriente, hoy denominada Falla San Ramón. Brügger (1950) evidenciaba la existencia de una falla normal de disposición NS al borde del valle de Santiago sin especificar su actividad ni características. El reconocimiento de esta estructura está incluido en el Plan Regulador Metropolitano de 1960 y en los antecedentes para la construcción del Centro de Estudios Nucleares La Reina en 1970, donde se especifica que la falla estaría inactiva para producir grandes terremotos (Comisión Chilena de Energía Nuclear, 1998).

Posteriormente, Carter y Aguirre (1965) trabajaron en la provincia de Aconcagua, describiendo el valle central como un graben delimitado por fallas normales, la falla Pocuro al oriente y la falla Los Ángeles al occidente.

La idea de una estructura de carácter normal continúa en la Hoja de Santiago de Thiele (1980), y no se especifica su cinemática en estudios posteriores. No es hasta el año 2002 que Rauld, en su memoria de título, caracteriza mediante cartografía de detalle la traza de esta estructura, y encuentra evidencias de actividad y de mecanismo inverso. Estudios posteriores (Charrier et al., 2002) consideraron la FSR como el límite occidental de la cuenca extensional donde se depositaría la Formación Abanico, interpretándola como una falla invertida.

En los últimos años esta falla ha sido caracterizada como una estructura de tipo inversa y activa (Vargas et al., 2014; Armijo et al., 2010; Rauld, 2011), con vergencia al oeste, que levanta las rocas de la formación Abanico sobre los depósitos no consolidados de la cuenca de Santiago (Figura 3.5), cumpliendo además un importante rol dentro del contexto del orógeno andino bi-vergente (Armijo et al., 2010). El modelo del Cabalgamiento Andino Occidental (Figura 3.6) es un mega-sistema de tipo “fold-thrust belt”, el cual está representado por las estructuras inversas en forma de rampas y despegue de la cobertura mesozoica, y con el enraizamiento a escala cortical bajo el basamento de la cordillera Frontal en Argentina (Armijo et al., 2010).

En el estudio de Vargas et al. (2014) se demuestran evidencias de dos eventos con desplazamiento de ~5 m: un evento ocurrido entre 17-19 Ma y un último hace ~8 Ma. El estudio propone que la estructura no ha sufrido nuevas rupturas asociadas a terremotos desde hace 8.000 años, y por ende no habría evidencias en la trinchera de terremotos de la historia sísmica reciente. Sin embargo existen antecedentes para inferir que la FSR podría generar grandes terremotos como los documentados en la trinchera paleosismológica.

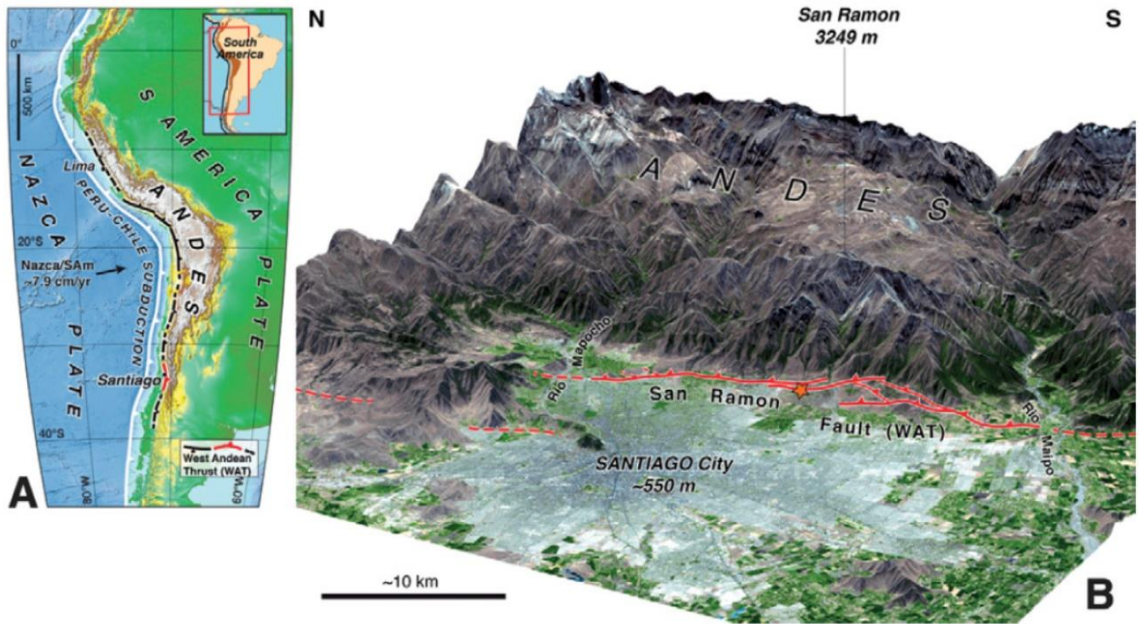


Figura 3.6: A: Extensión del West Andean thrust a escala continental en lado occidental de los Andes. B: Vista tridimensional de Santiago con Falla San Ramón. Tomado de Vargas et al. (2014).

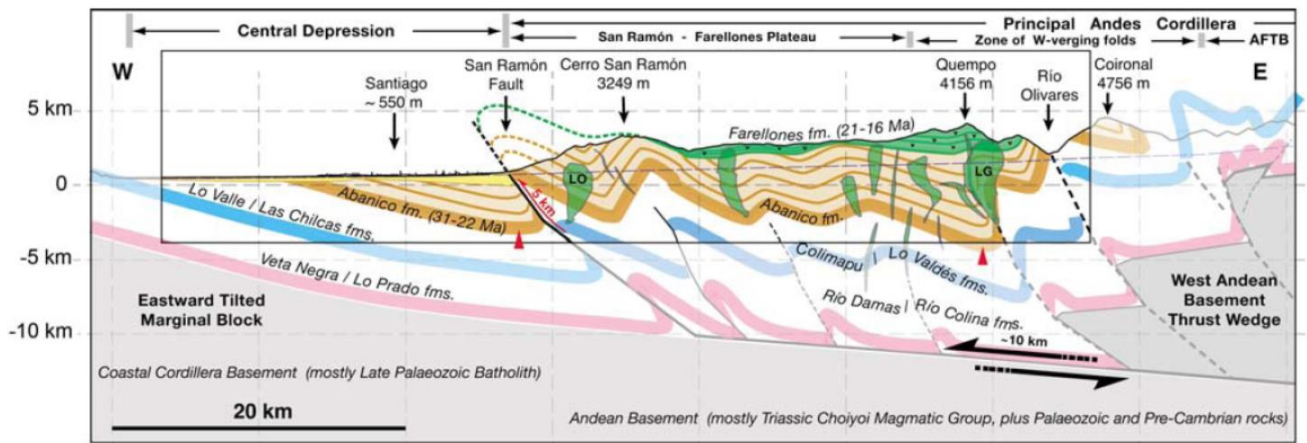


Figura 3.5: Sección estructural interpretada para la Cordillera Principal Occidental, con rampa plana con manteo al este para la falla San Ramón. Tomado de (Armijo et al., 2010).

Por otro lado, estudios contemporáneos proponen un modelo diferente para la Cordillera Principal Occidental. Farías et al. (2010) postula mediante la integración de la geología en superficie y la sismicidad, que el sistema de vergencia oeste denominado Falla San Ramón-Pocuro de orientación y prolongación norte-sur, es un *back thrust* del sistema responsable de la deformación de los Andes centrales, con un despegue manteniendo hacia el oeste, donde la FSR no tendría un rol importante dentro del acortamiento presente en la zona (Figura 3.7).

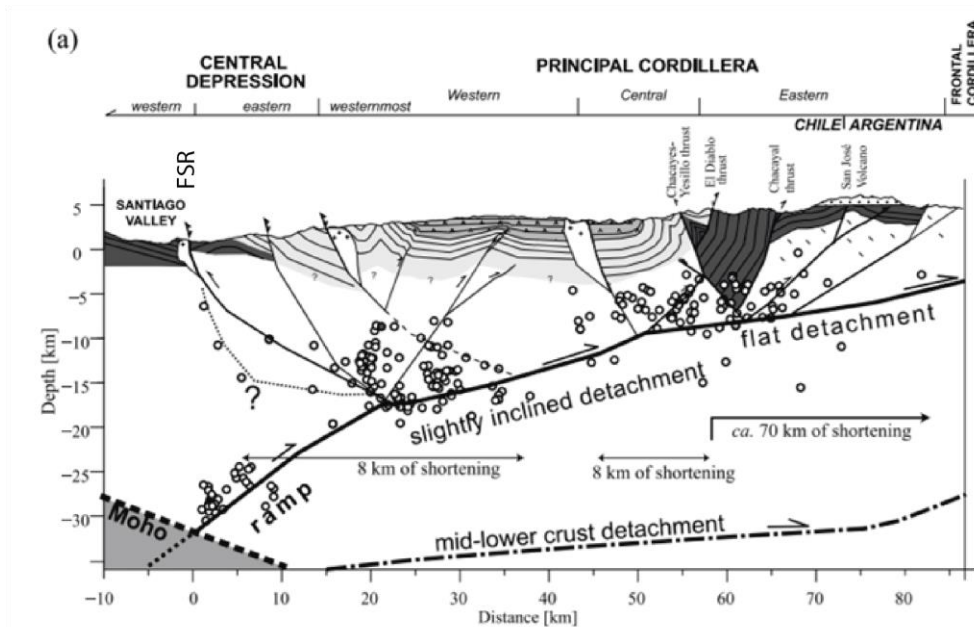


Figura 3.7: Sección estructural a la latitud del Maipo con sismicidad superficial. Modificado de Farías et al. (2010).

Respecto a la tasa de deslizamiento de la FSR, mediante estudios geomorfológicos y estructurales de las rocas y depósitos afectados por la falla, se ha podido estimar un deslizamiento promedio de 0.13 mm/año a 0.40 mm/año en los últimos miles de años (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011).

Esta falla en la actualidad está siendo estudiada y monitoreada por un convenio entre la ONEMI, la FCFM y el CSN para caracterizar la dinámica de esta estructura, buscando determinar la dimensión de la amenaza de esta falla activa. Se han instalado nuevas estaciones sísmicas en el frente cordillerano que mediante análisis inéditos del proyecto mencionado, han detectado sismicidad bajo el frente cordillerano, sin reconocerse sismicidad directamente en esta falla aún, lo que podría implicar que este bloqueada.

3.2 PELIGROS GEOLÓGICOS DE LA CIUDAD DE SANTIAGO

3.2.1 Sismicidad

La ciudad de Santiago se encuentra expuesta a la amenaza sísmica por el contexto del margen convergente que caracteriza el borde occidental de Sudamérica, como se mencionó anteriormente en el Marco Tectónico. La Región Metropolitana puede verse afectada por: megaterremotos interplaca producidos frente a la costa, terremotos intraplaca que ocurran bajo la ciudad a profundidades mayores a 90 km -los cuales son muy destructivos-, y los sismos corticales ocurridos en la corteza, a profundidades muy superficiales.

Se pueden reconocer dos bandas de sismicidad superficial con disposición longitudinal; una banda al poniente del *cluster* 4 que corresponde a la banda oeste, bajo el frente cordillerano donde se ubica la FSR, y la banda este hacia el lado oriental del *cluster* (Figura 3.8).

En la figura 3.8 se pueden distinguir cuatro clúster de sismicidad cortical que afectan a la zona central:

1. *Cluster* Santa Rosa: está conformado por sismos que poseen características sismológicas comunes (mecanismos de ruptura y localización) ubicados en profundidades de 25 a 30 km, que indican mecanismos de esfuerzos tectónicos (Rauld, 2011). Estudios recientes (Leyton et al., 2009) han expuesto sin una explicación definitiva, que esta fuente de sismicidad anómala ocurre bajo el límite dúctil de la corteza.
2. *Cluster* Tupungatito: corresponde a una actividad somera asociada al completo volcánico activo del Tupungatito. Presenta profundidades menores a los 10 kms.
3. *Cluster* Andina-Los Bronces: es un núcleo de sismicidad inducida por la actividad minera del yacimiento.
4. *Cluster* El Teniente: es también un clúster de sismicidad inducida por actividad minera en el yacimiento El Teniente de la Sexta Región.

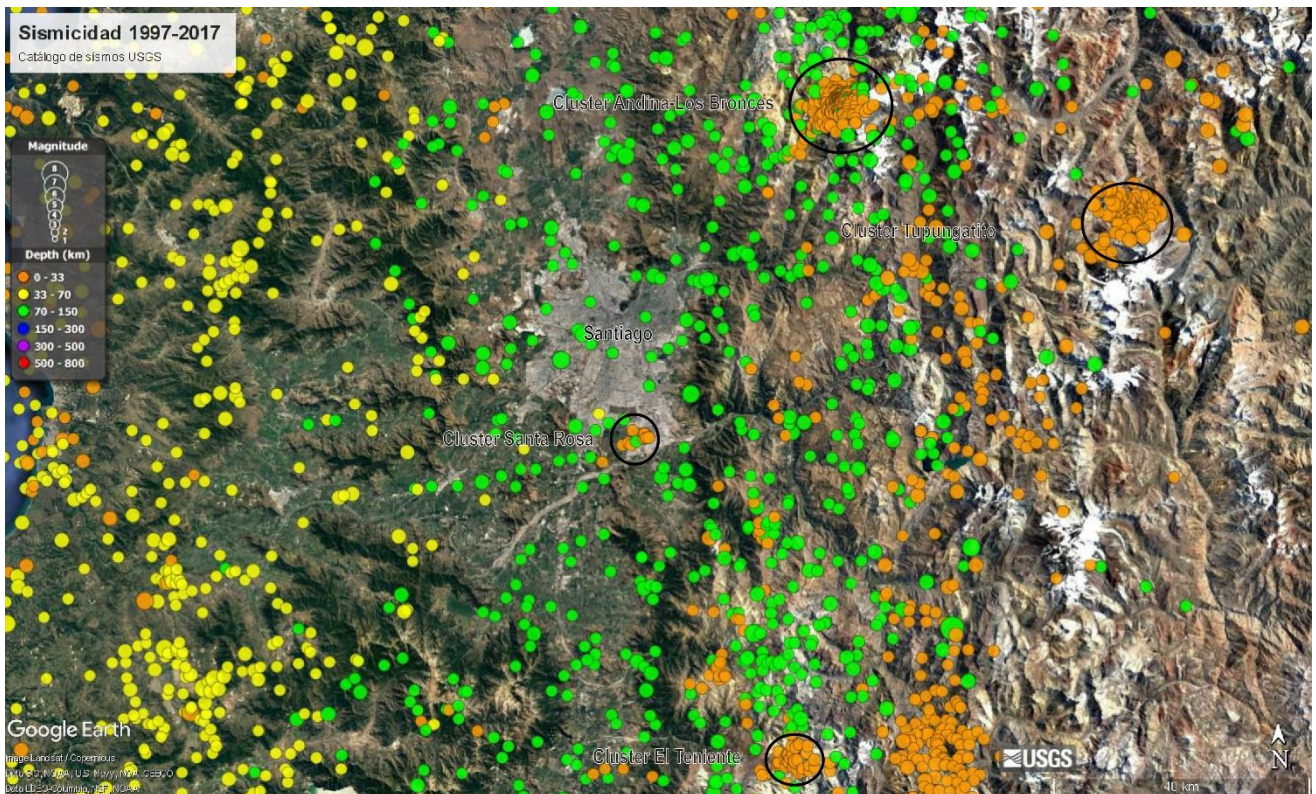


Figura 3.8: Sismos ocurridos en los últimos 20 años entre los 32.7° y 34.4° de latitud. Datos extraídos del Search Earthquake Catalog de la USGS sobre imagen satelital de Google Earth. Las elipses representan clúster de sismicidad cortical. Clúster Santa Rosa, Clúster Tupungatito, Clúster Andina-Los Bronces, y Clúster El Teniente.

Por otro lado, a lo largo de la historia se pueden destacar los siguientes grandes eventos sísmicos que han afectado a Santiago cronológicamente:

- **17 de marzo de 1575**, terremoto ocurrido posiblemente en La Ligua, con intensidades de VI a VII en Santiago.
- **13 de mayo de 1647**, objeto de estudio en esta memoria, es conocido como el “gran terremoto de Santiago” o el “terremoto del Señor de mayo”. Corresponde a una catástrofe en la capital en la que murieron cerca de 1.000 personas. Su fuente aún no es clara, pero se estima una magnitud de ~8 Mw (Lomnitz, 2004). Importantes edificios de la época fueron derribados por el movimiento sísmico. Más adelante se describen sus características en detalle.
- **8 de julio de 1730**, terremoto con tsunami en Valparaíso y daños en Santiago y la V Región. Área de daños de La Serena a Chillán.
- **19 de noviembre de 1822**, terremoto con probable epicentro en La Ligua, con daños en Santiago, Valparaíso, Quillota e Illapel. Se registró tsunami en Valparaíso pero no se reportaron daños por este último. En Santiago tuvo una intensidad de VII (Lomnitz, 2004).
- **16 de agosto de 1906**, uno de los grandes desastres del siglo pasado en la zona central. Con epicentro en Valparaíso, se estima una magnitud 8.6 (Gutenberg-Richter). Dejó 3.800 muertos y se percibió desde Tacna a Chiloé, y desde las Islas Juan Fernández a Buenos Aires. Luego de este terremoto se creó el Servicio Sismológico Nacional de la Universidad de Chile.

- **4 de septiembre de 1958**, evento de tipo cortical ocurrido en Las Melosas en el sector Cordillerano de la Región Metropolitana, provocó sólo daños en las localidades cercanas. Es un sismo provocado por fallas activas, que generaron tres eventos de magnitudes 6.9, 6.7 y 6.8 (Sepulveda et al., 2008).
- **3 de marzo de 1985**, sismo una tarde del domingo que se sintió entre la II y IX regiones de Chile, con intensidad máxima modificada de Mercalli de VIII, afectando fuertemente al sector de San Antonio y las comunas vecinas de Alhué y Melipilla. El epicentro se situó en el mar a unos 20 kms frente a Algarrobo, con magnitud 7.8 Ms y 15 kms de profundidad (ONEMI, 2009).
- **27 de febrero de 2010**, conocido como terremoto del Maule, fue un gran sismo ocurrido por el contacto de las placas Nazca y Sudamericana con magnitud 8.8 (Mw) (Farias et al., 2010), con epicentro a unos 150 kms al noroeste de Concepción y a 30 kms de profundidad. Provocó un tsunami que afectó a varias localidades costeras ya devastadas por el terremoto, entre las ciudades de Valparaíso y Valdivia (Vargas et al., 2011). El informe final de la Subsecretaría del Interior de Chile informó que fueron 525 muertos y 23 desaparecidos (2011). En Santiago tuvo una intensidad de VIII según informó el Servicio Sismológico Nacional (2010), provocando interrupción de servicios básicos y actividades, daños y colapsos de estructuras.

Finalmente, como ya ha sido mencionado, la FSR representa un peligro potencial para Santiago. A continuación se muestra un mapa de peligro sísmico, en función de la aceleración máxima en la horizontal (PGA), asociado a un posible evento generado por la estructura (Figura 3.9), generado en el estudio “Riesgo y modificación PRMS Falla San Ramón” (SEREMI & MINVU, 2012), realizado por la Universidad de Chile.

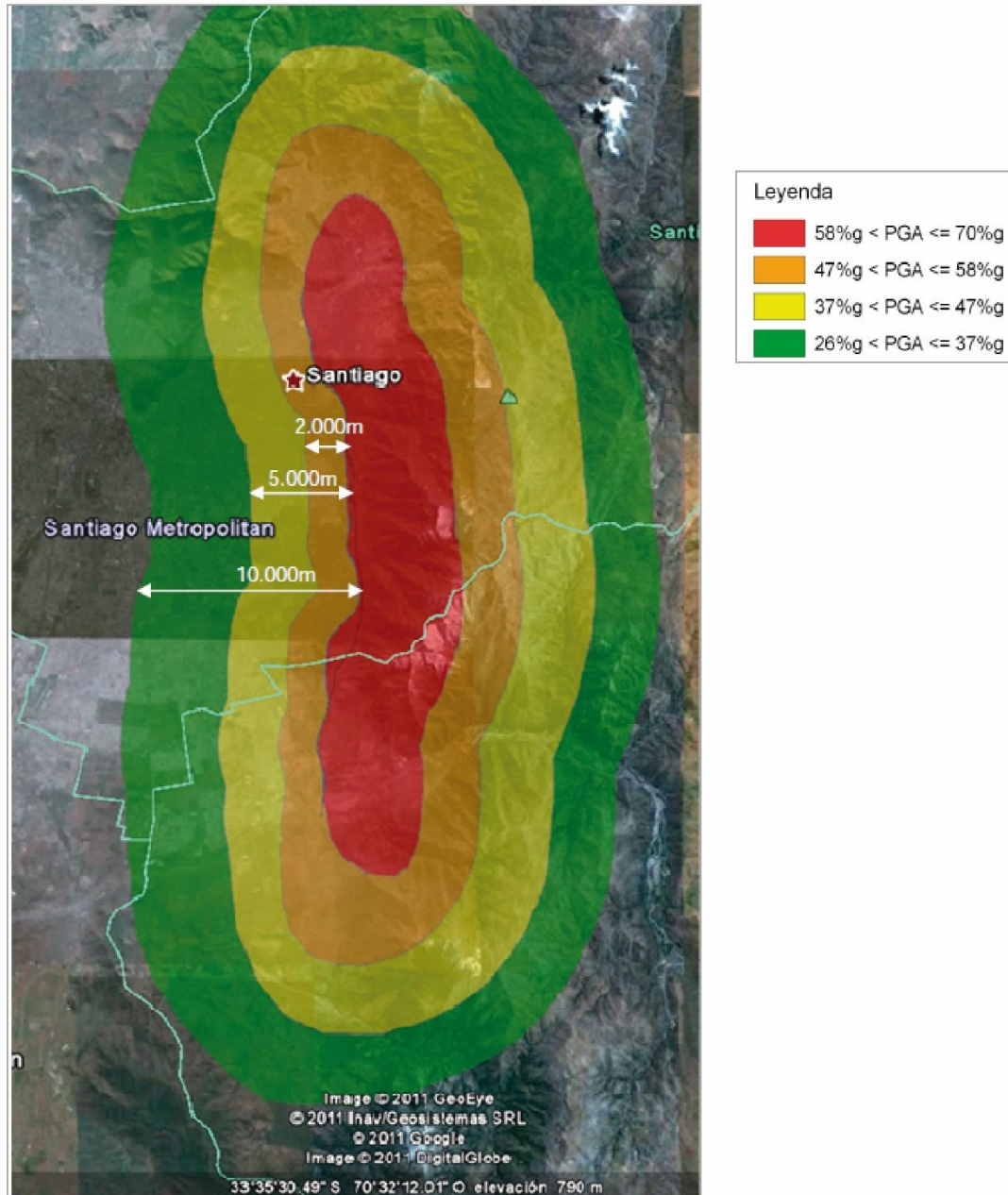


Figura 3.9: Valores de aceleración horizontal máxima esperados producto del terremoto máximo creíble Mw 7.4 en la Falla San Ramón. Tomado de "Estudio de riesgo y modificación PRMS Falla San Ramón", (Seremi MINVU, 2012).

3.2.2 *Volcanismo*

La ciudad de Santiago presenta un riesgo volcánico relativamente bajo en comparación a otras regiones del mundo. En la región se ubican tres volcanes de carácter activo:

1. Volcán Tupungatito: ubicado en la comuna de San José de Maipo a 5.603 m s.n.m., es un estratovolcán, con riesgo moderado y nivel de alerta verde, según Sernageomin. Su última actividad data de 1986, y su última erupción mayor entre 1959-1960.
2. Complejo Volcánico San José: ubicado en la comuna de San José de Maipo a 5856 m s.n.m., su última actividad fue en 1960 y se encuentra bajo la clasificación de riesgo moderado según el Sernageomin. Actualmente se encuentra en nivel de alerta verde.
3. Complejo Eruptivo Maipo-Caldera Diamante: ubicado en San José de Maipo a 5.264 m s.n.m. El centro eruptivo posee un registro histórico incierto y carece de manifestaciones fumarólicas o hidrotermales, por lo que no se encuentra dentro del catálogo del Sernageomin.

3.2.3 *Inundaciones y remociones en masa*

En esta categoría se encuentran las inundaciones por desbordes de cauces, asociadas a la red hídrica; y en remociones se consideran caídas de rocas, flujos, deslizamientos y reptación.

Las inundaciones se producen cuando un cauce sobrepasa su nivel normal de escurrimiento, y las aguas ocupan terrenos aledaños al cauce (planicie de inundación). El origen de las inundaciones puede estar dado por: derretimiento de nieves, crecidas estacionales, fallas de control hidráulico, crecidas inducidas por deslizamientos, lahares u otros fenómenos en aguas superficiales, inundaciones por obstrucciones de cauces superficiales provocadas por derrumbes, flujos de detritos, etc.

A lo largo de la historia de Santiago, numerosas inundaciones del Río Mapocho han quedado en la memoria de los habitantes. Destacan en las últimas décadas los temporales de 1982 y 1987.

- Las precipitaciones de junio de 1982 afectaron desde la IV a la VII región, donde cayeron 123.6 mm de agua en 96 horas. Se interrumpió el tránsito ferroviario y carretero al sur de Chile. Se cortaron servicios básicos y la red telefónica. Nueve pasos bajo nivel se inundaron y se desbordó el río Mapocho en varios sectores de la RM, además se salieron de sus cauces el canal San Carlos y el Sanjón de la Aguada. Se contabilizaron 10.137 personas albergadas y 15.272 damnificados (ONEMI, 1991).
- Para el año 1984, precipitaciones y nevazones afectaron en julio desde la II a la X regiones, con un total de 51.007 damnificados (ONEMI, 1991).
- En abril, mayo, junio y noviembre de 1986, precipitaciones afectaron desde la IV a la VIII regiones del país. Ocurrieron cortes de suministro de agua potable, desbordes de los ríos Mapocho y Maipo, y se declararon zonas de catástrofe a 18 comunas de la RM. El total de damnificados fue de 24.671 (ONEMI, 1991).
- En 1987 dos sistemas frontales azotaron a la RM: el primero se inició el 9 de julio, afectando desde la V a la X región, y el segundo se inició el 18 del mismo mes, afectando desde la II a la X región. El río Mapocho se desbordó y dejó un total de 74.246 damnificados y 10.137 albergados (ONEMI, 1991).

Por otro lado, se tienen los procesos de remoción en masa, definidos como un movimiento descendente de un volumen de material constituido por roca, suelo o por ambos (Cruden, 1991). Es un movimiento controlado por la fuerza de gravedad. Dentro de los tipos de remociones según Varnes (1978), existen: desprendimientos o caídas, deslizamientos, volcamientos, flujos y avalanchas, y propagación lateral.

Los factores condicionantes son: la geomorfología (pendiente ladera, morfología ladera, altura, orientación); la geología (tipo roca o suelo, meteorización, hidrogeología, estructuras, ambiente tectónico, historia geológica); clima y vegetación (cantidad de lluvia previa, intensidad y frecuencia de precipitaciones, estacionalidad, cambios de temperaturas, vegetación); y la acción antrópica (cambios en las propiedades de los materiales y estado de stress, cambios de niveles de agua y capacidad de infiltración, cambios en la geometría de las laderas, deforestación, acciones erosivas, formación de depósitos susceptibles de moverse). Los agentes desencadenantes son: precipitaciones, sismos, erupciones volcánicas e intervención antrópica.

En la historia reciente de la ciudad capital destaca el aluvión de La Florida del 3 de mayo de 1993, que dejó 26 muertos, 8 desaparecidos, 32.646 damnificados, 5.610 casas dañadas y 307 casas destruidas (ONEMI, 2012). Este evento se desencadenó por fuertes temporales que afectaron desde la IV a la IX región. La principal quebrada afectada fue la de Macul, que debido a su alta pendiente favorece la caída de sedimentos. El nivel de daños se vio aumentado por la urbanización que provocó deforestación, compactación e impermeabilización del suelo.

Durante los últimos años numerosos aluviones han afectado el sector cordillerano de Santiago, según el Primer Catastro Nacional de Desastres Nacionales (1980-2015) del SERNAGEOMIN:

- 12 de noviembre del 2004, aluvión en quebrada Lo Cañas.
- 26 y 27 de agosto de 2005, inundaciones por desborde de cauces en el sector oriente de la Región Metropolitana y en sectores bajos de las quebradas Lo Cañas, Macul y San Ramón, y curso medio del río Mapocho.
- 19 de junio de 2010, evento de caída de rocas en comuna de Lo Barnechea.
- 12 y 13 de junio de 2012, deslizamientos de suelo y roca en el sector de Avenida El Carmen, en San José de Maipo.
- 18 de junio de 2012, caída de rocas en el sector El Ingenio, corte de la ruta G-25.
- 21 de enero y 8 de febrero de 2013, corte de agua en el Gran Santiago debido a alto contenido de sedimentos, causado por flujo de detrito en el Cajón del río Maipo, que en 2 oportunidades por 2 días cada vez, bloquearon varios caminos.
- 12 y 13 de julio de 2015, caídas de roca en el sector Los Maitenes, comuna de San José de Maipo, y Lo Barnechea.
- 6 de agosto de 2015, caídas de rocas en la comuna de Padre Hurtado y en San José de Maipo. Desborde del canal Santa Marta en Maipú y anegamiento de viviendas.
- 25 y 26 de febrero del 2017, debido a temporales que generaron flujos de detritos en la zona montañosa de la Región Metropolitana, en el cajón del Maipo aluviones provocaron desaparecidos, interrupciones de caminos, aislamiento y cortes de agua que afectaron a 30 comunas de la capital.
- 20 de abril de 2017, corte de suministro de agua potable en gran parte de la Región Metropolitana, ONEMI decretó alerta amarilla. Lluvias ocasionan desbordes del Estero San José en la comuna de San José de Maipo.

Capítulo 4 MARCO METODOLÓGICO

Para llevar a cabo cada uno de los objetivos planteados: determinar evolución historiográfica de la ocupación urbana de Santiago hacia la FSR; determinar la relación entre los escarpes geomorfológicos de la FSR y el asentamiento de Santiago; y evaluar la posible relación del terremoto de mayo de 1647 con la FSR; se desarrollaron distintas metodologías. A continuación, se describen con detalle en función de los tres grandes objetivos y del contenido de este trabajo.

4.1 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

Primeramente, se buscó contar con un conocimiento acabado respecto a la FSR, la geología de la cuenca de Santiago y sus alrededores, además de elementos conceptuales como límites urbanos, planificación urbana, peligro y exposición. Es por ello que la parte inicial del trabajo comprendió la identificación, selección, análisis, síntesis y recopilación de fuentes primarias y secundarias, como libros, cartas, antecedentes bibliográficos, publicaciones científicas y gubernamentales, entre otras.

Las principales fuentes utilizadas para la definición de peligro, vulnerabilidad y riesgo fueron:

- Ingeniería Geológica, Luis González de Vallejo, Pearson Educación, Madrid, 2002.
- Elementos Conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas siconaturales. Cuatro experiencias en América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Lom Ediciones, Santiago de Chile, 2005.
- Vivir con el riesgo: Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD), Ginebra 2004.
- Información geográfica y riesgos naturales. Ana María Camarasa, Javiera Salas y Emilio Chuvieco. Servicio de Estudios BBVA, 2001.
- La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. Omar Cardona, 2001.

Para las especificaciones y definiciones legales de los instrumentos de planificación territorial se utilizó:

- Planificación Urbana, Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), sitio web: www.minvu.cl.

En cuanto a la información geológica de la cuenca de Santiago y de la FSR, las fuentes correspondientes fueron:

- The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile, Rolando Armijo y otros, Tectonics, 2010.
- Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago oriente, entre el Río Mapocho y la Quebrada de Macul, Memoria para optar al Título de Geólogo de Rodrigo Rauld, Universidad de Chile, 2002.
- Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la Falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S), Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Geológicas de Rodrigo Rauld, Universidad de Chile, 2011.

- Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes, Gabriel Vargas, y otros, *Geology*, 2014.
- Seismic zonation of the Santiago basin, Chile, Felipe Leyton y otros, Santiago, 2011.

4.2 EVOLUCIÓN HISTORIOGRÁFICA DE LA OCUPACIÓN URBANA

En primer lugar se realizó una compilación de información histórica de Santiago, cuya fuente principal fue el libro “Historia General de Chile” de Diego Barros Arana, 1889. Este texto permitió detallar las condiciones en las que se desarrolló y creció la capital de Chile, incluyendo en este trabajo características como la población, avances en obras públicas, legislación, entre otros.

Para determinar la evolución de los límites urbanos fue necesario compilar el material historiográfico disponible, como mapas y planos de la capital. Estos fueron descargados desde el sitio Archivo Visual de Santiago (www.archivovisual.cl), el cual cuenta con mapas, planos y documentos de Santiago y su historia. Los archivos se encontraban disponibles en formato imagen (.jpg) pero sin referencia geoespacial.

De todos los mapas e imágenes utilizadas los años 1960 y 1994 destacan como años importantes pues marcan hitos dentro de la planificación territorial de Santiago, con la creación del PRMS en 1960 y la modificación de 1994, y la promulgación del decreto supremo de 1979 entre estas fechas.

A los mapas compilados desde el año 1552 hasta el 1960 se les asoció un sistema de referencia espacial mediante el software ArcGIS 10.3. Todas las imágenes trabajadas como raster por ArcMAP fueron operadas por la herramienta *Georeferencing*, y mediante *Add control points* se añadían los puntos que debían coincidir entre el Basemap Streets de ArcGIS y las calles ilustradas en el mapa correspondiente. Lo anterior se repetía con cuatro puntos, hasta que la imagen georreferenciada se ajustara con el Basemap Street bajo el sistema de proyección de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 19S.

Para algunos casos, sobre todo en el de los mapas más antiguos, se tuvo que realizar una búsqueda histórica de nombres de calles, ya que los que aparecían ilustrados en las imágenes no correspondían con nombres existentes en la actualidad. Para lo anterior, se utilizó el texto disponible en la web de memoria chilena de la Biblioteca Nacional de Chile (www.memoriachilena.cl): *Santiago de Chile, Origen del nombre de sus calles*, de Luis Thayer Ojeda, Santiago 1904.

Con los mapas georreferenciados, se continuó con la obtención de imágenes satelitales proporcionadas por el software de uso libre *Google Earth*, que cuenta con una base de datos histórica de imágenes de Santiago desde 1984 al presente. A medida que la fecha de los datos se acerca a la actualidad, se dispone de mayor cantidad de imágenes satelitales (aumenta la frecuencia de datos) y con mejor calidad a una menor escala. En este mismo programa se identificaron y trazaron los límites de urbanización de la ciudad de Santiago en la Región Metropolitana, mediante la herramienta “Añadir polígono” sobre imágenes del año 1985, 1994 y 2017.

Para demarcar los límites urbanísticos de la ciudad, debido al poco detalle en las imágenes de los años 80s, se utilizó como criterio la densificación de la ocupación, donde un característico color grisáceo permite distinguir entre sectores construidos y los que aún no lo son, es decir, la también denominada “*built-up area*”. Este concepto representa el área construida o edificada sin distinguir la caracterización administrativa o legal de los conceptos urbanos y rurales. Se utilizó este criterio pues el límite urbano, correspondiente a la limitación de la expansión urbana, debiese contener la “*built-up área*” en el caso de que este límite se respete. Bajo esas condiciones o para el caso contrario, la “*built-up área*” es la que representa la expansión real de la ciudad.

Es importante mencionar que para la imagen de 1985, que no tiene una buena resolución a escala de detalle, existen zonas en que ya se observaba un débil avance gris entre áreas verdes que no fue considerado si no era lo suficientemente denso, debido a la dificultad que constituía distinguir si eran edificaciones o lugares sin vegetación que mostraban color grisáceo. Por el contrario, en la imagen satelital de 2017 sí se consideraron sectores como Calera de Tango, San Bernardo, Buin, Lampa, Peñaflor, Padre Hurtado, Talagante, entre otros; que mostraban edificaciones (principalmente condominios habitacionales) con áreas verdes entre las construcciones. Lo anterior ocurre por la causa opuesta: debido al buen detalle de las imágenes se podían distinguir con claridad al disminuir la escala de trabajo.

Posteriormente, los polígonos creados en *Google Earth* de los años 1985, 1994 y 2017, fueron guardados con extensión *.kml*. En ArcGIS estos archivos se convirtieron en shapfiles mediante la herramienta *KML to Layer* en *Conversion Tools* dentro del *ArcToolBox*.

El resto de los mapas y planos históricos georreferenciados fueron utilizados para la creación de polígonos usando ArcGIS, se crearon shapfiles para cada año (1552, 1600, 1841, 1895 y 1960) y fueron editados para crear figuras que representaran los límites urbanos correspondientes. En el caso de los mapas y planos, el límite se realizó incluyendo todas las calles ilustradas, a menos que indicaran que correspondía a potreros o llanos sin presencia de construcciones.

Seguidamente realizadas las etapas descritas mediante el uso de ArcGIS 10.3, se crearon mapas de los límites urbanos históricos de Santiago, para cada uno de los planos georreferenciados (1552, 1600, 1841, 1895 y 1960). En *Google Earth* se realizaron los mapas para las imágenes satelitales (1985, 1994 y 2017).

Finalmente se generaron mapas de evolución de los límites urbanísticos de Santiago en ArcGIS, con la superposición de los polígonos creados para cada año desde 1552, 1600, 1841, 1895, 1960, 1985, 1994, hasta el 2017, cargados sobre un *Hillshade* de toda la región, a escala 1:250.000. Se realizaron también dos figuras con escala de mayor detalle del frente cordillerano de Santiago entre el río Mapocho y Maipo, con la distinción de las comunas que aparecen. Una de ellas muy similar a la de evolución en ArcGIS usando como base el *Hillshade* para mostrar el avance de 1960, 1985, 1994 y 2017 a escala 1:125.000; y otra en *Google Earth* que permite apreciar con relieve 3D como los límites se acercan cada vez más al frente de la cordillera de los Andes.

4.3 GEOMORFOLOGÍA DEL PIEDEMONTTE

Para lograr determinar la relación del asentamiento de la ciudad sobre las unidades geomorfológicas que atraviesa la FSR primeramente se consideraron las fuentes bibliográficas que describen el tipo de geomorfología característico del frente cordillerano.

Se utilizó específicamente la base de datos de la tesis doctoral de Rodrigo Rauld: “Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la Falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S), 2011” de la Universidad de Chile, que contiene el mapeo de los abanicos aluviales que se superponen en el piedemonte y la traza de la Falla San Ramón.

La labor que se describe a continuación fue realizada por Loreto Valdivia y Tamara Aránguiz como trabajo del curso electivo Proyecto I de la carrera de Geología de la Universidad de Chile:

A partir del modelo digital de elevación (DEM) de la zona de estudio, del proyecto en ArcGIS de Rauld 2011 y de 246 perfiles topográficos de orientación este-oeste espaciados cada 100 metros a lo largo de la traza de la Falla San Ramón, se identificaron los segmentos sin información de los escarpes, con el fin de caracterizar con mayor precisión el frente cordillerano de Santiago.

Utilizando el software QGIS se extrajeron los datos asociados a perfiles topográficos de orientación este-oeste espaciados entre 30 y 50 metros. Luego, los datos de coordenada norte, este y altura de cada perfil fueron exportados a Excel, donde se graficó la altura en función de la coordenada este.

En Excel se analizaron cada uno de los perfiles topográficos, reconociendo saltos verticales, correspondientes a escarpes de la falla. Fueron registrados los datos de techo y base y sus coordenadas. La identificación realizada fue correlacionada con el mapeo de la traza de la falla.

Posteriormente, para cuantificar los escarpes se calculó la diferencia de altura entre las bases y techos de cada uno de los saltos identificados. El trabajo se basó en la clasificación realizada por Rauld (2011) en su tesis doctoral.

Se generó una nueva base de datos para los escarpes identificados y se agregaron al proyecto ArcGIS de Rauld, generando la visualización de la magnitud de cada uno de ellos a lo largo de la falla y su correlación con el mapeo de ella.

El trabajo continuó durante el desarrollo de esta memoria, revisando la coherencia de los datos y eliminando manualmente los escarpes que se salían de la tendencia en ArcGIS. Algunos de los escarpes que fueron adicionados como producto del proyecto mencionado fueron visitados en terreno para comprobar su existencia. El desarrollo del trabajo de campo se describe en la sección de este capítulo Trabajo en Terreno.

Otros archivos de la base de datos de Rauld se emplearon para generar figuras en ArcGIS que cruzan la geomorfología del piedemonte, los escarpes y la traza de la falla, y la evolución de

los límites urbanos de Santiago sobre un *Hillshade*, es decir, una representación 3D de la superficie en escala de grises.

4.4 TERREMOTO DEL 13 DE MAYO DE 1647

Buscando re-evaluar la posible relación del terremoto de mayo de 1647 con la Falla San Ramón, el proceso se inició con la búsqueda y recopilación de documentos históricos del siglo XVII y de compilaciones realizadas por historiadores del siglo XIX, XX y XXI en relación a este evento. En este escenario las principales fuentes fueron:

- Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile, Fray Gaspar de Villarreal (1647).
- Carta de la Real Audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647, Los Oidores (1648).
- Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia General de Chile IV, Diego Barros Arana, Santiago (1889).
- El terremoto del 13 de mayo de 1647, Miguel Luis Amunátegui, Santiago (1882).
- Historia social y crítica de la ciudad de Santiago 1541-1868, Benjamín Vicuña Mackenna, Santiago (1924).

Luego de recopilar la información histórica y directa del terremoto se indagaron y compilaron las fuentes secundarias, estudios recientes en torno al terremoto de Mayo de 1647 y sus posibles causas. Para este caso las fuentes fueron:

- Major Earthquakes and Tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955, Cinna Lomnitz, Geologische Rundschau, 1970.
- Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960, Cinna Lomnitz, Seismological Research Letters, 2004.
- The Large Chilean Historical Earthquakes of 1647, 1657, 1730, and 1751 from Contemporary Documents, Agustín Udías y otros, Bulletin of the Seismological Society of America, 2012.
- El terremoto de 1647 de Chile central como un evento intraplaca: ¿otra amenaza para Chile metropolitano? Marco Cisternas, Revista de Geografía Norte Grande, 2012.
- Entre Aporías Espaciales y Sentidos Náufragos: El terremoto de 1647 como catalizador de percepciones y asimilaciones históricas, Mauricio Onneto, Nuevo Mundo Mundos Nuevos, 2007.

Esta información fue seleccionada para posteriormente ser interpretada. Finalmente, otros estudios sismológicos ayudaron en la discusión respecto a la posible relación entre la FSR y el terremoto del 13 de mayo de 1647.

Capítulo 5 LÍMITES URBANOS

5.1 SANTIAGO COLONIAL (1500-1800)

La ciudad de Santiago, capital de Chile, fue fundada con este nombre el 12 de Febrero de 1541. Este es uno de los hitos más importantes del periodo de colonización española. Sin embargo, registros arqueológicos demuestran que los primeros asentamientos en este territorio son mucho más antiguos. Algunos investigadores indican que los grupos que comenzaron a habitar la cuenca correspondían a nómades cazadores-recolectores cerca del 10.000 a.C, que transitaban del litoral hacia los sectores precordilleranos en busca de guanacos (De Ramón, 2000).

El territorio continuó siendo habitado por distintos grupos que evolucionaron a comunidades sedentarias, las cuales desarrollaron sistemas agrícolas cerca del río Mapocho hacia el año 800, como lo indican los hallazgos arqueológicos.

Registros por parte de los españoles demuestran que al momento de la llegada de Pedro de Valdivia y Diego de Almagro, el Valle del Mapocho era habitado por indígenas en el sector de la Chimba, que indicaban que al sur del Mapocho los Incas ya habían hecho una población (Stehberg & Sotomayor, 2012).

Lo anterior demuestra el interés particular que ofrecía la cuenca de Santiago, con un agradable clima que permitía el desarrollo de la agricultura en sus planicies de tierras fértiles, alimentada por los ríos de agua pura que provenían de los deshielos cordilleranos, además de las ventajas geográficas y políticas que permitían defender el territorio y generar independencia del virreinato de Perú (por la distancia).

El trazado inicial de la ciudad contaba con una Plaza Mayor al estilo español, una catedral y otros edificios importantes en torno a ella. Su forma de tablero de ajedrez fue realizada por Pedro de Gamboa, arquitecto español que vino junto a Pedro de Valdivia. A medida que la población fue aumentando, la ciudad se fue expandiendo hacia las cuerdas contiguas, limitadas en un principio por el Mapocho al norte y al sur por la acequia que pasaba por la cañada. Fue en 1552 que el rey de España reconoció el funcionamiento de las instituciones coloniales y concedió a Santiago el título de ciudad y un escudo de armas.

La primera catedral en piedra se inició el 1561 y la iglesia de San Francisco en 1572, que se inauguraron 26 y 46 años más tarde, respectivamente. En los 1580 ya habían sido ocupadas las 126 cuerdas diseñadas por Gamboa (Municipalidad de Santiago, 2010).

En 1575 la ciudad fue destruida por un terremoto, lo que se repitió en 1647, objeto de estudio en esta memoria, tras lo que se planteó trasladar la capital a Quillota (Municipalidad de Santiago, 2010). Los reiterados sismos continuaron y en el siglo XVIII destaca el del 8 de julio de 1730.

A pesar de los daños periódicos, la ciudad mantuvo su crecimiento, y con los años se fue transformando en capital, aumentando también los crímenes, bandidos y prostitución. Durante el siglo XVII la cantidad de indígenas disminuyó en gran medida, como lo destacaban los oidores de la época. Además el aspecto de la ciudad había adquirido un nivel medio de embellecimiento,

con un crecimiento lento de sus habitantes (Vicuña Mackenna, 1869). Como cuenta Vicuña Mackenna, la población en el siglo XVII no pasaba los seiscientos vecinos.

Hacia el siglo XVIII, la población privilegiada seguía habitando los alrededores de la Plaza Mayor y sufría cada vez que el Mapocho se desbordaba. Se señala que la ciudad tenía tres leguas de circunferencia y tres mil habitantes españoles hacia el 1717 (Vicuña Mackenna, 1869). En la plazuela de la Merced vivió el corregidor Luis Manuel de Zañartu, considerado el más rico propietario del norte del Mapocho. Su obra más emblemática correspondió a la construcción del Puente de Calicanto, inaugurado en 1780, el cual unía la Chimba con el centro de la ciudad. Además, inició las construcciones de los tajamares para evitar los desbordes del Mapocho. El Marqués de Obando continuó los trabajos del canal de Maipo iniciado por sus antecesores. En mayo de 1788 llegaba a Santiago Ambrosio O'Higgins como presidente electo por la Corte de Madrid. En su gobierno fue que se realizó el camino de Valparaíso, obra de gran magnitud, además de los tajamares (Vicuña Mackenna, 1869).

Fue bajo esta evolución que Chile se aprontaba al periodo de la República, y el siglo XIX comenzaba a gestar los procesos revolucionarios en América.

Se muestra a continuación, un mapa de 1552 que ilustra a Santiago en los inicios de su fundación (Figura 5.1) y el mapa de Santiago para 1600, el cual indica el desarrollo que lograba la capital en ~60 años de crecimiento (Figura 5.2).

En la Figura 5.3, que reúne los límites de urbanización para 1552 y 16000, se puede notar como la ciudad se extendía “lateralmente” hacia el oeste y este, limitada aún por el río Mapocho al norte y la acequia que pasaba por la Cañada al sur. Estos correspondían a límites naturales que dificultaban el crecimiento, los que fueron siendo superados solo con la ejecución de obras civiles, las cuales permitieron la expansión al norte y al sur de las redes hidrográficas.

Para ambos periodos reflejados en los mapas, la ciudad se encontraba emplazada solo sobre los depósitos aluviales y fluviales del Río Mapocho, ambas unidades correspondientes a sedimentos no consolidados.

Sobre la respuesta sísmica de estas unidades Leyton et al. (2011) indica que estos suelos sufrieron las menores intensidades para el terremoto del Maule (27F) en la cuenca de Santiago, por tanto presentan un menor efecto de sitio frente a un evento sísmico.

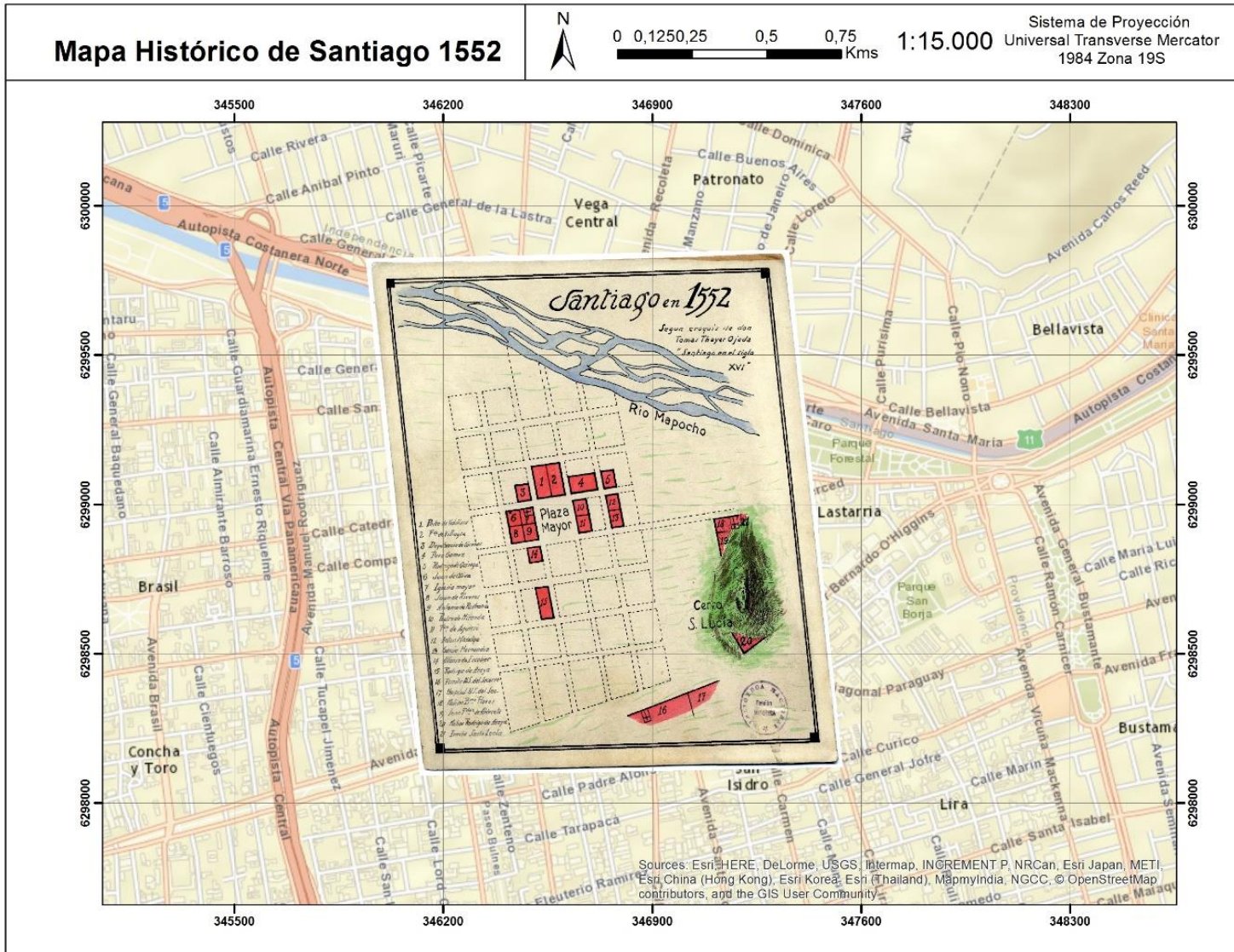


Figura 5.1: Mapa Histórico de Santiago en 1552. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Tomas Thayer Ojeda "Santiago en el siglo XVI".

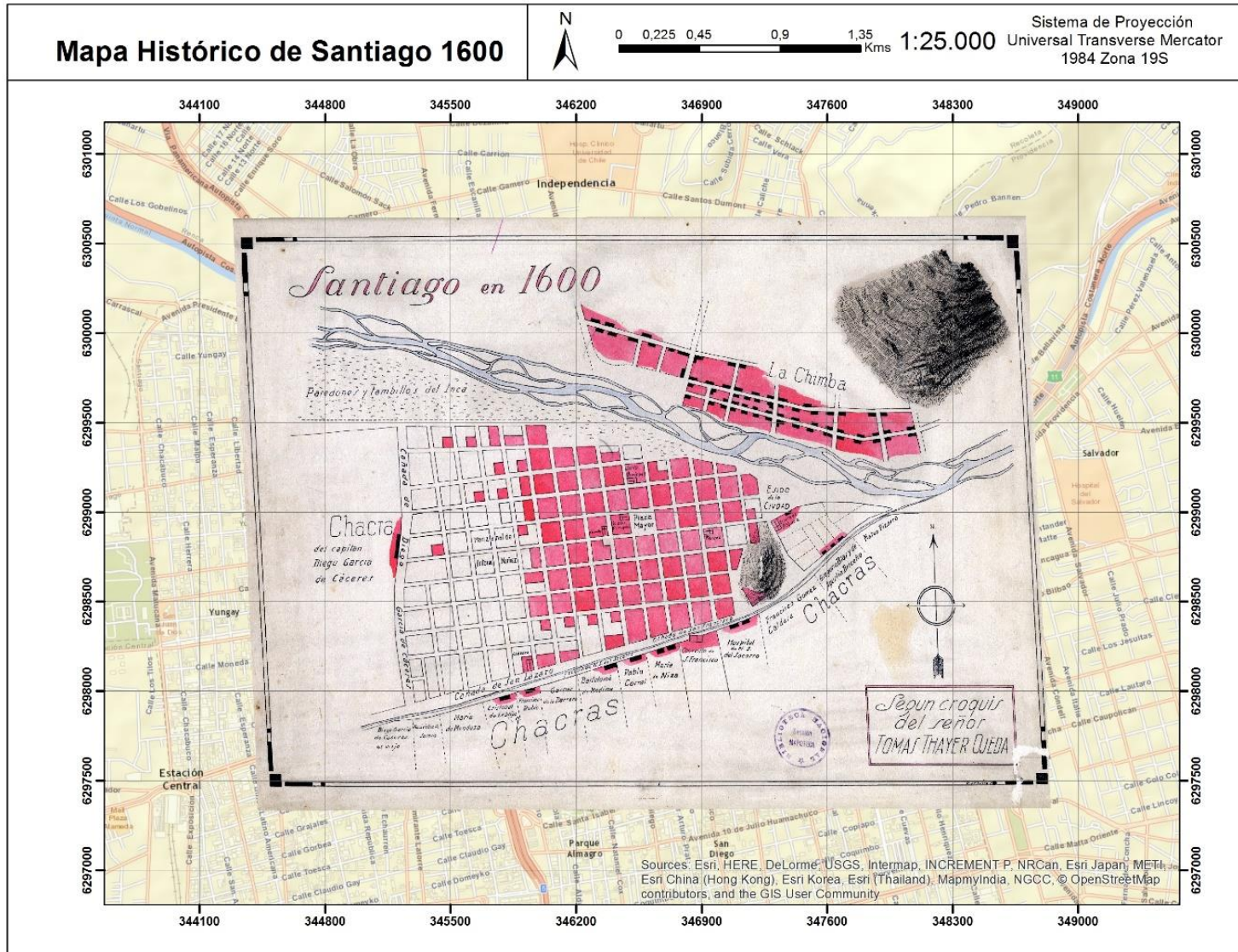


Figura 5.2: Mapa Histórico de Santiago en 1600. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Tomas Thayer Ojeda.

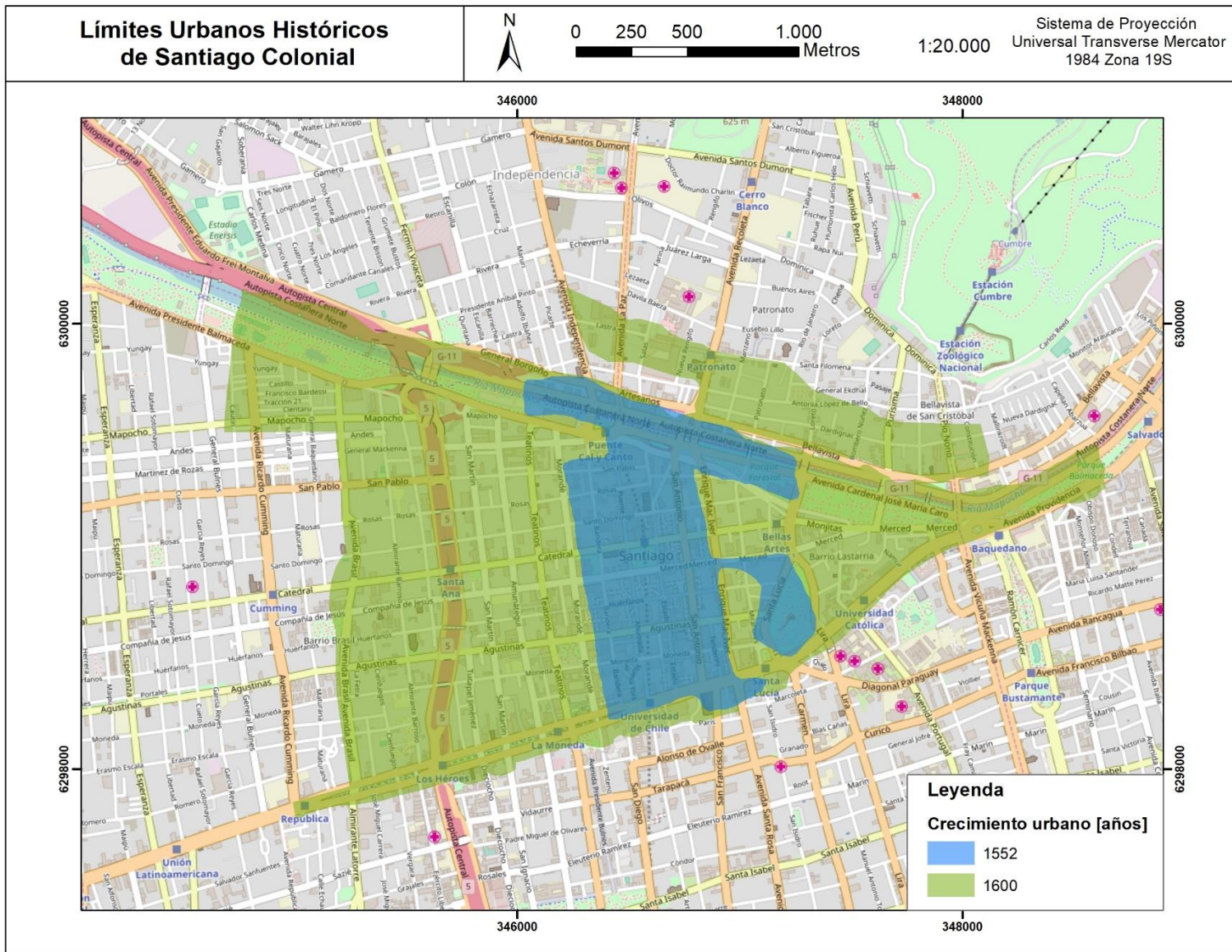


Figura 5.3: Límites urbanos históricos de Santiago Colonial, años 1552 y 1600. Elaborado en ArcGIS 10.

5.2 SANTIAGO DE LA REPÚBLICA (1800-1900)

En los inicios de la Patria Vieja de Chile, se estimaba una población nacional de 877.148 habitantes para el 1812 (Thayer Ojeda & Miranda, 1906). Según un recuento realizado en el gobierno de Muñoz de Guzmán (1802-1808) Santiago tenía 62 calles, 179 cuadras, 2.169 casas y 809 ranchos, y era la única ciudad del país que había adquirido relativa importancia (Leon Echaiz, 1975).

Ya en los primeros años de la República de Chile (1817-1826) la ciudad de Santiago tuvo un promedio de 40.000 habitantes. Fue en este periodo que Bernardo O'Higgins decide otorgarle un rol urbano a la Alameda, pasando de ser un depósito de basura a un paseo público (Leon Echaiz, 1975). Durante estos años el sector sur comenzó a ser utilizado para plantaciones agrícolas que se beneficiaron con la construcción del canal San Carlos; por otro lado, en el sector de la Chimba fueron comercializadas las tierras iniciándose la urbanización de aquella extensión. El amplio sector denominado "pago de Ñuñoa", que comprendía el terreno entre la ciudad de Santiago y la cordillera de los Andes, era utilizado por chacras, viñedos, arboledas frutales y crianza de ganado. La existencia de pequeñas aldeas coloniales de Ñuñoa, Vitacura, Tobalaba, Macul y Apoquindo continuaba y se expandía lentamente (Leon Echaiz, 1975).

En 1857, Benjamín Vicuña Mackenna publicaba que Santiago tenía aproximadamente una circunferencia de 145 cuadras o cuatro leguas españolas, con unos 360 cuarteles o manzanas edificadas (La Ciudad de Santiago. Su pasado, su presente, su futuro, 1857). Sin embargo, luego define como ciudad a un área que comprendía solo 65 cuadras de las 145, por tanto, un 44.8% de la superficie era considerado ciudad y el resto eran suburbios. Posteriormente, en 1872 la extensión de Santiago era de 6 kilómetros y se limitaba al norte por el Cementerio General y al sur por el Matadero público; al oeste desde la Quinta Normal de Agricultura y al este por el Seminario Conciliar, con 5 kilómetros de extensión (Tornero, 1872). En 1873 se establecieron los límites administrativos del Departamento de Santiago, con Benjamín Vicuña Mackenna como intendente (De Ramón, 1978). También se destaca que en 1872 solo el 21,27% de las casas tenía agua potable, lo que denotaba la segregación espacial que ya sufría Santiago (De Ramón, 1978).

A fines del siglo XIX destaca el desarrollo del barrio de la actual Avenida Matta, donde comenzaron a edificarse "cités" y el sector al sur de la A. Matta adquirió importancia comercial. La mayor parte de los barrios nuevos se formaron entre la Alameda al norte y el Zanjón de la Aguada al sur. Por otro lado, en el sector de Ñuñoa destacan el establecimiento de la Providencia, el Seminario y el Hospital Salvador (Leon Echaiz, 1975).

Como detalla Leon Echaiz (1975), nacen en esta época (siglo XIX) los centros poblados de San Bernardo, Talagante y Buin. Reconociendo en el Departamento de Santiago a: Ñuñoa (más de mil habitantes), Renca, Lampa, Colina, Quilicura, Tiltil (700 habitantes), La Palma, Esmeralda de Colina (entre Santiago y Colina), Los Guindos (en Ñuñoa), Los Cerrillos, Maipú, Espejo, San Enrique, Lo Barnechea, Bodegas (al pie del cerro San Francisco). Otros poblados más pequeños eran: Apoquindo, Conchalí, Macul, Pudahuel, Chuchunco. En el Departamento de Victoria: San José de Maipo, Talagante, Villa Florida, Puente Alto, El Volcán, Bajos de Mena, Malloco, Peñaflor, Isla de Maipo, Tango, Santa Cruz de la Victoria (entre Santiago y Melipilla), Nos, Calera de Tango, Tres acequias, San Agustín de Tango. Finalmente, en el Departamento de Melipilla: San Francisco del Monte, Curacaví, Puerto Viejo de San Antonio, Puerto Nuevo de San Antonio, Cartagena y Alhué.

Los límites de los departamentos fueron modificados luego de la salida de Vicuña Mackenna como intendente. La expansión del Departamento de Santiago superó el límite del Zanjón de la Aguada, dejándose hasta la Quebrada de Macul. La población al final del siglo XIX alcanzaba 252.629 habitantes (Leon Echaiz, 1975).

Se incluyen a continuación de forma ilustrativa, mapas georreferenciados de Santiago: de 1841(Figura 5.4) y de 1895 (Figura 5.5).

En el mapa de 1841 (Figura 5.4) se observa crecimiento de la ciudad hacia el norte y hacia el sur respecto al siglo anterior, donde la zona central se encuentra rodeada principalmente por chacras y potreros. Para esta época la ciudad aún se encontraba emplazada sobre los depósitos fluviales y aluviales del Río Mapocho.

Para el año 1895 la Figura 5.5 evidencia un mayor desarrollo para los barrios centrales y sus avenidas. Con un claro crecimiento hacia el sur acercándose al Zanjón de la Aguada. La ciudad estaba instalada casi en su totalidad sobre los depósitos fluviales y aluviales del Río Mapocho, sin embargo debido a la extensión hacia el sur comenzaba a utilizar los depósitos aluviales del Río Maipo como “suelo”.

En la Figura 5.6 se ilustran los límites urbanos para los años 1552, 1600,1841 y 1895. Se puede apreciar un patrón de crecimiento radial de la ciudad, la cual visualmente evidencia un crecimiento muy semejante hacia el norte, este y oeste, y ligeramente mayor hacia el sur-suroeste. El crecimiento era sostenido pero la expansión aún era acotada para esta época, considerando que Santiago ya contaba con más de 350 años de historia, y que solo en este periodo la población de la capital se había sextuplicado.



Figura 5.4: Mapa Histórico de Santiago 1841. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Herbage, Arquitecto. Boloña, Cartógrafo.

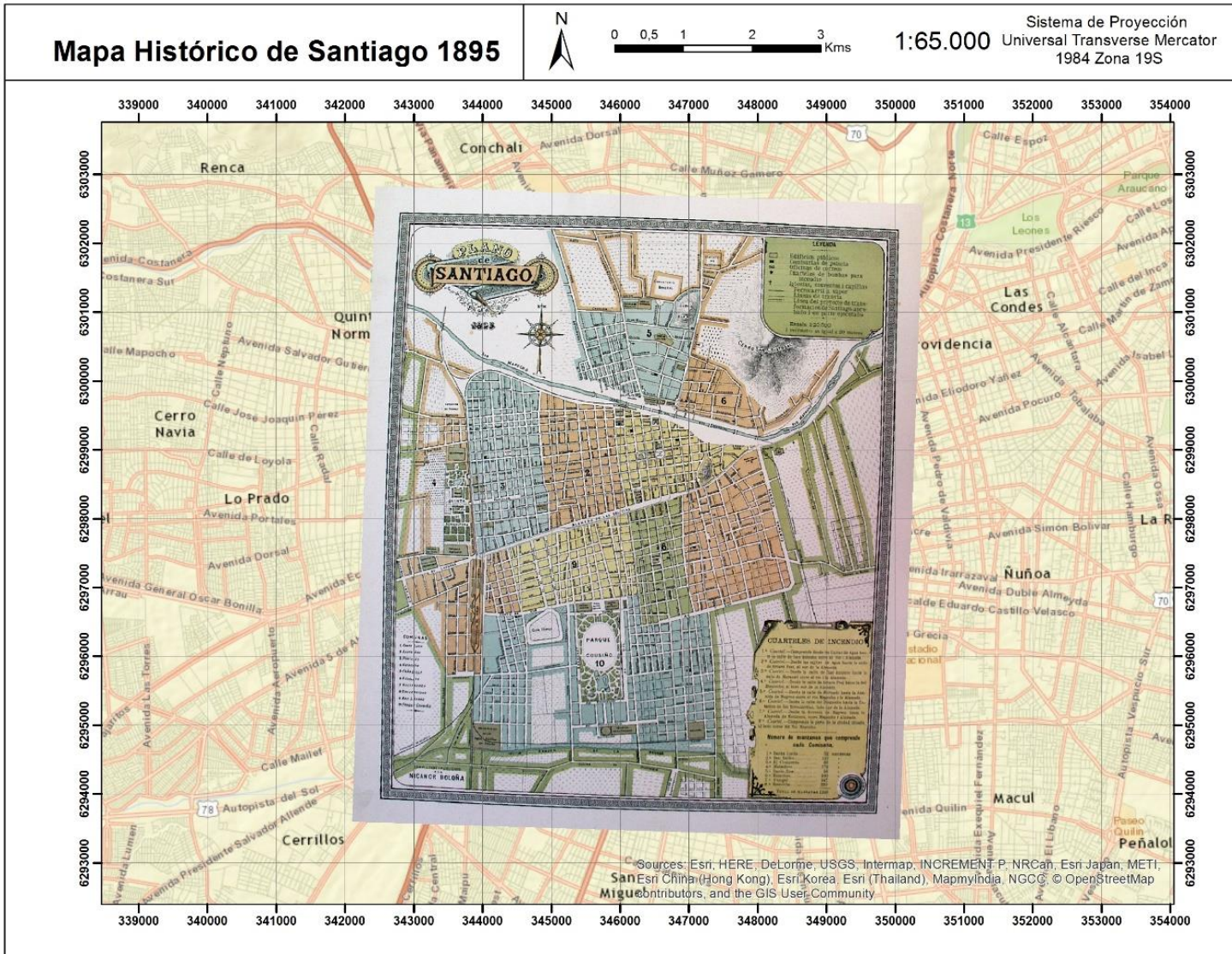


Figura 5.5: Mapa Histórico de Santiago 1895. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Nicanor de Boloña.

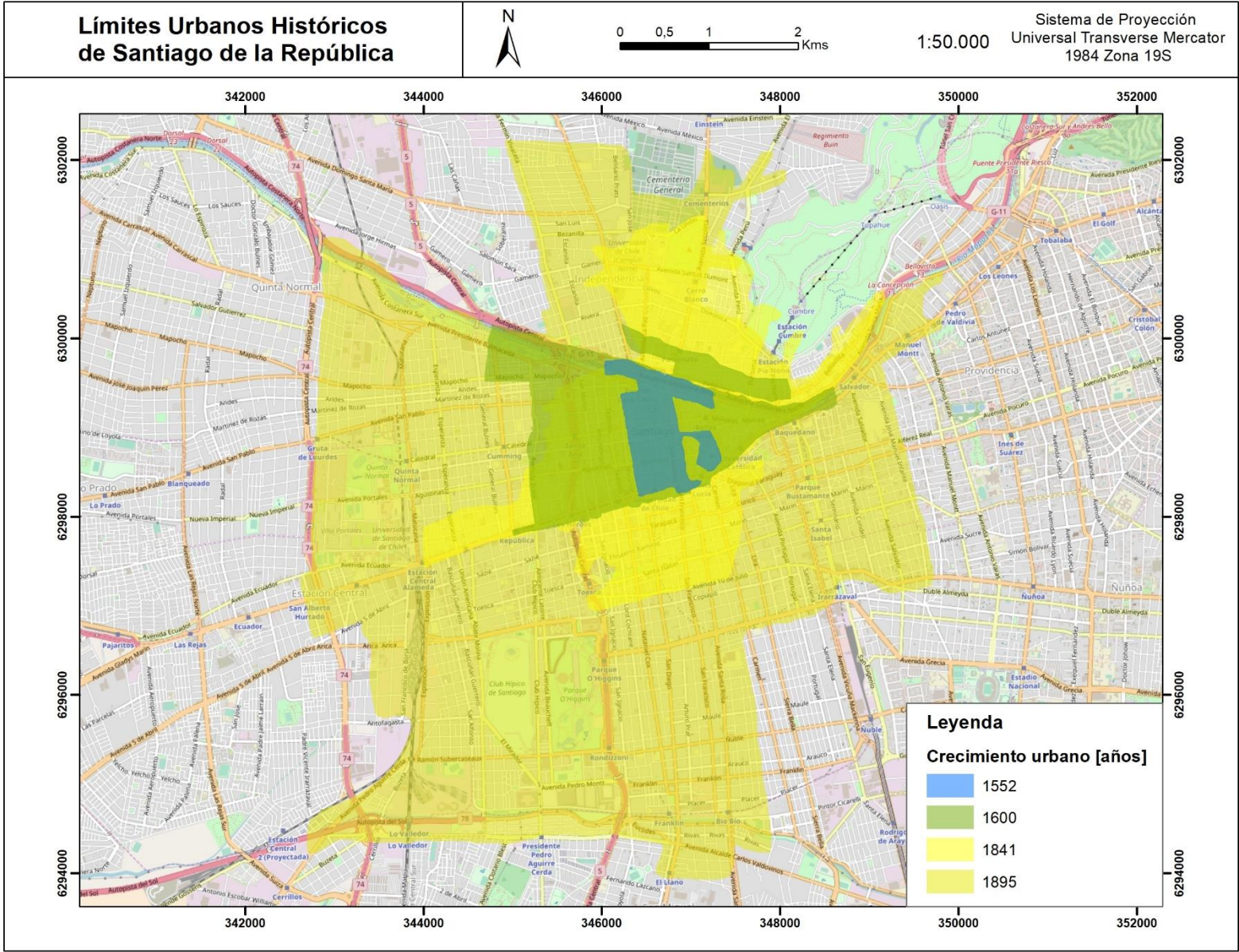


Figura 5.6: Evolución del crecimiento urbano para los años 1552, 1600, 1841 y 1895. Elaborado en ArcGIS 10.

5.3 SANTIAGO EN EL SIGLO XX (1900-1999)

A principios del siglo XX se fueron incorporando como barrios de Santiago lo que antes se veía sectorizado, pasando a formar parte de la ciudad lugares como Ñuñoa, la Chimba, el sur de la Alameda, la Cañada Abajo y el sector poniente. En estos años el carácter de barrio solo se extiende hasta el canal San Carlos, y más allá todo sigue siendo campo en todo el sentido de la expresión, donde la población compacta no pasa más allá de la Avenida Pedro de Valdivia (Leon Echaiz, 1975).

Se ha definido una etapa intermedia desde el estallido de la Guerra Mundial (1914) hasta ~1940, en que no hay cambios trascendentales en la vida de Santiago. En esta época se produce el auge de los automóviles, se extiende la red de cañerías de agua potable hacia el sector suroriente, y el alumbrado público hacia el barrio Chuchunco (Leon Echaiz, 1975).

Según Leon Echaiz (1975), en 1917 se integró a la Provincia de Santiago el Departamento de San Antonio, quedando conformada por cuatro departamentos: el Departamento de Santiago, de la Victoria, y Melipilla.

La división administrativa cambió en 1925 con la Constitución: el país fue dividido en provincias, las provincias en departamentos, los departamentos en subdelegaciones y éstas en distritos. Las comunas coinciden con las subdelegaciones, y cada comuna tiene una Municipalidad. La división entre los departamentos de Santiago y la Victoria estaba dada por la línea que seguía el cerro de Ramón, la Quebrada de Macul, el camino de Macul Alto, los callejones de Castro, Mena y Seco, y el camino de Ochagavía. En 1927 esta situación cambió, suprimiendo el departamento de Victoria que pasó a integrar al de Santiago (Leon Echaiz, 1975).

Posteriormente se reestablecieron y crearon otros departamentos: Departamento de Santiago (capital Santiago), Talagante (capital Talagante), Melipilla (capital Melipilla), San Antonio (capital San Antonio), San Bernardo (capital San Bernardo, antiguo Departamento de la Victoria), Maipo (capital Buin), Pedro Aguirre Cerda (capital San Miguel), y Puente Alto (capital Puente Alto) (Leon Echaiz, 1975).

Como se explica en la Historia de Santiago (Leon Echaiz, 1975), la agricultura de la provincia de Santiago se alejó de la ciudad, que en el siglo XX se encontraba rodeada de “poblaciones callampas”, incluso Lo Cañita, Lo Encalada, Lo Valdivieso, Lo Mujica, Lo Infante, la chacra Santa Julia y la chacra Valparaíso fueron parceladas por la invasión de la ciudad hacia el sector oriente de Santiago, donde se desarrollaron nuevas poblaciones integradas al Gran Santiago². Ya hacia 1950, se detalla que el canal San Carlos cruzaba núcleos poblados como Ñuñoa, La Reina, Providencia y Las Condes.

El autor Leon Echaiz describe para el periodo posterior a 1930 una nueva etapa, con un desarrollo violento y un aumento excesivo de su población, con una exagerada centralización de las actividades del país, una expansión horizontal y problemas urbanísticos, fomento de la habitación barata, aumento de las poblaciones callampas, entre otros. El autor señala las siguientes cifras de población para el Gran Santiago:

² Corresponde al área metropolitana, muchos autores se refieren así al núcleo urbano y conjunto de comunas que abarca la provincia de Santiago.

Tabla 1: Síntesis del aumento de población para el Gran Santiago (1907-1960). Fuente: Historia de Santiago, Leon Echaiz (1975).

Año	Población [habitantes]
1907	332.724
1920	507.296
1930	696.231
1940	952.075
1960	1.907.378

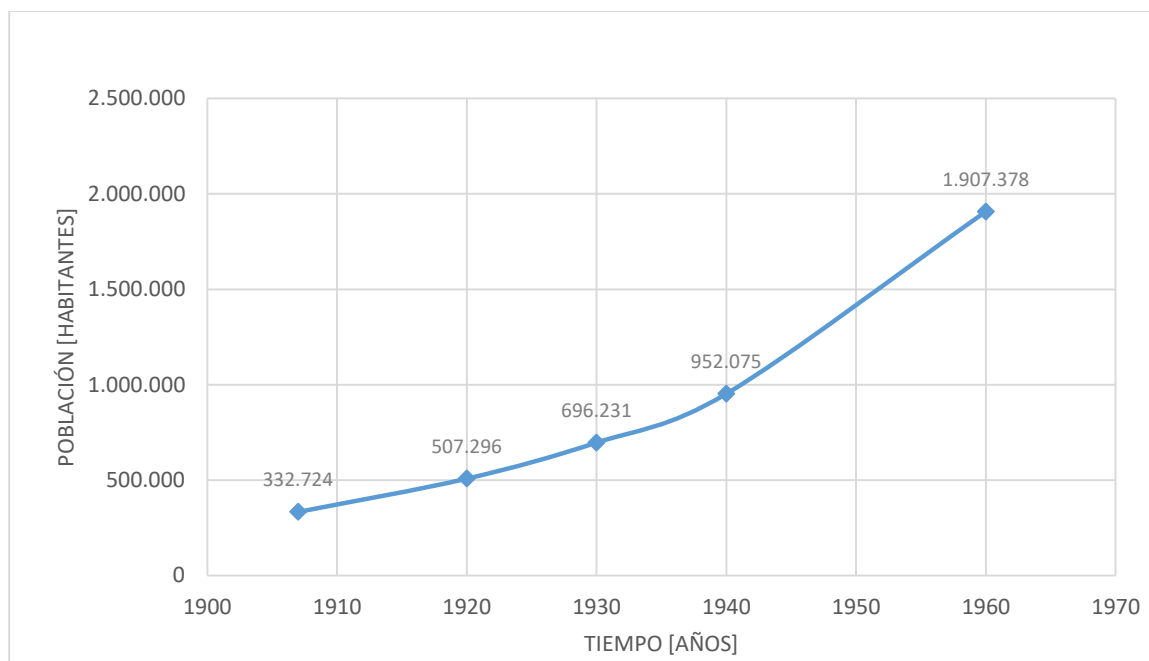


Gráfico 5.1: Aumento de población del Gran Santiago (1907-1960). Fuente: Historial de Santiago, Leon Echaiz (1975).

Este aumento de población se encuentra estrictamente ligado a que Santiago concentraba la actividad económica y política del país. A esto se suma la Reforma Agraria que impulsó hacia la ciudad de Santiago grandes masas de agricultores despojados de sus propiedades (Leon Echaiz, 1975).

Sobre la expansión horizontal, Leon Echaiz señala que Santiago creció hacia el norte uniéndose las comunas de Conchalí con la Chimba, Renca y Quilicura; al sur Santiago se fusionó con San Miguel, La Cisterna, La Granja y La Florida; al poniente Quinta Normal y Barrancas forman parte del Gran Santiago; y al oriente se consolidaron las comunas de Ñuñoa, Providencia, Las Condes y La Reina, denominadas “Barrio Alto”, donde destaca que La Reina y Las Condes aun mantenían sectores rurales en su límite oriental. Es en este sector oriental donde el crecimiento urbano ha sido más violento y la ciudad se ha expandido rápidamente hacia el este, según menciona el autor.

Durante los primeros años del siglo XX la ciudad venía expandiendo sus límites a un ritmo de 50 hectáreas por año, y entre 1930 y 1980 superó estas magnitudes. Un ejemplo de ello es que entre 1940 y 1970 la mancha urbana se triplicó desde 11.017 ha hasta 31.841 ha (Petermann, 2006). Entre 1930 y 1980, la ciudad creció en promedio 635 hectáreas anuales. Sin embargo, al calcular entre 1930 y 1960 el crecimiento, éste fue de 480 hectáreas por año, y entre 1960 y 1980, de 869 ha, alcanzando un máxima intensidad de la aceleración del crecimiento entre las décadas de los 60 y 70 (De Ramón, 2000).

Se creó en esta época la Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas, que dividió el territorio en regiones con fines de planeamiento y coordinación. La Provincia de Santiago formaba parte, junto con las Provincias de Aconcagua y Valparaíso, de la Región IV. Esta región abarcaba en los años 50 el 30% de la población de Chile (Pavez, 2009). Fue en este periodo que también se creó el “conjunto intercomunal”, como unidad mixta (urbana y rural). Más tarde se crearon los “planes seccionales”, como sub-sistemas de los Planes Intercomunales y Comunales (Pavez, 2009). La micro-región de Santiago fue limitada por el cordón de Chacabuco y Angostura de Paine, y entre las dos cordilleras (Pavez, 2009). El relieve montañoso corresponde a un 70% de la superficie, y rodea la cuenca rellenada por depósitos de los ríos Mapocho y Maipo.

En 1958 se lanzó el Plan Regulador Intercomunal de Santiago (PRIS) que fue aprobado en 1960, donde se definían los límites urbanos que buscaban impedir que la ciudad de Santiago se siguiera expandiendo sin regulación. Sin embargo, este límite ha sufrido variadas modificaciones y ajustes, dadas por el constante crecimiento. Para esa época, las únicas comunas que se encontraban urbanizadas en su totalidad eran Santiago, Providencia, Quinta Normal y San Miguel (De Ramón, 2000). El resto aún contenía zonas rurales que rodeaban los núcleos urbanizados.

Lo primero que fijó el Plan de 1960 fue la definición del área intercomunal urbana y suburbana, donde las 17 comunas que formaban parte eran: Santiago, Conchalí, Renca, Quilicura, Providencia, Las Condes, Ñuñoa, San Miguel, La Florida, La Granja, La Cisterna, Puente Alto, San Bernardo, Pirque, Quinta Normal, Maipú y Las Barrancas (hoy Pudahuel) (De Ramón, 2000).

Armando de Ramón (2000) indica que para esta década (60s), la ciudad se extendía al norte hacia las avenidas Independencia y Recoleta más allá de la zona de los cementerios; hacia el occidente las avenidas Mapocho, Carrascal, San Pablo y Alameda se extendieron hasta Cerro Navia, Blanqueado, el Tropezón, Barrancas y Las Rejas, antes sitios rurales; al sur la urbanización alcanzó hasta Los Cerrillos, en los alrededores del primer aeródromo de Santiago; las avenidas Santa Rosa y Gran Avenida llevaban a los pueblos semi-rurales de La Cisterna y San Bernardo. Por su parte Vicuña Mackenna urbanizó hasta Puente Alto, Macul y La Florida, representando comunas de clase media; finalmente hacia el oriente las avenidas Apoquindo-Las Condes, Vitacura, Bilbao y Larraín llegaban con sus barrios de chalés y bungalows hasta el pie de la cordillera de los Andes.

Dentro de las medidas de conectividad y transporte del PRIS 1960 estaba la construcción del Metro de Santiago, cuyas obras comenzaron en 1969, contemplando cinco líneas de 100 kilómetros, de las cuales la Línea 1 se inauguró en 1975 y la Línea 2 a principios de la década de 1980 (De Ramón, 2000).

Cabe destacar que los límites urbanos establecidos por el PRIS no fueron respetados por el mismo Estado, que utilizó terrenos declarados agrícolas para la construcción de viviendas sociales, lo que disminuía el costo de compra de los terrenos. Esta acción quiso ser imitada por empresas y constructoras urbanizadoras que presionaron al Estado, que cedió y aceptó la utilización de terrenos agrícolas o destinados a “áreas verdes”, lo que iba en perjuicio de los límites urbanos (De Ramón, 2000).

Todo lo anterior fue abruptamente modificado desde el golpe militar de 1973, momento en que el modelo económico neoliberal dejó todas las acciones a la libre iniciativa de los privados, manteniendo al Estado como un simple testigo con acciones mínimas. De esta forma, en 1979 por Decreto Supremo de la Junta de Gobierno Militar el límite urbano se elimina, dejando el uso del suelo libre al mercado inmobiliario, planteando que el suelo urbano no es un recurso escaso. Este ejercicio fue influenciado por la Escuela de Economía de Chicago, que acompañó esta acción con una baja inversión pública en infraestructura de la ciudad, lo que llevó a que la ciudad creciera en extensión y su ritmo se limitara por falta de infraestructuras de transporte (Aguirre, 2010).

El sistema económico trajo consigo efectos negativos, como hacer crecer a la ciudad de 23.879 hectárea en 1970 a 33.095 en 1980. Por otro lado, la baja de precios de los terrenos esperada por el modelo no tuvo lugar, manteniendo los precios altos en las comunas de élite, desplazando a los pobladores pobres hacia lugares más alejados, lo que aumentó los tiempos de viaje y número de buses, incrementando así la contaminación (De Ramón, 2000).

En el año 1980, el “Gran Santiago” estaba constituido por 34 territorios comunales, por las comunas ya mencionadas del Plan de 1960 y las que vinieron a agregarse: Huechuraba, Independencia, Recoleta, Vitacura, Lo Barnechea, La Reina, Macul, Peñalolén, San Joaquín, La Pintana, San Ramón, El Bosque, Pedro Aguirre Cerda, Lo Espejo, Estación Central, Lo Prado y Cerro Navia. En 1985, debido a los efectos negativos de las medidas impuestas, se restablecieron algunas regulaciones respecto a los límites, reconociendo al suelo como un recurso escaso.

A pesar de las modificaciones en la regulación, el crecimiento de Santiago -sobre todo a partir de 1990- ha seguido teniendo como actor principal al sector privado, que es responsable de casi toda la expansión de la mancha urbana por la construcción de viviendas, oficinas, comercios o industrias (Petermann, 2006).

Tabla 2: Población y mancha urbana 1970-2002. Modificado de Petermann, 2006.

Año	Habitantes	Mancha urbana (ha)
1970	2.820.936	31.841
1982	3.902.356	42.080
1992	4.754.901	49.270
2002	5.456.326	64.140

Durante la década de 1990, llegaba un nuevo Plan Regulador Metropolitano a sustituir el PRIS de 1960: el Plan de 1994 abarcaba como territorio urbanizado a 37 comunas. El plan perseguía un desarrollo armónico y equilibrado del territorio, mejorando la calidad ambiental y la defensa del patrimonio agroproductivo como respuesta a la contaminación y deterioro de los

niveles de vida metropolitanos (Petermann, 2006). En este plan se distinguían las áreas urbanas de las rurales, y dentro de la urbana, el territorio urbanizado y urbanizable. Estableció una superficie máxima urbanizable de 59.330 ha con alrededor de 13.000 ha para expansión.

En 1997, como lo plantea Pavez (2011), se incorporó al Plan Regulador el concepto de “condicionamiento urbano”, el cual instauró zonas urbanizables con desarrollo condicionado al diseño de planes maestros y la provisión privada de equipamientos e infraestructura, produciendo crecimiento sobre áreas de interés agropecuario. Ejemplo de ello es la incorporación de la Provincia de Chacabuco al PRMS.

A continuación, se ilustra el uso de suelo de Santiago a partir de un mapa para 1960 (Figura 5.7), donde aún se observa el carácter de núcleo de algunos sectores que posteriormente serían conurbados a Santiago, y dos imágenes satelitales en las cuales se puede distinguir la mancha urbana para 1985 (Figura 5.8), que podría ser parte del resultado de las modificaciones de PRMS con el Decreto Supremo de 1979, y la imagen de Santiago en 1994 (Figura 5.9), donde nuevas áreas pasan de mostrar un color verde a un grisáceo que indica urbanización.

La Figura 5.10 reúne la evolución del crecimiento urbano hasta el siglo XX. Para el año 1960 el crecimiento urbano se emplazaba sobre los depósitos fluviales y aluviales del Río Mapocho, aluviales del Río Maipo al sur, sobre la Ignimbrita Pudahuel en el sector poniente, y comenzando a utilizar los depósitos aluviales del piedemonte al oriente, en los sectores de Las Condes y La Reina.

En 1985 la ciudad se continuaba expandiendo y comenzaba a emplazarse sobre depósitos lacustres en la zona norte de la cuenca. Hacia 1994 el sector norte del piedemonte ya se encontraba urbanizado sobre depósitos aluviales del piedemonte y sobre algunos depósitos de remociones en masa, al igual que el sector cercano a la Quebrada de Macul, el cual sufrió los efectos de los flujos de detritos y de barro de mayo de 1993.

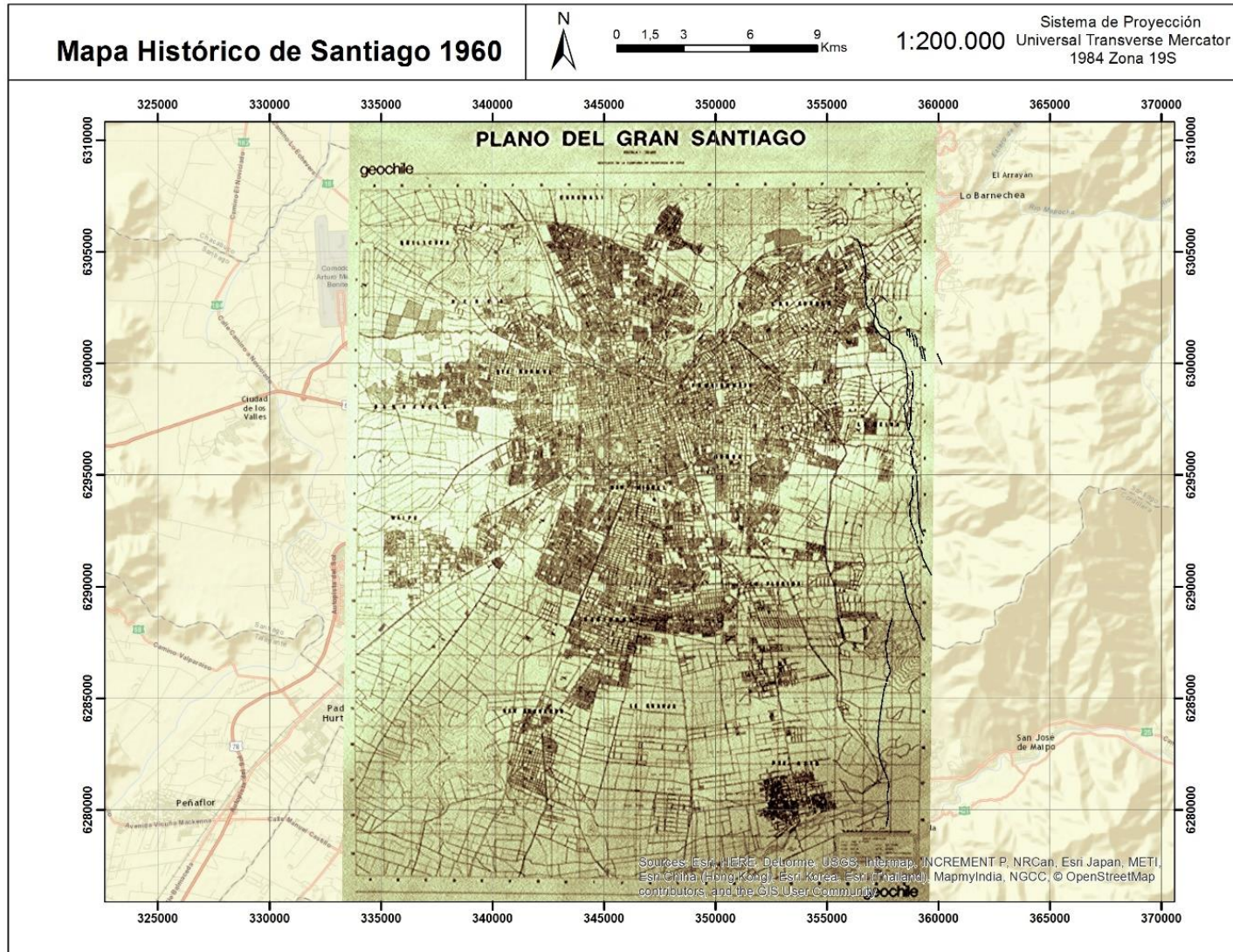


Figura 5.7: Plano del Gran Santiago 1960. Georreferenciado en Arcgis 10. Fuente: Geochile.

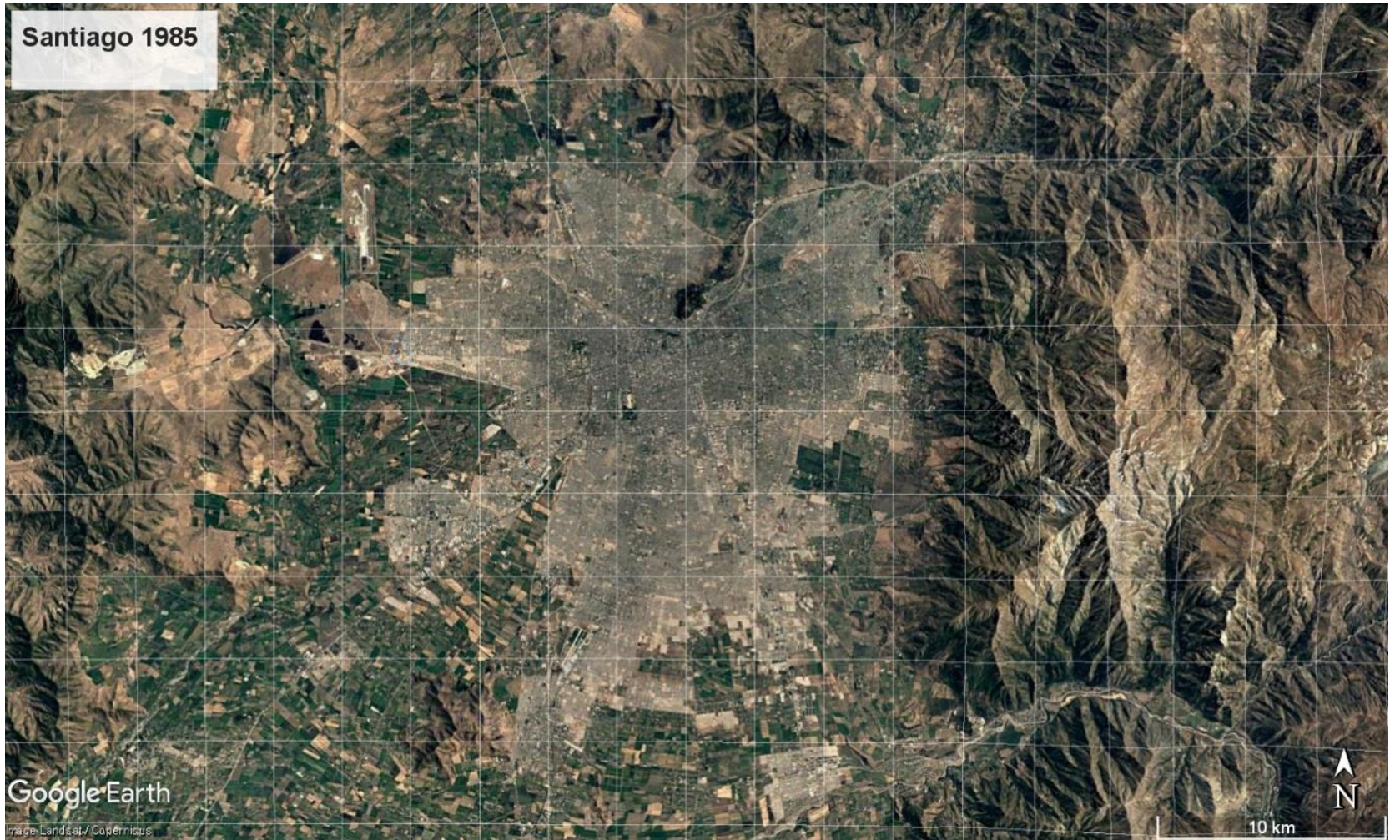


Figura 5.8: Imagen Satelital de Santiago 1985. Fuente: Google Earth.

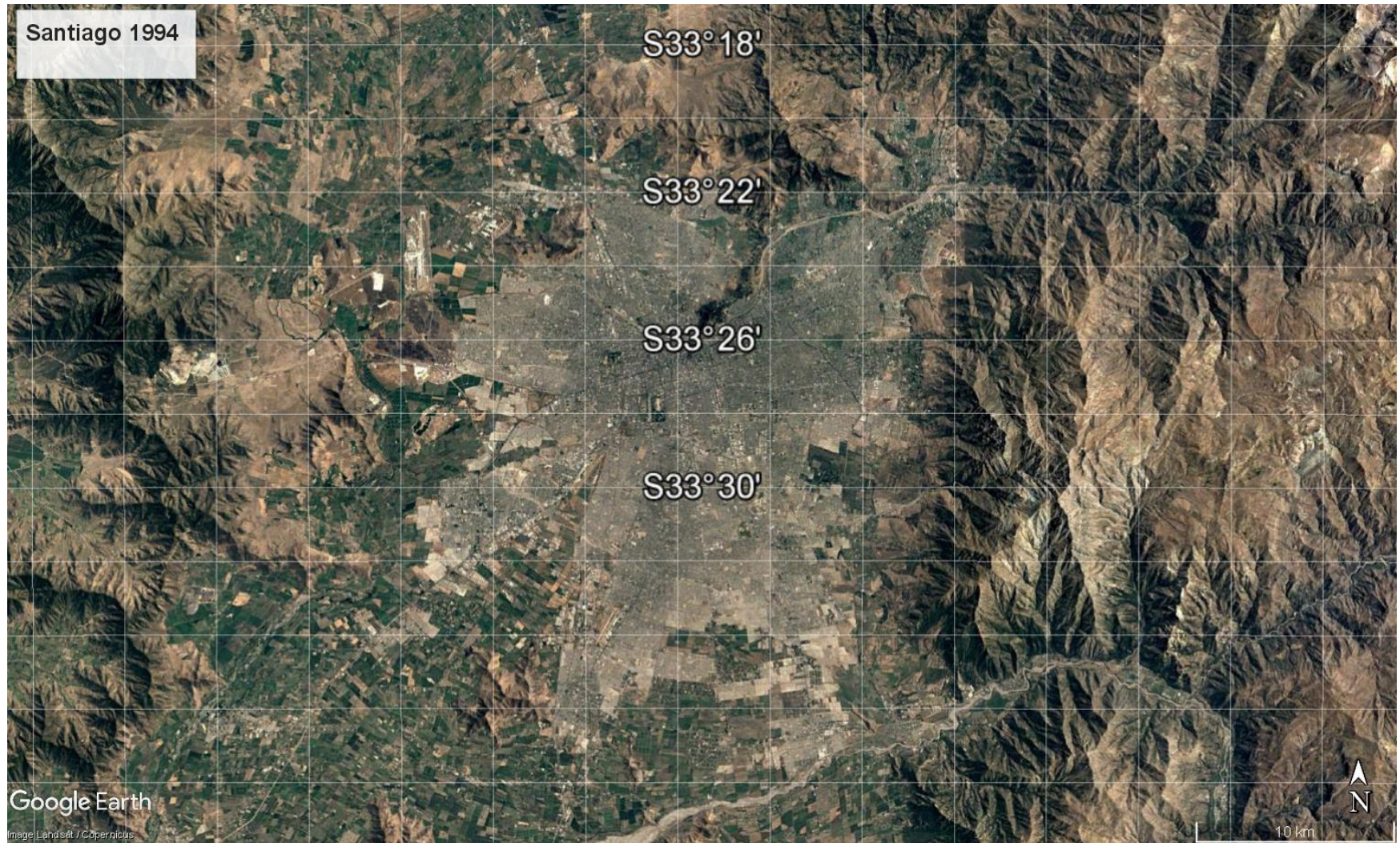


Figura 5.9: Imagen Satelital de Santiago 1994. Fuente: Google Earth.

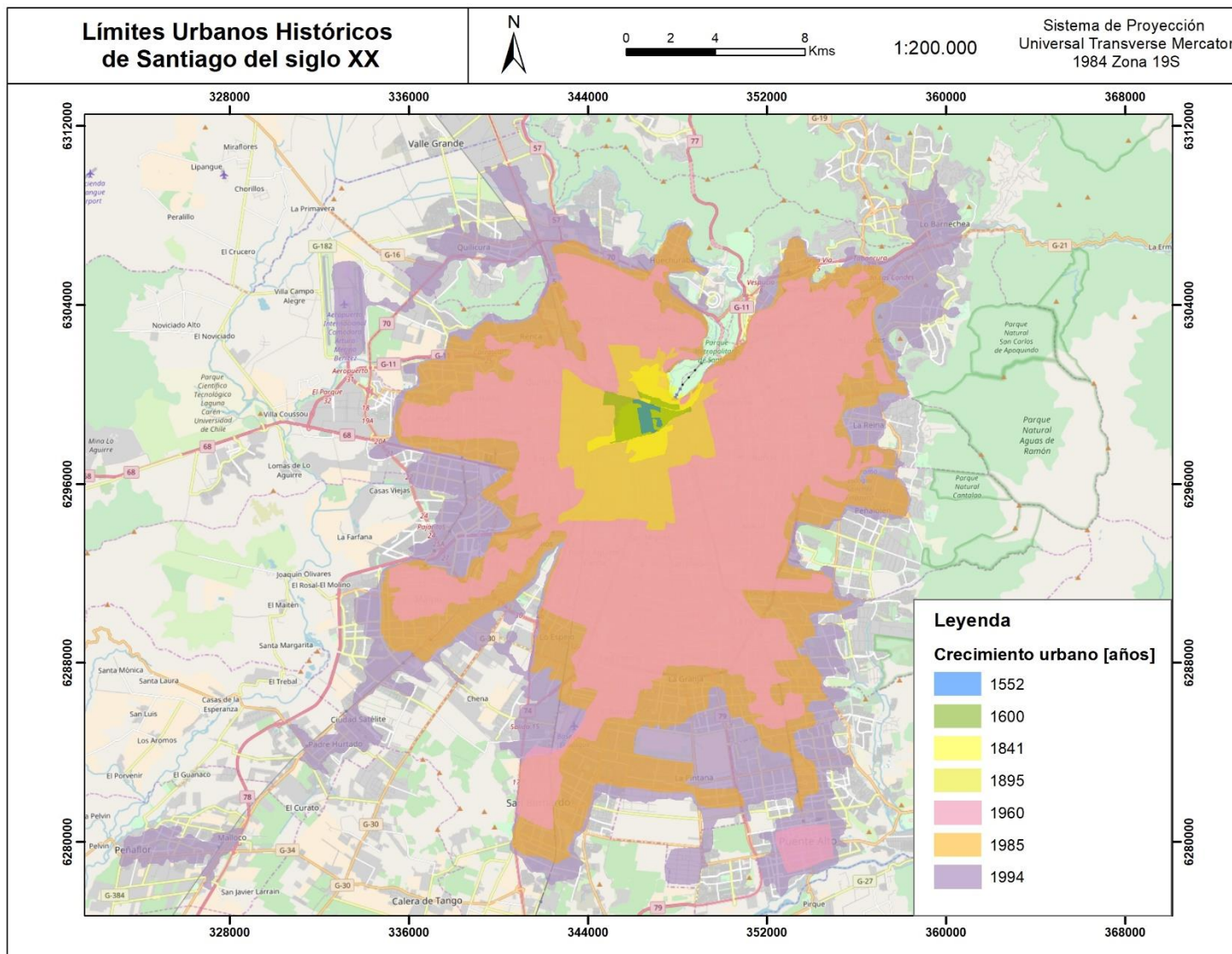


Figura 5.10: Evolución del crecimiento urbano para los años 1552, 1600, 1841, 1895, 1960, 1985 y 1994. Elaborado en ArcGIS 10.

5.4 SANTIAGO DEL SIGLO XXI (2000-Presente)

Para los inicios del siglo XXI, el número de habitantes de Santiago rondaba los 5 millones y habitaban preferentemente en la zona sur, donde las comunas más populosas correspondían a La Florida, Puente Alto y Maipú.

El área urbana construida continuó aumentando, pasando de 330 km² en 1980 a 600 km² en el 2004 (Petermann, 2006). Sin embargo, el crecimiento de la población urbana se ralentizó en el mismo periodo, pasando de un 2% a menos de un 1,5% (Galetovic & Jordán, 2006). Por otra parte, entre 1997 y 2002 más de 150.000 personas se mudaron anualmente dentro del área metropolitana de Santiago (Rodríguez, 2007), lo que indica una tendencia constante de reubicación hacia las comunas periféricas.

Lo anterior trajo consigo un aumento en la población de las comunas periféricas, y una disminución en las comunas centrales y pericentrales (Petermann, 2006). Un factor influyente es que desde el año 2003 es legal la instalación de conjuntos habitacionales en el área rural, cualquiera sea el tamaño de dichos conjuntos y al margen de toda planificación urbana-regional (Pavez, 2011). De esta forma, la construcción de megaproyectos habitacionales está ligada con la ocupación de comunas más alejadas, como los grandes condominios de Quilicura, Puente Alto, Peñalolén, entre otros.

Por otro lado, la población de mayores recursos continuó avanzando hacia la cordillera, aumentando la población de Las Condes y extendiéndose hacia Vitacura y Lo Barnechea. Conjuntamente, en las últimas décadas el eje de la Avenida Providencia extendió su sector comercial hacia la avenida Apoquindo, que se ha consolidado como un importante centro empresarial moderno con grandes edificios de altura, como la Torre Titanium y la Gran Torre Santiago (parte del complejo Costanera Center).

Respecto al uso de suelo, la Cámara Chilena de la Construcción desarrolló un estudio (2007) que indicaba que no quedaba suelo para más de dos o tres años al ritmo de consumo de suelo de los últimos cinco años. En cuanto a la normativa del país, en el año 2000 la política nacional de desarrollo urbano fue derogada (Pavez, 2011), y no fue hasta el 2014 que se formuló una Política Urbana que intenta limitar y orientar las acciones en materia urbana.

Desde el año 2006, con la inclusión de las provincias de Melipilla y Talagante, todas las comunas de la Región Metropolitana han sido incluidas en el PRMS, el cual consigna solo restricciones para las áreas urbanas. Las últimas modificaciones del PRMS aprobado el 2013 han añadido Zonas Urbanizables Condicionadas (ZUC) hacia el norte, poniente y sur de Santiago (Figura 5.11).

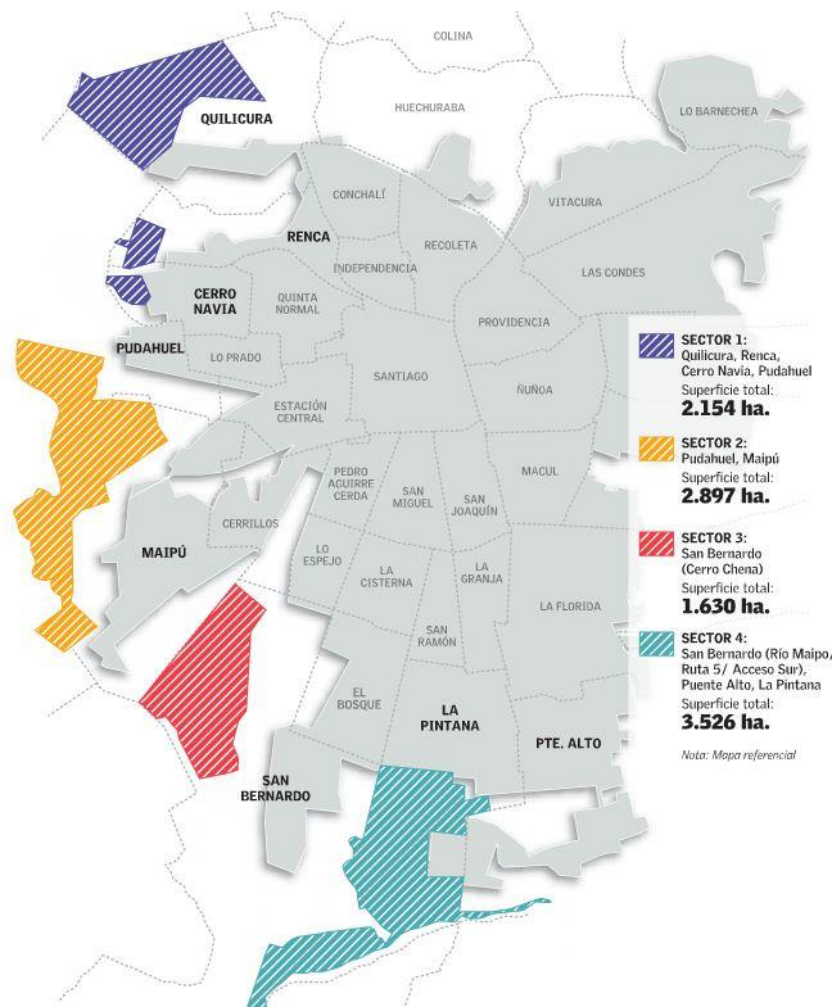


Figura 5.11: Plano de zonas de urbanización condicionada (ZUC) incorporadas por el PRMS. Fuente: Asociación de Arquitectos Tasadores de Chile A.G.

Estudios recientes indican que la expansión urbana ha disminuido su intensidad en los últimos años. Un estudio inmobiliario realizado por la consultora Astaburuaga & Grandón (2016), analizó los cambios habitacionales entre 1995 y 2015, los que indican que entre 1995 y 2000 se consumieron 4.478 ha de suelo urbano, y que entre 2010 y 2015 la cifra disminuyó a 3.211 ha. Lo anterior representa una densificación de la urbe, con el aumento de los edificios en altura y un aumento de viviendas por hectárea en los conjuntos habitacionales.

A continuación se ilustra la mancha urbana de Santiago para el año 2017 (Figura 5.12), obtenida desde una imagen satelital. En esta imagen se puede notar como la expansión urbana ha alcanzado el relieve capitalino hacia el oriente, parte del poniente y al norte de la ciudad.

Finalmente, se resume en la Figura 5.13 la evolución historiográfica de Santiago descrita en este capítulo, dando énfasis a en la expansión hacia el frente cordillerano (Figura 5.14). Se puede notar como las comunas de Peñalolén, La Florida y Puente Alto experimentaron la mayor expansión hacia el piedemonte en las últimas décadas, emplazándose sobre depósitos aluviales de piedemonte, coluvios y la Ignimbrita Pudahuel.

Todas estas nuevas unidades sobre las que Santiago ha crecido son las que según Leyton et al. (2011) se agrupan en una misma zonificación sísmica, con mayor efecto de sitio y, por ende, mayores intensidades en el caso de producirse un evento sísmico.

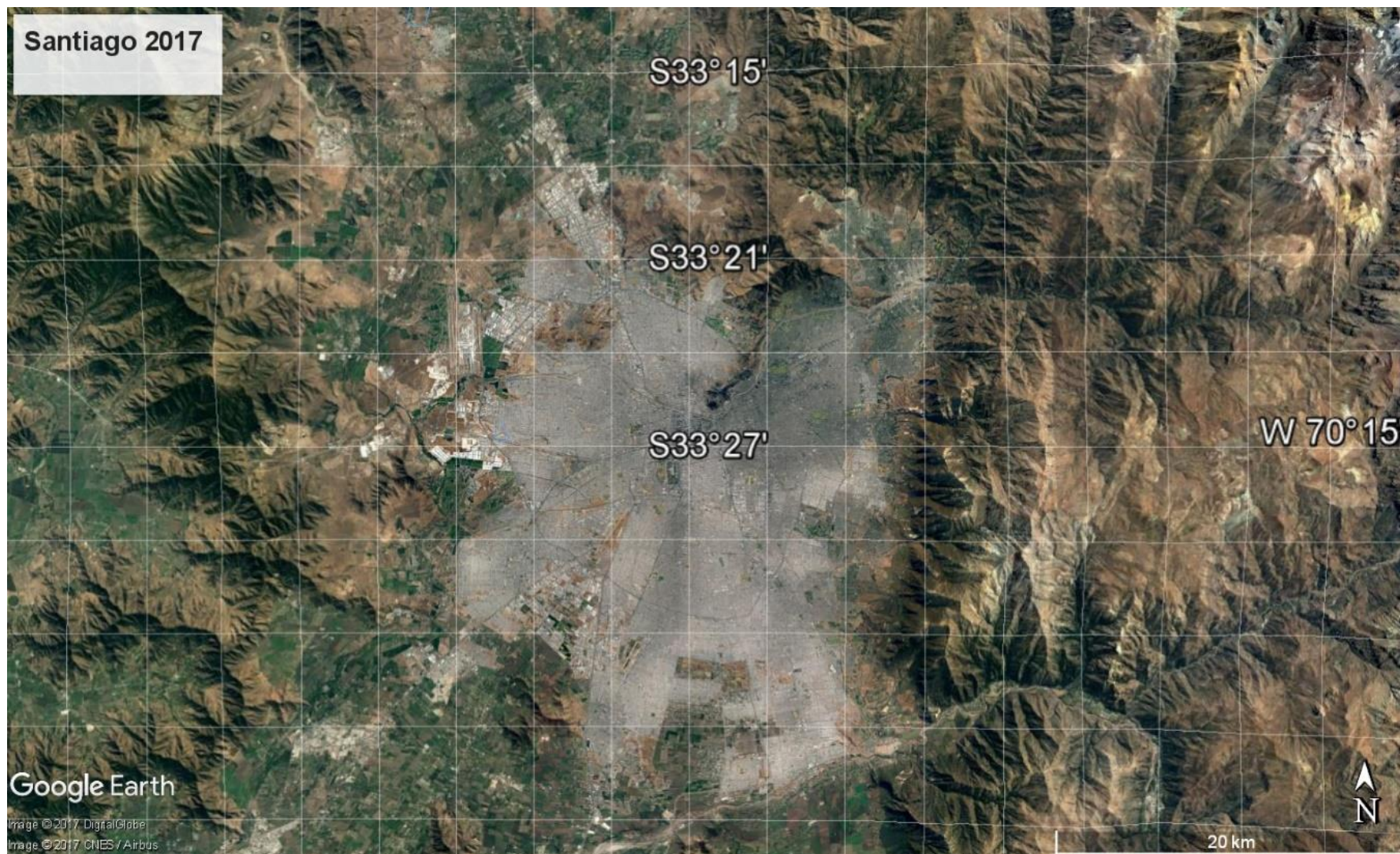


Figura 5.12: Imagen Satelital de Santiago 2017. Fuente: Google Earth.

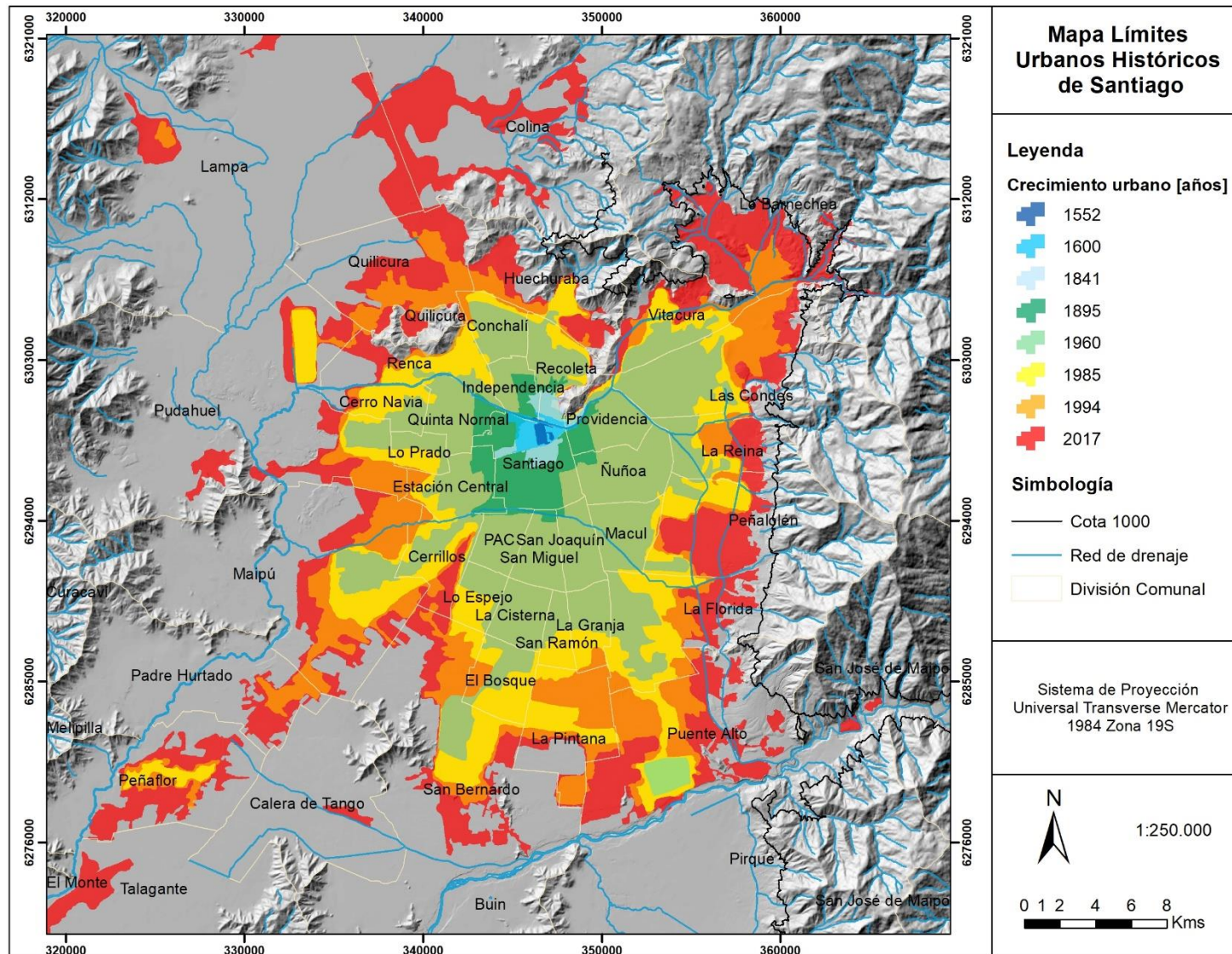


Figura 5.13: Mapa de evolución histórica del crecimiento de Santiago. Elaborado en Arcgis 10.

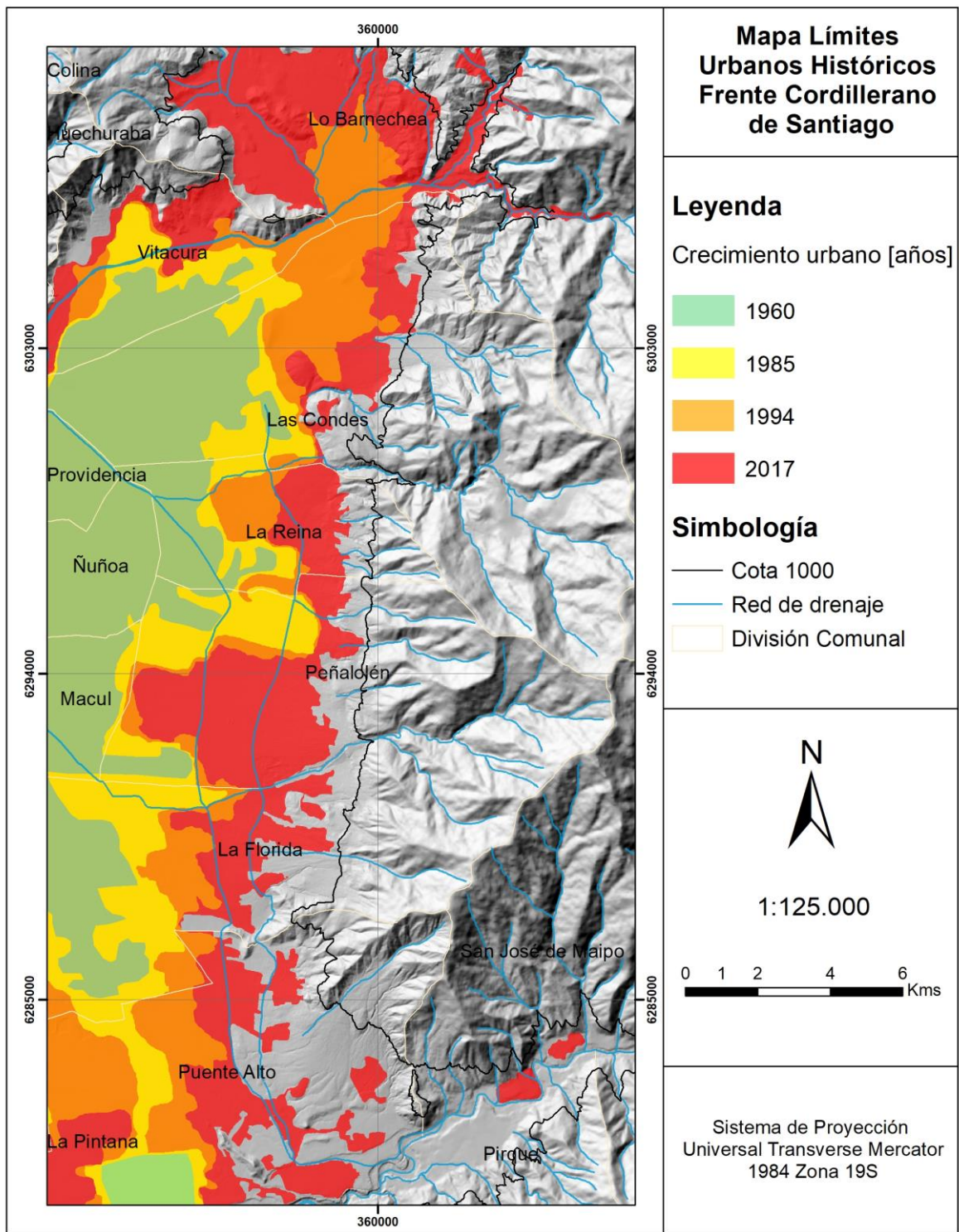


Figura 5.14: Mapa de evolución histórica de límites urbanos del frente cordillerano de Santiago. Elaborado en ArcGIS 10.

5.5 ANÁLISIS DE LA EXPANSIÓN DE SANTIAGO

La capital de Chile ha albergado desde los inicios de su desarrollo a un gran porcentaje de la población nacional, debido a la fuerte centralización que el país ha sufrido y que sigue experimentando. Lo anterior se ve evidenciado en los resultados, que muestran un claro crecimiento y expansión de Santiago. Al realizar un análisis de esta expansión, representada en los polígonos mapeados, se obtiene que el área urbana para los años 1960, 1985, 1994 y 2017 tiene los siguientes valores:

Tabla 3: Evolución de la superficie de Santiago entre 1960 y 2017. Elaboración propia.

Año	Superficie de mancha urbana [Km ²]	Superficie mancha urbana [hás]
1960	248	24.800
1985	380,63	38.063
1994	519,36	51.936
2017	811,68	81.168

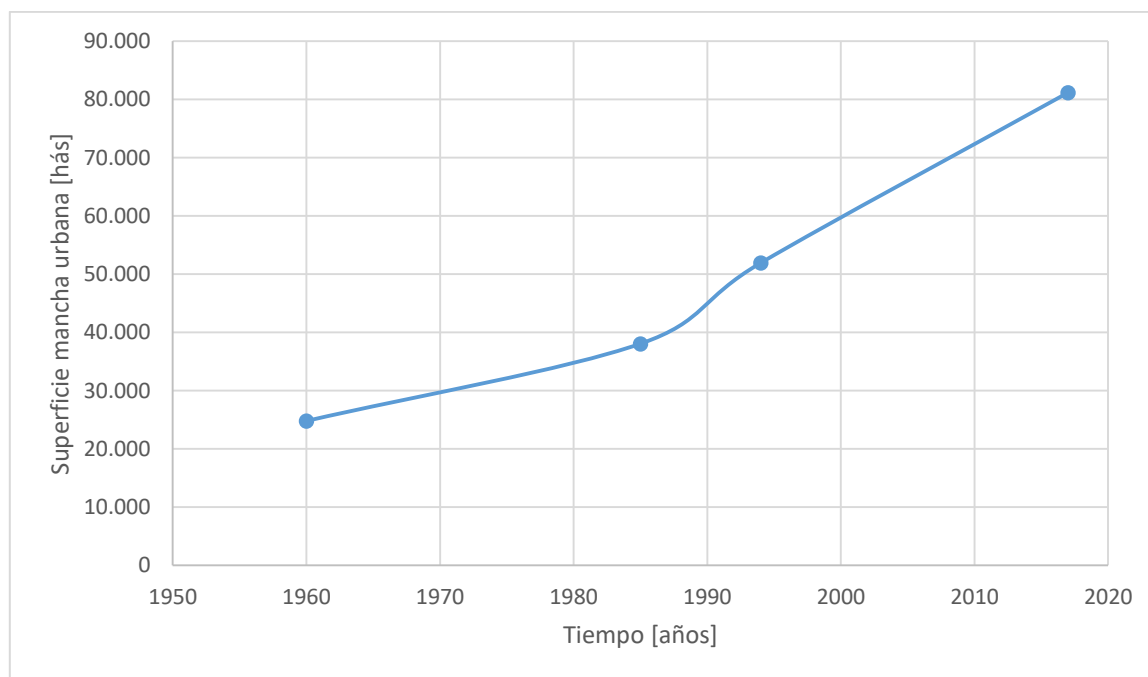


Gráfico 5.2: Evolución de la mancha urbana de Santiago entre 1960 y 2017. Elaboración propia.

Estos valores muestran como en casi 60 años la ciudad ha estado cerca de cuadruplicar su superficie. Los terrenos que han sido ocupados con el paso de los años corresponden a los suburbios y áreas que no habían sido utilizadas para uso habitacional. Particularmente para la zona de estudio, se puede apreciar en la Figura 5.14 cómo el crecimiento urbano ha alcanzado el piedemonte, donde en algunos sectores como Lo Barnechea ha avanzado hacia la cordillera

ocupando las quebradas y superando la “cota mil”, límite establecido en el PRMS desde 1994 que prohíbe la construcción sobre los 1000 m s.n.m. En la zona oriente existe un aumento en el uso de suelos del sector precordillerano, sobre todo para las comunas de Puente Alto, La Florida, Peñalolén y Las Condes, debido al aumento de la población de estas comunas en las últimas décadas. Estos suelos corresponden a depósitos aluviales de piedemonte asociados a quebradas activas, a depósitos coluviales, de remociones en masa. Los cuales presentan mayor efecto de sitio que el resto de la cuenca rellenada por depósitos aluviales de los ríos (Leyton et al., 2011).

Las figuras generadas en este estudio demuestran que el crecimiento de la ciudad ha sido constante pero no sostenido en el tiempo. Una causa importante de ello son las normativas y sus modificaciones a lo largo de la historia. Santiago se ha expandido y lo seguirá haciendo, se ha buscado contener el crecimiento fijando límites, pero éstos no han sido respetados ni por el Estado ni por los privados (Petermann, 2006).

Capítulo 6 GEOMORFOLOGÍA URBANA SOBRE LA TRAZA DE LA FSR

6.1 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es una herramienta muy útil para la caracterización del crecimiento de una ciudad, pues aspectos geomorfológicos y morfodinámicos pueden ser componentes para determinar condiciones y restricciones a la hora de extender la ciudad.

Como fue mencionado en el Capítulo 3, las unidades geomorfológicas que caracterizan el piedemonte están conformadas principalmente por abanicos aluviales de edad Pleistocena que se superponen con abanicos más recientes, además de conos aluviales, depósitos de remociones en masa, entre otros.

El área de estudio presenta características morfométricas importantes a la hora de analizarla, pues corresponde a una zona de piedemonte con variaciones en altura y pendiente notables. A continuación se muestra un mapa de pendientes (Figura 6.1), medido en grados decimales, realizado en base al modelo digital de elevación de la zona.

Las pendientes en el área presentan una distribución que va desde 0 ° hasta más de 50°, con un promedio de 10°. El sector precordillerano se ubica en el rango de pendientes de 15°-25°, aumenta hacia 25°-35° exponiendo estos valores en las laderas próximas a las quebradas, y llegando hasta 35°-45°. Pendientes mayores a 45° se observan en escasos sectores.

Es importante considerar las pendientes, pues ellas representan un factor condicionante de procesos de remociones en masa, los cuales pueden ser desencadenados por actividad sísmica. La cercanía de la FSR con este sector de mayores pendientes tendría efectos importantes en procesos de ladera, en el caso de una potencial activación de esta estructura.

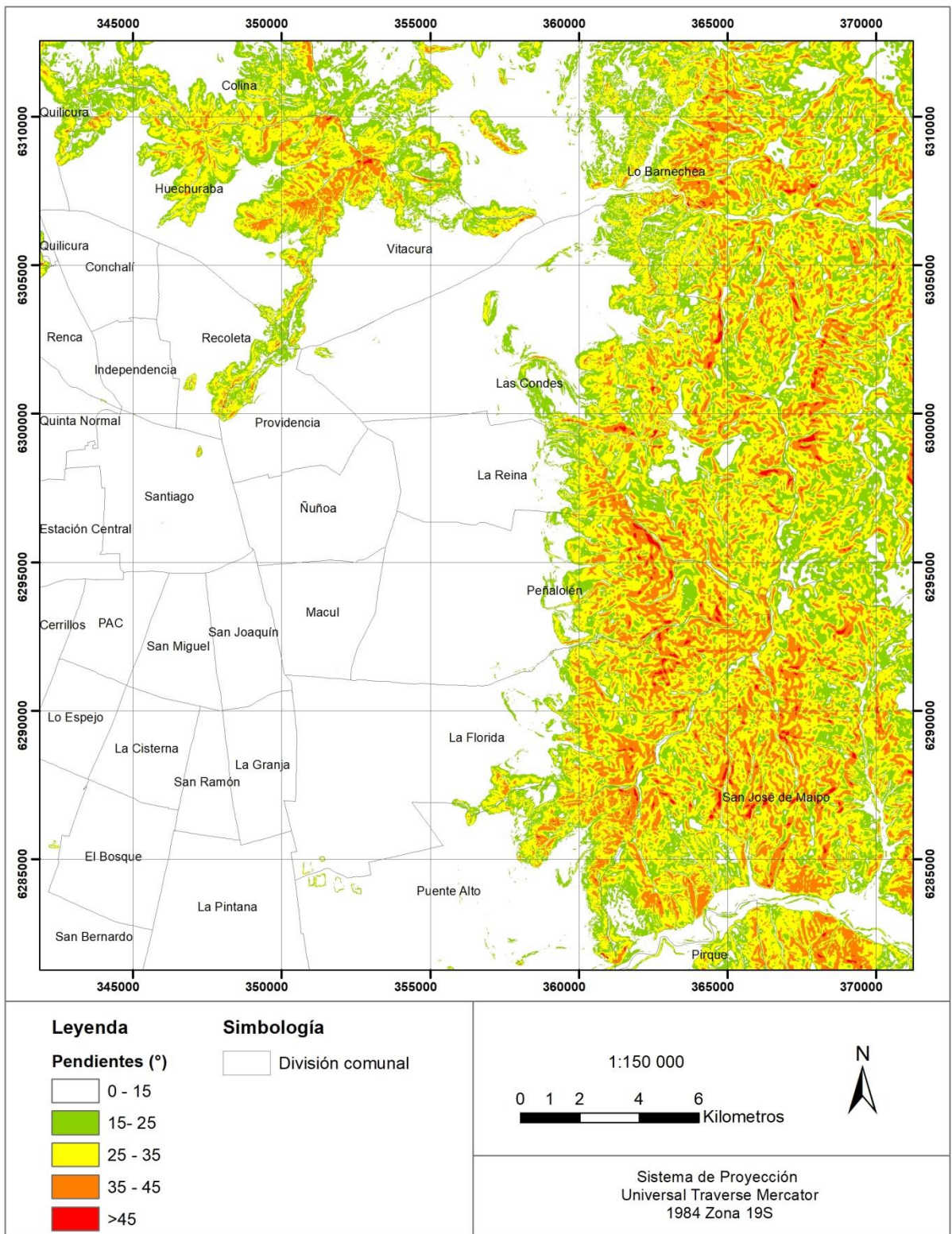


Figura 6.1: Mapa de pendientes en grados decimales para frente cordillerano de Santiago. Elaborado en ArcGIS 10.

A los pies del frente cordillerano, donde se identifica el cambio de pendientes hacia el rango de color verde (15° - 25°), se interdigitan las unidades cuaternarias. Es en este sector donde se pueden distinguir zonas escarpadas, asociadas a la deformación que han sufrido las unidades

morfoestratigráficas. Las principales unidades en que se puede identificar esta deformación, corresponden a abanicos aluviales.

Mediante la metodología descrita en el Capítulo 4 se pudieron identificar morfologías de escarpes sobre la superficie aluvial, por tanto los procesos de deformación se asocian a actividad cuaternaria.

La actividad neotectónica de la FSR ha sido reportada por Rauld (2002), Armijo et al. (2010), Vargas et al. (2014), entre otros. Sin embargo aún no se conoce bien su continuidad entre el Río Mapocho y el Río Maipo. La identificación de estas morfoestructuras contribuye al conocimiento de la peligrosidad sísmica.

Se identificaron saltos sobre la superficie que consisten en alrededor de 300 puntos de base y techo que pueden corresponder a escarpes. La base de estos saltos es la que representaría la traza de falla en caso de considerarse un escarpe de falla.

La categorización utilizada para los escarpes se basó en la clasificación realizada por Rauld (2011) en su tesis, donde define:

1. Escarpes mayores, correspondientes a escarpes compuestos, más antiguos y menos conservados, que presentan alturas de entre 100 y 200 m. Debido a la poca conservación, sus pendientes promedian los 15° y 20° , alcanzando valores máximos calculados de 30° .
2. Escarpes medianos, que son los más presentes y continuos en la zona de estudio. De igual manera, son escarpes compuestos, relativamente bien conservados, con un salto vertical entre 60 y 10 m y pendientes de entre 20° y 35° , superando los 40° localmente. Cabe destacar que estos escarpes se pueden presentar como escarpes dobles (al norte de la Quebrada de Macul, por ejemplo), interpretados como relevos o segmentos en la traza de la falla.
3. Escarpes pequeños, son aquellos con alturas diferenciales de entre 3 y 4 m, afectando a los depósitos más recientes. Presentan una buena conservación y pendientes de entre 20° y 30° en promedio.

Los escarpes identificados y seleccionados para la visualización de la proyección se representan en el Anexo I. La proyección de todos los perfiles topográficos y los perfiles topográficos de los cuales se identificaron los escarpes se adjuntan en el Anexo II.

En la Figura 6.2 se muestra la proyección de los escarpes sobre el frente cordillerano. Se observa un lineamiento general de orientación aproximada norte-sur. En ella se puede notar que los escarpes mayores se ubican en la parte más alta, los medianos en la parte media y los pequeños en la parte más baja del frente cordillerano. Se observa como las quebradas y drenajes interrumpen la continuidad norte-sur de la zona escarpada.

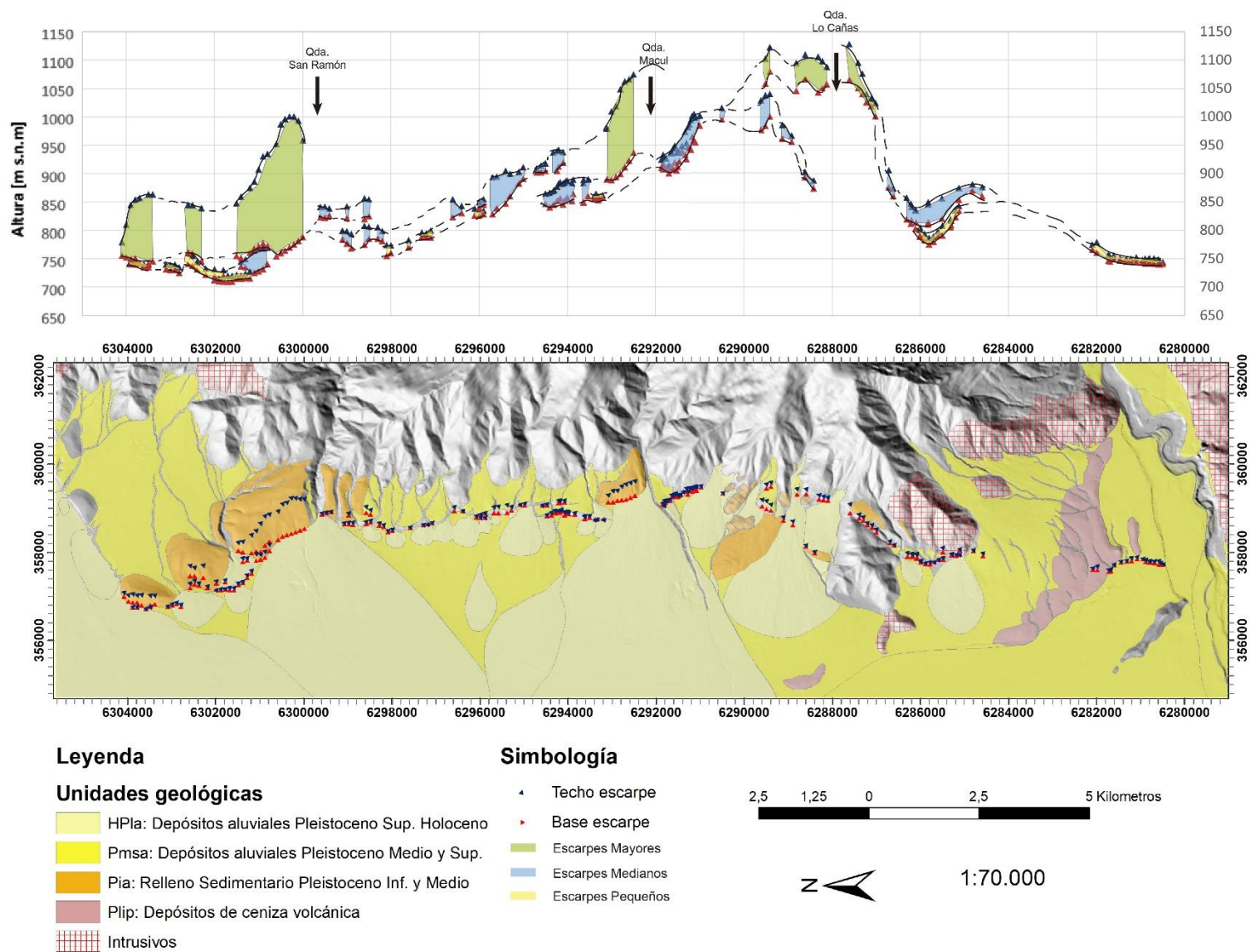


Figura 6.2: Proyección de los escarpes morfológicos del piedemonte entre los ríos Mapocho y Maipo. Arriba: Perfil transversal del frente con exageración vertical, con base y techo de los escarpes indicando con color su clasificación por tamaño. Abajo: Proyección de los escarpes de base y techo en planta. Escala 1:70.000.

Los resultados muestran tres niveles de escarpes que se encuentran segmentados de norte a sur, lo que dificulta la unión continua de la traza. Sin embargo, es posible identificar una tendencia coherente de los escarpes, sobre todo para el nivel de escarpes pequeños.

Los mayores escarpes se ubican hacia el norte de la zona de estudio, en que los valores de los saltos más altos van desde los ~100 metros hasta los 230 metros, entrando en la categoría de escarpes mayores. En esta categoría también se incluyen unos pocos escarpes con valores menores a 100 metros, como algunos con saltos entre 80-100 m. Los sectores afectados por esta mayor deformación corresponden al Cerro Calan en Las Condes al norte de la Quebrada San Ramón, y el sector cercano a la Universidad Adolfo Ibáñez al norte de la Quebrada de Macul.

Los escarpes medianos, es decir, aquellos con saltos entre 10 y 60 metros aproximadamente, se ubican distribuidos a lo largo de todo el frente. El valor máximo de esta categoría es de 66 metros. Como ejemplo se tienen segmentos de escarpes medianos en la parte precordillerana de La Reina, entre las quebradas de San Ramón y Macul, y desde la Quebrada de Macul hacia el sur hasta Puente Alto.

Por su parte, los escarpes pequeños van desde los 3 a los 9 metros aproximadamente. Se presentan en la zona más al norte del área de estudio, en el Cerro Calan bajo escarpes mayores, y en el extremo sur del área de trabajo en la comuna de Puente Alto.

En cuanto a los segmentos donde no aparecen datos, éstos corresponden en general a quebradas y a la unidad de abanicos de edad Pleistocena Superior a Holoceno. Existe un gran vacío de datos a la altura del límite entre las comunas de La Florida y Puente Alto, donde se encuentran mapeadas unidades de abanicos aluviales del Pleistoceno Medio a Superior y depósitos de ceniza volcánica de la Ignimbrita Pudahuel. Lo anterior, puede indicar que los escarpes existen pero que se encuentran cubiertos por estas unidades, en este caso se puede interpretar que la estructura sería anterior a estos depósitos. En el límite sur del afloramiento de la Ignimbrita Pudahuel se reconocen 2 escarpes y su morfología expresa evidencias de deformación.

Para el caso del sector sur donde la aflora la Ignimbrita Pudahuel estudios geocronológicos recientes de U/Pb en circones proponen una edad de 0,13 Ma para el evento que las generó (Pineda, 2015), por tanto, la deformación y escarpes identificados en esta unidad indican que la FSR ha tenido actividad posterior a los 0,13 Ma.

Por otro lado, se debe identificar además si los escarpes morfológicos corresponden o no a escarpes de la FSR o están asociados a otros procesos. Los saltos que podrían corresponder a terrazas fluviales se descartaron y no aparecen en la Figura 6.3. Por lo anterior, las posibilidades restantes corresponden a escarpes de falla o a escarpes asociados a procesos de remoción en masa.

Una de las zonas que llama la atención debido a su morfología, donde saltos medianos fueron reconocidos, es el sector de Alto Macul. Este corresponde a una zona alta (~850 metros de altura) que se emplaza entre dos grandes abanicos aluviales provenientes de las quebradas. Surge como un brazo discontinuo que viene de la cordillera pero con un relieve accidentado. Es por ello que mediante la fotointerpretación a partir de imágenes satelitales de *Google Earth* (Figura 6.3), se considera a este cerro como una posible remoción en masa. Por lo anterior, los escarpes presentes en este sector estarían ligados probablemente a la generación accidentada de este

movimiento de masa y no a la FSR. La Falla San Ramón podría estar ligada a la generación del deslizamiento, que pudo haber sido inducido por un sismo. Se recomienda realizar un reconocimiento en terreno para verificar esta interpretación y las otras zonas donde los escarpes se han reconocido.



Figura 6.3: En color zona escarpada del sector de Alto Macul. Fuente: Google Earth.

Por lo anterior, los escarpes identificados en el sector de Alto Macul no se consideran dentro de la proyección final, pues no corresponde a un escarpe tectónico.

Al analizar los escarpes mayores, se podría inferir que la FSR habría generado terremotos que no activan la totalidad de la estructura y sólo producen escarpes en zonas locales. Sin embargo el factor preservación juega un rol importante en la identificación y la continuidad de los escarpes. Los escarpes mayores serán los más afectados por este factor, y por ende, presentaran la peor continuidad norte sur. La zona mejor preservada solo observando la altura de los escarpes- correspondería al sector norte de la traza.

Por otro lado los escarpes pequeños se pueden reconocer en el norte, centro y sur, hecho que sustentaría que las rupturas ocurren en todos los segmentos. Este nivel de escarpes es continuo y presenta una altura semejante a lo largo de toda la traza. Por lo anterior podría inferirse que la FSR funciona como un sistema continuo y no como un sistema segmentado.

La labor realizada en este estudio viene a aportar información que puede ayudar a definir con claridad por donde pasa la traza FSR, sobre todo para los sectores en que la traza se

encuentra inferida. Al incorporar en la proyección la información sobre la traza de la falla, los escarpes coinciden muy bien con las inferencias y observaciones realizadas en trabajos anteriores.

6.2 GEOMORFOLOGÍA, URBANIZACIÓN, PELIGRO Y RIESGO

Al cruzar la información de los escarpes, donde la base de estos corresponde a la traza de la FSR, con los límites urbanos delimitados en el capítulo anterior, se genera una visualización clara del aumento de la exposición de Santiago al peligro sísmico de la FSR (Figura 6.4).

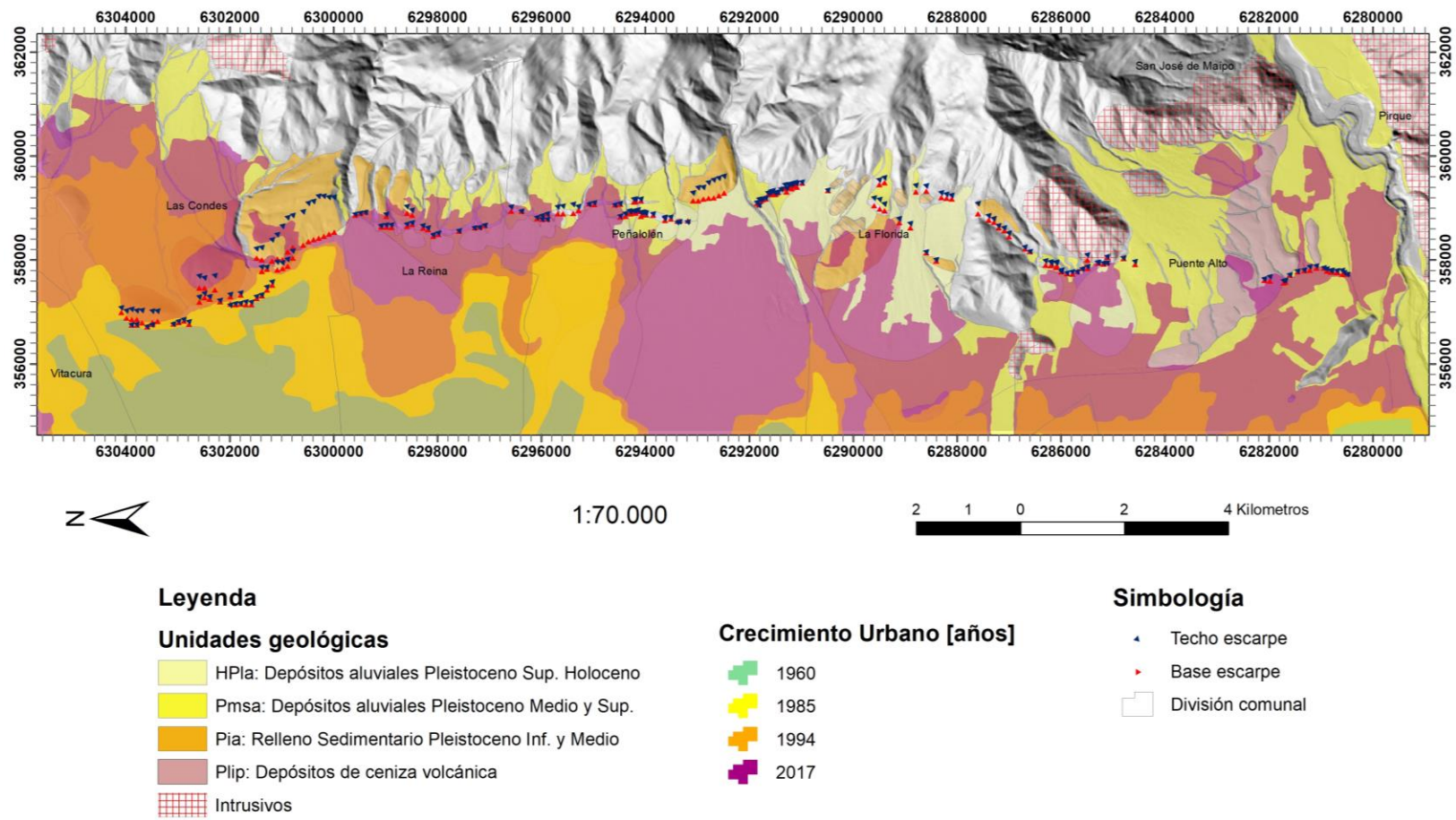


Figura 6.4: Evolución de los límites urbanos del frente cordillerano sobre los abanicos aluviales y escarpes morfológicos.

Se puede notar como la ciudad de Santiago ha ido montándose sobre los pies de la cordillera, exponiéndose cada vez más al peligro sísmico de esta estructura, presente por cierto muchos miles de años antes que los asentamientos humanos en el valle.

Al realizar un análisis de las áreas urbanizadas sobre el bloque colgante de la falla se obtienen los siguientes valores.

Tabla 4: Áreas calculadas para polígonos de urbanización. Hanging-wall como bloque sobre la traza de la falla limitada por los escarpes.

Año	Área total [km ²]	Área sobre bloque colgante [km ²]	Urbanización sobre bloque colgante, respecto área total [%]
1960	280	0	0
1985	380,63	1,37	0,36
1994	519,36	18,11	3,49
2017	811,68	57,29	7,06

Los resultados indican que el crecimiento hacia el boque colgante ha ido aumentando, sin ser proporcional al crecimiento urbano total. Hoy en día, 5.729 hectáreas se encuentran construidas sobre el bloque colgante de la Falla San Ramón, lo que es preocupante sobre todo considerando que en el año 1960 no existía urbanización en este sector. Estos valores indican una tasa promedio de urbanización hacia el este de la traza de 100,51 hectáreas por año, entre 1960 y el 2017. Una vez más este desarrollo es evidencia del sistema político y la normativa que ha regido a la RM en su crecimiento.

Al calcular la tasa promedio anual del crecimiento urbano hacia el bloque colgante entre 1994 y 2017, el valor aumenta a 170 hectáreas por año, y entre 1985 y 2017 a 174,75 hectáreas por año.

La importancia de la urbanización en el bloque colgante radica en que este bloque el que sufre las mayores aceleraciones en caso de un sismo generado por una falla. De esta forma, para dos puntos ubicados a la misma distancia de la falla, con uno en el bloque yacente y otro en el bloque colgante, es este último quien recibirá un mayor sacudimiento que puede expresarse en mayores daños.

Tomando en cuenta el menor de los valores de las tasas calculadas (100,51 ha/año), si el crecimiento hacia este bloque continúa a esta razón, en el año 2022 tendrían 6.232 hectáreas construidas al este de la Falla San Ramón. Este valor es fácilmente alcanzable, considerando que el frente montañoso ocupa el mayor porcentaje del área de la región, pero cabe cuestionarse si realmente existen terrenos disponibles para ser ocupados. La ley de la cota mil debiese regular ello, aunque existen evidencias de que esta norma no es completamente respetada (ej. El Arrayán).

Por su parte, evaluando ahora ambos bloques, se calcularon las áreas urbanas expuestas al peligro sísmico de la Falla San Ramón -es decir, la zona de riesgo- considerando la urbanización mapeada en los resultados para los años 1960, 1985, 1994 y 2017. Se consideró como base para la generación de polígonos de áreas de influencia los valores entregados por el “Estudio de

Riesgo y Modificación del PRMS Falla San Ramón” (SEREMI & MINVU, 2012). Con base en la Tabla 5, se creó la figura que incluye las áreas de peligro definidas por el estudio recién citado y la evolución de los límites urbanos (Figura 6.5).

Tabla 5: Valores de la aceleración horizontal máxima (PGA) en función de la distancia, para un evento de magnitud $M_w=7.4$. Tomado de Estudio de Riesgo y Modificación del PRMS Falla San Ramón (SEREMI & MINVU, 2012).

Distancia hacia el oeste [km]	PGA (%g)
2.0	47.0
5.0	37.0
10.0	26.0
Distancia hacia el este [km]	PGA (%g)
2.0	70.0
7.9	47.0
11.5	37.0
14.7	26.0

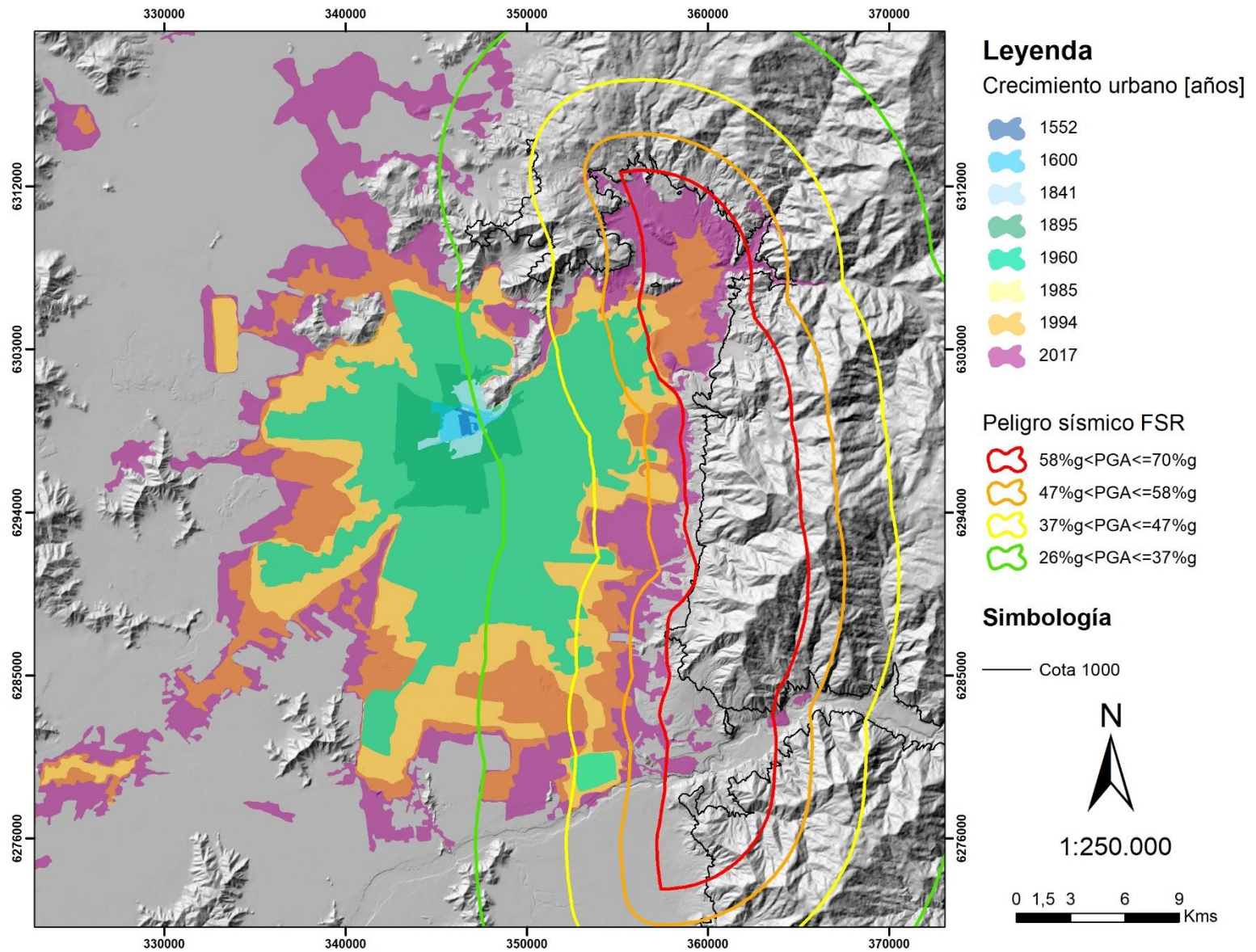


Figura 6.5: Mapa de peligro sísmico y evolución de los límites urbanos de Santiago. Elaboración propia (2018) con base en “Estudio de Riesgo y Modificación del PRMS Falla San Ramón” (SEREMI & MINVU, 2012).

A partir del mapa de la Figura 6.5 se pudo elaborar un mapa de riesgo de la Falla San Ramón, en que se utilizó como base para el peligro la fuente mencionada (SEREMI & MINVU, 2012) y como base para la vulnerabilidad física la exposición de Santiago dada por el límite urbano de 2017.

La clasificación de los grados de riesgo está basada en los PGA indicados en la Figura 6.5, cuyos valores fueron asociados a intensidades con base en Worden et al. (2010) (Figura 6.6).

Shaking	Not left	Weak	Light	Moderate	Strong	Very Strong	Severe	Violent	Extreme
Damage	None	None	None	Very light	Light	Moderate	Moderate Heavy	Heavy	Very Heavy
Max Acel (%g)	<0.19	1.9	4.4	13	24	44	83	156	>290
Max Vel (cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
Intensity	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figura 6.6: Escala de intensidad de colores de Worden et al. (2010).

Los grados se otorgaron de la siguiente forma:

- Grado muy alto a las áreas ubicadas en el rango de PGA de 58%g-70%g. Asociada a intensidades de VII y a un remezón muy fuerte.
- Grado alto a las áreas ubicadas en el rango de PGA de 47%g-58%g. Asociada a intensidades de VII y a un remezón muy fuerte.
- Grado medio-alto a las áreas ubicadas en el rango de PGA de 37%g-47%g. Asociada a intensidades de VII y a un remezón muy fuerte.
- Grado medio a las áreas ubicadas en el rango de PGA de 26%g-37%g. Asociada a intensidades de VI y a un remezón fuerte.

Con base en esta información se resume el área afectada representada en la Tabla 6 y en la Figura 6.7.

Tabla 6: Áreas urbanas en riesgo sísmico por la FSR. Elaboración propia (2018).

Año	Área de influencia [km ²]				Total de área urbana en área influencia [km ²]	Área en riesgo % del total del área de Santiago.
	PGA 58%g-70%g Muy alto	PGA 47%g-58%g Alto	PGA 37%g-48%g Medio alto	PGA 26%g-37%g Medio		
1960	0.26	7.59	29.84	73.41	111.1	39,7
1985	2.24	15.89	46.52	105.45	170.1	44,7
1994	19.33	19.53	68.52	120.16	227.54	43,8
2017	50.9	52.85	87.9	145.35	337	41,5

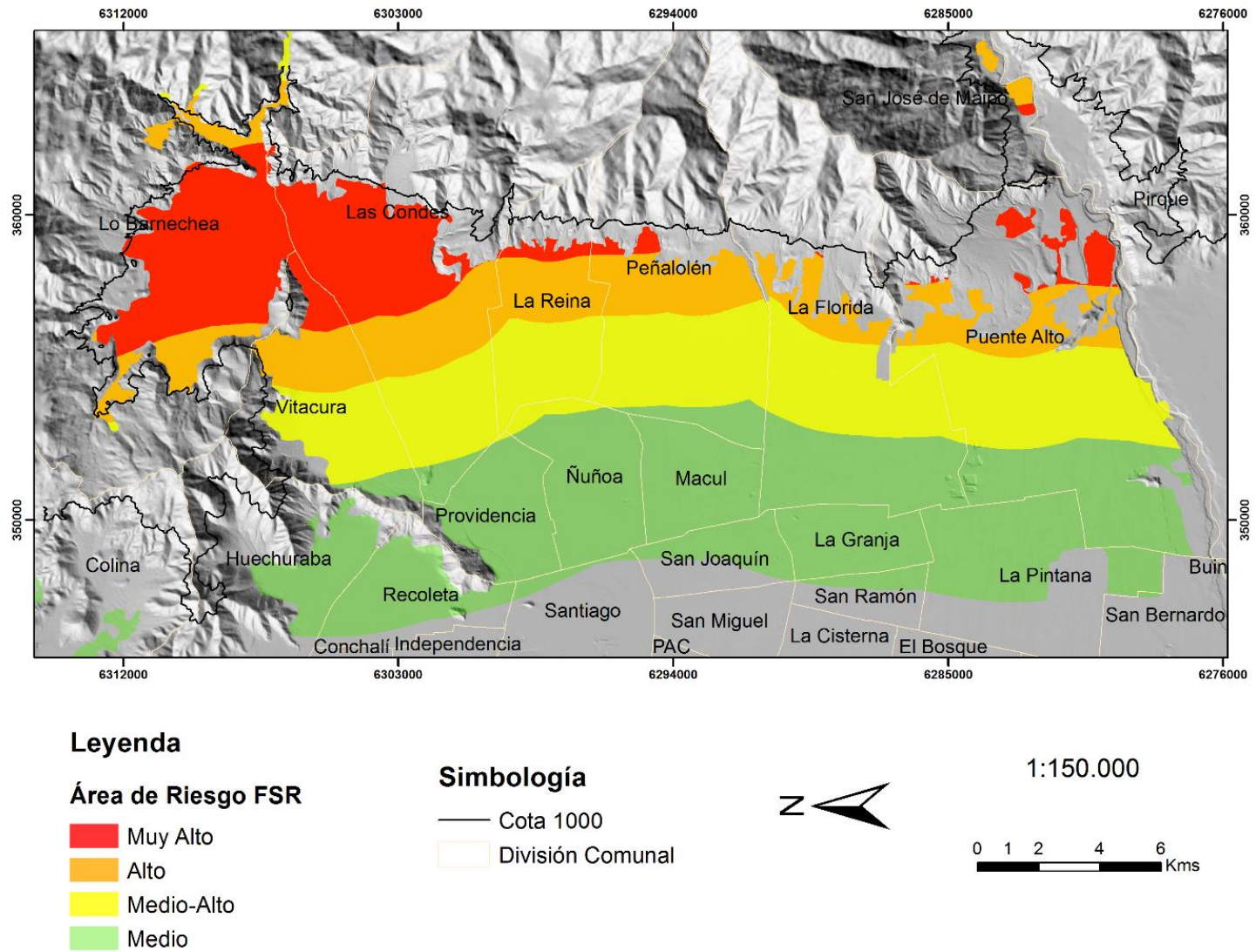


Figura 6.7: Mapa de Riesgo FSR. Elaboración propia (2018).

Cabe destacar que este mapa de riesgo (Figura 6.7) está sólo basado en el factor de la vulnerabilidad física dada por la exposición de Santiago, y que no contiene información sobre factores económicos, ambientales, ni sociales. Es por lo anterior que al adicionar estas otras aristas muy relevantes a la hora de determinar el riesgo de una población o comunidad, el grado de riesgo expresado en este trabajo puede modificarse.

Además, el mapa elaborado representa una modelación de uno de los múltiples escenarios de ruptura sísmica de la FSR. Para este caso el riesgo está asociado a un evento de $M_w=7.4$ en la FSR, por lo que en el caso de ocurrir un evento de menor magnitud los grados de riesgo serían también menores. De la misma forma, al generarse un evento de mayor magnitud la extensión de los grados de riesgo aumentaría. En esta evaluación se definió riesgo muy alto pues la estimación realizada por el estudio del SEREMI & MINVU (2012) utiliza como base un evento con ruptura en superficie, lo que aumenta el peligro y, por ende, el riesgo de la zona.

Las comunas de Las Condes y Lo Barnechea muestran en gran parte de su territorio un riesgo muy alto. Vitacura, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto muestran en mayor parte un riesgo alto y medio-alto, pero cuentan con un sector muy alto a los pies de la cordillera.

En cuanto a las comunas pericentrales como Ñuñoa, Macul, y Providencia, las caracteriza un riesgo medio; Recoleta, Santiago, San Joaquín, La Granja y La Pintana contienen áreas con riesgo medio. Para el resto de Santiago hacia el poniente, norte y sur, el riesgo disminuye a un grado bajo, debido a la atenuación que presentan los terremotos corticales, sin dejar de estar expuestas.

Vale mencionar que a pesar de que las comunas de Las Condes, Lo Barnechea y Vitacura sean las comunas con mayor riesgo sísmico asociado a la FSR, son también estas comunas las de mayores ingresos, lo que permite disminuir el riesgo “total”, pues cuentan con mejor capacidad de resiliencia y mejores condiciones en su calidad de vida, permitiéndoles abordar de mejor forma una catástrofe.

Analizando la evolución del área total influenciada por el peligro de la FSR se puede notar como desde el año 1960 al presente, el área expuesta a riesgo se ha triplicado.

A partir de los datos de la Tabla 6 es posible notar que un 41.5% del área urbanizada del Gran Santiago se encuentra expuesta si se produce un sismo de 7.4 M_w en la FSR, recibiendo aceleraciones de al menos 26%g, valor que se encuentra asociado a una intensidad de VII con posibilidad de generar daños moderados (Worden et al., 2010) (Figura 6.5). Este valor de intensidad se ve aumentado para las ocupaciones ubicadas en la precordillera, tal como la comuna de Lo Barnechea, que sufriría intensidades de entre VIII-IX en escala de Mercalli, con sacudidas violentas y un alto potencial de daño.

Capítulo 7 TERREMOTO DEL 13 DE MAYO 1647

Chile central es una de las zonas que concentran mayor sismicidad en el mundo, lo que se ve evidenciado tanto en la memoria de los chilenos, como en el registro sismológico que, gracias a la tecnología, ha podido ampliarse y detallarse de manera profunda desde mediados del siglo XX.

Previo al desarrollo tecnológico, el registro de los terremotos consistía básicamente en relatos y documentaciones de autoridades. La ocurrencia y consecuencias de los terremotos sucedidos durante los siglos XVI y XVII se encuentran documentados principalmente gracias al trabajo de los historiadores Miguel Luis Amunátegui, Diego Barros Arana, Benjamín Vicuña Mackenna y el primer Director del Servicio Sismológico de Chile, Fernand Montessus de Ballore. La información escrita de la época se puede encontrar desde la llegada de los españoles a América, cuyos los registros corresponden a manuscritos enviados al Rey de España por parte de religiosos y reportes de autoridades del gobierno local.

Como describe Miguel Amunátegui (1882), la ciudad de Santiago fue trazada por Pedro de Valdivia en el 1541, y durante el siglo XVII Chile, colonia española, dependía administrativamente del Virreinato de Perú. Para el año 1647 la población la constituían españoles, criollos e indígenas diseminados a lo largo del territorio. Las crónicas relatan que en la capital había entre 300-600 casas y unos 6 mil habitantes. La ocupación en Santiago se extendía en torno a la Plaza Mayor, actual Plaza de Armas, por tres cuadras hacia los cuatro puntos cardinales a los lados de la plaza, muy semejante a un tablero de ajedrez.

Al norte, la ciudad limitaba por la traza del río Mapocho y al sur por la Cañada -actual Alameda- que correspondía a una acequia del Mapocho. Al este, la ciudad llegaba hasta la calle de las Claras, ahora Enrique Mac Iver, y al oeste hasta Teatinos. Al poco tiempo la ciudad crecería debido al aumento poblacional, llegando al oriente hasta la calle Mesías -hoy calle Lastarria- y al poniente hasta la calle de las Cenizas -ahora calle San Martín- (Amunátegui, 1882).

Destacan en esta época los corregimientos, en los que se encontraban numerosos religiosos pertenecientes a sus diferentes órdenes (los dominicos, los franciscanos, los agustinos, los mercedarios y los jesuitas). Hacia 1647 se contaba con alrededor de 250 a 260 frailes (Vladilo, 1977).

Las construcciones de la época, según Vladilo (1977), se caracterizan por los materiales usados: piedra, ladrillo, madera, adobe y la cal como pegamento de los materiales pétreos. Este mismo autor constata que las mejores construcciones correspondían a las iglesias y templos, con muros de piedra y/o ladrillo, y techumbres de madera y tejas.

7.1 EFECTOS DEL TERREMOTO DEL 13 MAYO DE 1647

Es bajo el contexto anteriormente descrito que la noche del lunes 13 de mayo de 1647 se convirtió en una tragedia para los pocos habitantes de Chile central. Con una hermosa luna iluminando la ciudad a eso de las 22.30 en horario local, un fuerte terremoto afectó al territorio, con especial fuerza en la capital, Santiago. Sin actividad precursora se desató un movimiento sísmico que derrumbó casi simultáneamente la mayoría de la infraestructura de la ciudad, exceptuando unos pocos edificios.

En el cerro Santa Lucía ocurrieron estrepitosas caídas de rocas que causaron daños de magnitud en su trayectoria. El gran ruido subterráneo al lado de la cordillera es coincidente en la mayoría de los relatos y crónicas, indicando también caída de rocas en Los Andes. Se registra también la generación de grietas, muchas de ellas profundas, en los caminos en que en algunos sectores afloraban aguas turbias que expelían un olor insoportable (Barros Arana, 1889).

Respecto a la duración, hay algunos registros claramente sobredimensionados que mencionan una duración de media hora, y otros genéricos que mencionan que el remezón fue muy violeto y se prolongó algunos minutos (Barros Arana, 1889). Fray Villarroel (1647) registra una duración de medio cuarto de hora (7-8 min), mientras que los oficiales reales de la tesorería aseveran que el terremoto duró tres credos rezados. Por su parte, el oidor Nicolás de Santillana asegura que duró cuatro credos (Amunátegui, 1882).

En relación a este último criterio para representar la duración del sismo, se realizaron oraciones del credo en tres distintos ritmos: un ritmo rápido que entregó una duración de 21.53 segundos, un ritmo normal que entregó una duración de 31.77 segundos, y un ritmo lento de 41.07 segundos. Considerando estas mediciones se tendría un rango de duración del sismo con el ritmo más rápido de 65 – 87 segundos (1 min – 1 minuto y medio); un rango a ritmo normal de 96 - 127 segundos (1 minuto y medio – 2 minutos); y un rango con un ritmo lento de 124 – 165 segundos (2 minutos – 2 minutos y 45 segundos). Montessus de Ballore (1912) entrega una duración de 180 segundos, es decir, 3 minutos para este terremoto.

Sobre la zona afectada, se tienen reportes desde 30 leguas (167 km) hasta 100 leguas (557 km) (Udías et al., 2012). Otros indican que generó estragos entre el Río Choapa y el Maule (Los Oidores, 1648). También se reporta que fue percibido desde el río Limarí al norte, hasta Cauquenes al sur (Villarroel, 1647). Se señala que desde el Cuyo al otro lado de Los Andes se escucharon estrepitosos ruidos subterráneos que vendrían de la Cordillera, pero no se reportaron daños en esta zona (Los Oidores, 1648; Barros Arana, 1889). El gobernador que se encontraba en Concepción tampoco reportó daños en esta ciudad (Amunátegui, 1882).

En cuanto a sismos precursores, sólo se menciona que el 6 de septiembre de 1643 hubo un sismo en la ciudad que provocó temor en los habitantes (Barros Arana, 1889). Otras fuentes señalan que el movimiento sísmico vino sin previsión (Villarroel, 1647). Por otro lado, hay registro de varias fuentes que coinciden en la gran cantidad de réplicas, en la misma noche, los días siguientes y durante los meses próximos del gran evento de 1647, en que todos los sismos ocurridos fueron menores en magnitud al principal (Udías et al., 2012).

Todos los daños reportados correspondían a la ciudad de Santiago, donde incluso existen estudios detallados de los edificios afectados por el terremoto, y se registra que un hombre en el

Valle de Quillota habría caído en una zanja generada por el sismo (Lomnitz, 1970). No se reportan registros de tsunamis para la costa central del país, ni se menciona en los documentos consultados de la ciudad de Valparaíso. Sin embargo, se registran marejadas y olas en la ciudad de Cuzco (Los Oidores, 1648), las que estarían asociadas a otro evento sísmico ocurrido posteriormente en Perú.

El terremoto causó la muerte de 1000 personas en todo el Reino de Chile, lo que correspondía a un quinto de la población de la época.

Las estimaciones a partir de los relatos son de 8 de magnitud por Lomnitz (2004), y la intensidad entre X-XI en escala de Mercalli modificada (Udías et al., 2012). Se concluye que el epicentro está cerca de la ciudad de Santiago. Lomnitz (1970) lo ubica en el límite entre el Valle Central y la Cordillera de la Costa, mientras que Montessus de Ballore (1912) asume que Quillota sería el epicentro de la región. Lomnitz (2004) asocia este evento con la Falla San Ramón en los pies de la Cordillera de Los Andes en Santiago, y Cisternas (2012) entiende este terremoto como un sismo con epicentro en Santiago de tipo intraplaca de profundidad intermedia.

A continuación se adjunta la Tabla 7, con las principales fuentes utilizadas y los extractos significativos para interpretar la fuente sísmica del terremoto del 13 de mayo de 1647.

Tabla 7: Recopilación bibliográfica sobre terremoto del 13 mayo de 1647.

Fuente	Autor	Fecha	Cita
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>a las 10 i media, medio cuarto más, empezó el temblor</i>
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>sin prevención ni amenaza</i>
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>(...) se arruinaron en un momento los edificios todos, sin que hubiese más que un instante que pudiese hacer continuación entre el temblar y el caer</i>
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>duró el temblor como medio cuarto de hora</i>
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>Padre Pedro Moyano, visitador del arzobispado y cura de Aconcagua afirma con juramento que "se le oyó en la cordillera, desde Cierra Nevada a 15 leguas de Santiago"</i>
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>en 23 días habrá temblado setenta veces</i>
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>grietas en la plaza y caminos</i>
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>i habiendo sucedido lo mismo en 100 leguas, entre Cauquenes y Limarí</i>

Santiago de Chile			
Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile	Fray Gaspar de Villarroel	09/06/1647	<i>ni árboles se sostenían</i>
Carta de la Real Audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647	Los Oidores	12/07/1648	<i>Estragos de Maule a Choapa</i>
Carta de la Real Audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647	Los Oidores	12/07/1648	<i>Muerte de mil personas</i>
Carta de la Real Audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647	Los Oidores	12/07/1648	<i>se han ido repitiendo más de 300 temblores pequeños</i>
Carta de la Real Audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647	Los Oidores	12/07/1648	<i>en Choapa duro tres cuartos de hora la artillería debajo de la tierra</i>
Carta de la Real Audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647	Los Oidores	12/07/1648	<i>en Cuyo al otro lado de la cordillera, pasado el terremoto duro media hora el ruido en los cóncavos de ella que juzgaron que se daban batalla los montes</i>
Carta de la Real Audiencia de Chile	Los Oidores	12/07/1648	<i>a la misma hora había temblado en la ciudad de Cuzco, sin haber hecho daño</i>

sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647			
Carta de la Real Audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647	Los Oidores	12/07/1648	<i>se salió el mar furiosamente en el puerto del Callao</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>al amanecer del domingo 6 de setiembre de 1643, la ciudad de Santiago experimentó una violenta sacudida, que sembró terror entre sus pobladores, y que puede considerarse precursora del terremoto de Mayo de 1647</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>violento remezón que se prolongó por algunos minutos</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>el estrépito causado por los peñascos, desprendiéndose del cerro Santa Lucia, se precipitaban con una fuerza irresistible por las calles vecinas</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>la tierra continuaba estremeciéndose de tiempo en tiempo</i>

Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>Los temblores siguieron repitiéndose los días subsiguientes, pero con menos intensidad, y con intervalos cada vez más largos</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>el centro de la conmoción había sido el valle de Santiago, el sacudimiento se había sentido en Chile hasta Valdivia, y del otro lado de la cordillera en Cuyo, con espantosos ruidos subterráneos al lado de la cordillera</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>territorio comprendido entre Choapa al norte y Maule al sur era el que había sufrido los mayores estragos</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>En muchas partes la tierra se había rasgado formando grietas, algunas que afloraban aguas turbias impregnadas de gases que despedían un olor insoportable</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>De algunos montes se desprendieron peñascos que pueden servir de cerros no pequeños donde pararon</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de	Diego Barros Arana	1889	<i>En otras partes, se secaron los manantiales que siempre habían dado agua abundante</i>

mayo, Historia Jeneral de Chile IV			
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>Más de mil los muertos en todo el reino</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>En toda la costa, hasta el puerto del Callao, el mar sin ningún viento, se agito furiosamente formando olas colosales que azotaban la tierra, como ha ocurrido en cataclismos similares</i>
Gobierno de don Martín de Mujica (1646-1648): el terremoto del 13 de mayo, Historia Jeneral de Chile IV	Diego Barros Arana	1889	<i>Habría sido curioso estudiar los efectos geológicos del terremoto. Todo hace creer que se produjo un solevantamiento de la costa, más sensible quizás que los que han producido otros cataclismos de esta naturaleza</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>El trece de mayo fue un lunes</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>serian aproximadamente las diez y media de la noche según la visión más general</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>una hermosa luna iluminó desde el cielo la ciudad</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>El estruendo fue tan estrepitoso que hubiera podido creerse que la vecina cordillera de los Andes, destruida por haber estallado en sus entrañas una mina formidable, había saltado en pedazos</i>

El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>Grandes peñascos, algunos de considerable tamaño, se desprendieron del cerro Santa Lucia, y rodaron hasta considerable distancia, causando en el trayecto daños de magnitud</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>los oficiales reales de la tesorería aseveran que el terremoto duró tres credos rezados”, “El oidor don Nicolás de Santillana asegura que duró el espacio de cuatro credos”</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>Villarroel dice que lo recio del terremoto duró medio cuarto de hora</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>Continuos ruidos subterráneos, y frecuentes oscilaciones del suelo</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>Citando a Villarroel “se abrieron en la plaza muchas grietas, y en los caminos tan hondas, que, como conmovidos los abismos, rebosaron las sentinas, despidiendo aguas de mal olor, y grande suma de arena, a diez y doce leguas del mar”</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>Citando a la real audiencia (03/06/1648) “Corrió su estruendo hasta Buenos Aires; y por parte de la costa, hasta Valdivia; y no hizo daño a esas partes; solo el ruido fue atroz, y casi un año entero, se continuaron otros temblores pequeños, y aquella noche hubo trece temblores”</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>los deterioros i trastornos causados por el terremoto debieron ser mui considerables, cuando, en un país con semejantes condiciones, llegaron a escasear, como consta de las actas del cabildo antes insertas, la carne, el vino, i los otros bastimentos</i>

El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>Los odores dirijieron al rei, con fecha 12 de julio de 1648, un largo informe sobre el terremoto i sus consecuencias. En este documento, se lee lo que sigue: “Hánse reconocido violencias terribles en todas las partes de este país. Abortó la tierra, por los esteros, i abras, i cavidades hondas, raudales tan furiosos de agua tan turbia, que parecía sangre, i de tan mal olor, que inficionaba las vecindades comarcanas. Mudáronse las veredas de los caminos; secándose los manantiales que, en mucho tiempo, no dieron agua</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>(...) porque, por espacio de dos meses i medios después del terremoto que causó las ruinas, se repitieron más de ciento i veinte temblores, algunos de ellos mui tremendos, que parecía que la tierra estaba sacudiéndose de sí el peso de los vicios, í mostrando señales de indignación, que solo el considerarlo hace estremecer</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>Fueron tan grandes las aberturas de la tierra, i las bocas que abrió, que una de ellas se tragó todo el rio de Teno, que es bien caudaloso; i en seis días, no corrió gota de agua. Lo mismo le sucedió al rio de Quillota por la boca de Concón, que con ser rio grande, se pasaba casi a pié enjuto. En otras partes, se abrió la tierra en horribles bocas; i en el mismo valle de Quillota, una de estas aberturas se tragaba a un hombre, quien, para no hundirse, se puso en cruz para sustentarse en los brazos (...)</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>se allegó el haberse oído en Pelvín, cuatro leguas de Santiago, debajo de la tierra, grandes estruendos, como de piezas de artillería</i>
El terremoto del 13 de mayo de 1647	Miguel Luis Amunategui	1882	<i>El presidente-gobernador don Martín de Mujica, se hallaba en el sur de Chile cuando ocurrió el terremoto del 13 de mayo, quiso que la ciudad de Santiago hiciera a la Virgen un voto parecido a aquel con que la ciudad de Concepción se había obligado en el año 1570, i que, según él pensaba, la había preservado hasta la fecha de una nueva catástrofe.</i>

7.2 ANÁLISIS DE LA FUENTE SÍSMICA DEL TERREMOTO DEL 13 DE MAYO 1647

El estudio de los terremotos históricos tiene un carácter problemático dado por la poca precisión y exactitud de los datos, debido a que la principal fuente corresponde a relatos que pueden tener una representación subjetiva. Sin embargo, mediante la comparación de las fuentes se pueden concluir aspectos importantes.

El terremoto de mayo de 1647, ocurrido a eso de las 22.30 hrs del día lunes 13 de mayo, provocó daños catastróficos en Santiago y fue percibido entre las actuales IV y VII regiones.

El principal aspecto en debate para este terremoto es el origen del sismo. Como fue descrito en el Marco Geotectónico, en Chile pueden ocurrir 4 tipos de sismos debido a su contexto de subducción de placas: *outer-rise*; sismos interplaca tipo *thrust*; intraplaca de profundidad intermedia; y superficiales o corticales.

La mayoría de los autores consultados excluyen la fuente de tipo *outer-rise*, debido a que este tipo de terremotos tienen epicentro en el mar, fuera del continente, y suelen producir tsunamis pero no grandes daños en el continente, menos aún en los valles centrales. Es por lo anterior que esta fuente sismogénica es descartable para el terremoto de mayo de 1647.

Por otro lado, se tienen los terremotos interplaca tipo *thrust*, fuente de los mayores eventos ocurridos en Chile. Un ejemplo de ello es el terremoto de Valparaíso de 1906, el cual presentó mayores intensidades en la zona de la costa y menores a los pies de la cordillera de los Andes (Astroza & Astroza, 2008). Este terremoto fue percibido entre Valdivia y La Serena. En este ejemplo se ven representadas características como la extensa área afectada y la atenuación de la intensidad de costa a cordillera que tienen estos sismos.

Al comparar estas características, el sismo del 13 de mayo de 1647 tiene como punto a favor de la fuente interplaca tipo *thrust*, la gran área afectada relatada por algunas fuentes. Sin embargo, es en la zona del valle central y cercano a la cordillera donde se ubica la mayor intensidad descrita por los cronistas e investigadores. Por otro lado, se tienen ejemplos como el terremoto de 2010 del Maule, el cual corresponde a un interplaca tipo *thrust* que generó un tsunami que afectó fuertemente a la costa en torno a la zona de ruptura. La generación de un tsunami en el caso de mayo de 1647 es una característica ausente, lo que permite poner en duda si realmente el evento estudiado tendría una fuente del tipo *thrust*. Otro aspecto que podría llamar la atención si fuese un evento interplaca, sería el hecho de que ni en Valparaíso ni en Concepción se reporten fuertes daños como en Santiago, pues en el caso de ser un evento tipo *thrust* ocurriría frente a Valparaíso. Se debe tener en cuenta que debido a la escasa población de la época, el mayor desarrollo estaba en la capital y por tanto los datos más precisos para la infraestructura afectada están asociados a esta ciudad, lo que no necesariamente indica que en Valparaíso no haya habido un sismo de alta intensidad.

En relación a la fuente intraplaca de profundidad intermedia, son reconocidos como eventos muy catastróficos, con foco en el continente, profundidades mayores a 60 km y la ausencia de tsunamis. Un ejemplo es el terremoto de Chillán de 1939, conocido como el sismo que más víctimas fatales ha dejado en la historia sísmica de Chile -5.880 fue la cifra oficial- (Astroza & Astroza, 2008). Este sismo se percibió entre Coquimbo y Puerto Montt, con gran intensidad para las regiones VII y VIII. La localización de los hipocentros de los sismos intraplaca de

profundidad intermedia en Chile ocurre bajo el valle central, debido justamente a su profundidad. Estas características permiten asociar el terremoto de mayo de 1647 con la fuente de tipo intraplaca, como lo hace Cisternas (2012), quien fundamenta su análisis basándose principalmente en el carácter catastrófico en el valle central y la extensión en que el sismo fue percibido.

Utilizando las fórmulas de atenuación de aceleración máxima horizontal para terremotos de tipo intraplaca de profundidad intermedia propuestas por Ruiz & Saragoni (2005):

$$a_H = \frac{3840 * e^{1.2 * M}}{(R + 80)^{2.16}}$$

Se utilizó la magnitud (M) propuesta por Lomnitz (2004) de ~8, y un R correspondiente a la distancia hipocentral de 70 km, estimada con base en la profundidad del slab en la latitud de Santiago (Hayes et al., 2012). Lo que entregó un valor de aceleración horizontal de 1.540 cm/s², equivalente a 154 (%g), considerando g como 980 cm/s².

Con base en la escala de intensidad de colores de Worden et al. (2010) se obtiene que la aceleración máxima (%g) de 154 estaría asociado a una sacudida violenta y daños altos con intensidad de IX en escala Mercalli (Figura 7.1) para el terremoto de mayo de 1647, si tuviera una fuente sismogénica intraplaca de profundidad intermedia. Este valor está por debajo del estimado por Udías et al. (2012) de X-XI.

Shaking	Not left	Weak	Light	Moderate	Strong	Very Strong	Severe	Violent	Extreme
Damage	None	None	None	Very light	Light	Moderate	Moderate Heavy	Heavy	Very Heavy
Max Acel (%g)	<0.19	1.9	4.4	13	24	44	83	156	>290
Max Vel (cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
Intensity	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figura 7.1: Escala de intensidad de colores de Worden et al. (2010).

Se tienen por último los sismos corticales o superficiales que en Chile ocurren en la zona cordillerana, entre los que destaca en Chile central el evento de Las Melosas de 1958, con la secuencia de 3 sismos de magnitudes 6.9, 6.7 y 6.8 (Sepulveda et al., 2008). Se caracterizan por ocurrir a menos de 15 km de profundidad, y los que han sucedido en Chile han tenido epicentro lejos de ciudades importantes, provocando escasos daños (Astroza & Astroza, 2008). Este tipo de sismos presenta una importante tasa de atenuación que produce que los daños se concentren en un área reducida debido a su poca profundidad focal (Figura 7.2).

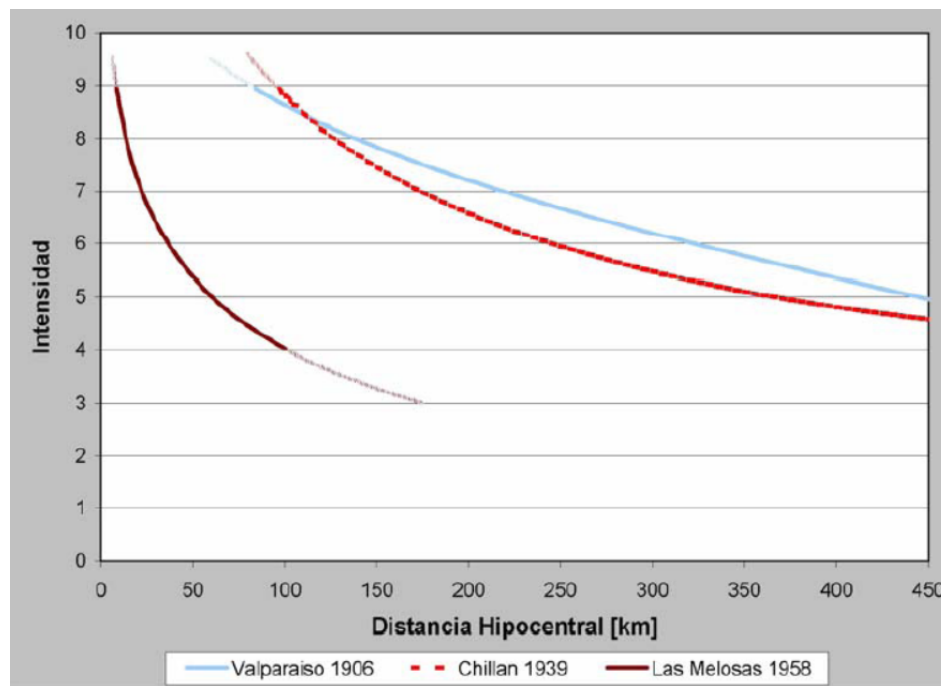


Figura 7.2: Atenuación de la intensidad con la distancia hipocentral para 3 eventos chilenos. Tomado de “Comparación de los daños producidos por terremotos chilenos con diferente fuentes sismogénicas” de Astroza & Astroza (2008).

Al comparar estas características con el terremoto de mayo de 1647 coincide la alta intensidad cerca del epicentro (Santiago) y la ubicación en la zona cordillerana como relatan algunos documentos. Lomnitz (2004) relaciona este evento con la Falla San Ramón, pero no realiza un análisis de esta asociación. Pese a que puede tener sentido que la FSR esté relacionada con el terremoto de 1647, principalmente por su ubicación y los fuertes daños producidos en Santiago, uno de los hechos que llaman la atención es la extensión en que el terremoto fue percibido. Actualmente se han reconocido solo 30 km de extensión para la estructura entre el río Mapocho y Maipo, pero existen estructuras al norte y al sur que podrían formar parte del mismo sistema.

El estudio realizado por Vargas et al. (2014) estima para 35 km de traza de la FSR con un desplazamiento vertical de 5 m, una magnitud de $M_w=7.5$. Este valor está bajo lo estimado por Lomnitz (2004), de ~ 8 . Con lo anterior, se puede plantear que para generar un sismo de mayor magnitud la zona de ruptura y por tanto el largo de la falla tendría que ser mayor, extendiendo la traza hacia el norte y al sur. Si bien existen estudios que relacionan a la FSR con el Sistema de Falla Pucuro, ubicado en el sector de Los Andes, no hay evidencias que corroboren esta hipótesis. La posibilidad de que el tramo que genere deslizamiento en la falla sea mayor a los 35 km de traza reconocida, podría explicar también la extensión, la cual tiene reporte de daños hasta Quillota, y fue percibido entre el río Limarí al norte y el Maule al sur.

Considerando este evento como un sismo generado por una falla, otro aspecto relevante es el hecho de que no genere un escarpe superficial, como los encontrados para la FSR asociados a eventos hace 17-19 ka y hace 8 ka. Sin embargo, existen fuertes sismos superficiales que no han generado ruptura superficial. Respecto a este tipo de terremotos, Kagawa et al. (2004) indica que los sismos que no tienen ruptura superficial generan mayores movimientos en el suelo que los que si la tienen. Este mismo estudio demuestra que los sismos con ruptura en superficie tienen

área de ruptura total 1.5 veces el área de los terremotos “enterrados”. Para el caso chileno, ningún sismo del tipo cortical ocurrido en el último siglo ha generado ruptura superficial (Santibáñez et al., 2015).

Bajo estas condiciones se busca evaluar los parámetros necesarios para producir un sismo capaz de generar el nivel de daños del 13 de mayo de 1647, sin ruptura en superficie, ocasionado por la FSR, y que pueda ser percibido entre las IV y VII regiones.

Según la tabla ESI 2007 (Michetti et al., 2007), con intensidades de VII en escala de Mercalli, las rupturas superficiales pueden ser raras y locales del orden de centímetros, en caso de existir. Al revisar la escala de colores de intensidades de Worden et al. (2010) (Figura 7.1), una intensidad de VII produciría sacudidas muy fuertes y daños moderados, con 44 %g bajo las condiciones de construcciones civiles actuales. Se debe considerar que para el terremoto de mayo de 1647 los principales materiales eran adobe, madera y piedra para las mejores edificaciones (iglesias y templos). Por tanto, la ciudad de Santiago colonial expuesta a 44%g sufriría intensos daños.

ESI-2007	PRIMARY EFFECTS		SECONDARY EFFECTS WITH GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL RECORD				OTHER SECONDARY EFFECTS		AFFECTED AREA AND TYPE OF RECORD		
	SURFACE RUPTURES	TECTONIC UPLIFT/SUBSID	GROUND CRACKS	SLOPE MOVEMENTS	LIQUEFACTION PROCESSES	ANOMALOUS WAVES AND TSUNAMIS	HYDROGEOLOGICAL ANOMALIES	TREE SHAKING	Affected AREA	Type of RECORD	
OBSERVED DAMAGING	IV	Offset	Length	Width	Length	ENVIRONMENTAL EFFECTS ARE VERY RARE AND CANNOT BE USED AS DIAGNOSTIC					
		ABSENT	ABSENT	Rare and local	Rare and local	Only devaluated levels (seismites)	cm	Temporary sea-level changes	Temporary level changes	Rare and local	Geological frequent and exceptionally geomorphological
DESTRUCTIVE	VII	Rare and local	Permanent ground dislocations (< 10 cm)	mm	mm	50 cm	dm	Temp. turbidity changes	Local within epicentral zone	Geological frequent and exceptionally geomorphological	
		cm	< 1 m	cm	10 ³ m ³	1 m	1-2 m	Temp. F+Q changes	100 km ²		
DESTRUCTIVE	VIII	dm	< 10 m	m	10 ³ -10 ⁴ m ³	0.5 m	3-5 m	Temp. temperature changes	1,000 km ²	Geological characteristic and frequently geomorphological	
		km	> 10 m	dm	10 ⁴ -10 ⁵ m ³	1 m	> 10 m	Temp. spring drying	5,000 km ²		
VERY DESTRUCTIVE	X	10-100 km	> 10 m	m	> 10 ⁶ m ³	0.5 m	Tsunamis	Permanent river changes	10,000 km ²	Geological characteristic and frequently geomorphological	
		metric	> 10 m	m	Giant Landslides	> 5 m	Giant waves	Tree branches and tree-trunk falling, rupture, etc...	50,000 km ²		
DEVASTATING	XI	> 100 km	> 10 m	m	Far-field (200-300 km) significant landsliding	0.5 m				Geological characteristic and frequently geomorphological	
		> 100 km	> 10 m	m							
		Dip and strike-slip offset of coseismic ruptures	Permanent ground dislocation	Width and length of cracks and fractures in soils and rocks	Bulk volume of mobilised material	Dimension of liquified levels and sand boils	Transitory sea-level changes, standing waves and Tsunamis	Base-level changes in springs, rivers, aquifers			

Figura 7.3: Tabla ESI-2007, Fuente: Michetti et al., (2007).

Otro aspecto importante a considerar para determinar el origen del sismo es la duración. En el caso de este terremoto, la duración relatada por Montessus de Ballore (1912) es de 3 minutos. La estimación realizada en este trabajo a partir de los relatos que indicaban tres a cuatro credos como duración, entregaron 3 posibles rangos de valores:

Tabla 8: Duraciones del terremoto de mayo de 1647 con base en la oración del credo. Elaboración propia.

Ritmo	Rango de duración [s]
Rápido	65-87
Normal	96-127
Lento	124-165

En general, un sismo cortical debe tener una duración menor versus los sismos de tipo interplaca e intraplaca. Al comparar estos valores con otros eventos, se tiene que el terremoto del Maule de 2010 tuvo una duración de 2 minutos y medio (Saragoni, 2011). En cuanto a la duración, también se debe considerar el efecto de sitio, que puede prolongar la duración del movimiento sísmico. Los tres rangos estimados tienen sentido como duración de un sismo, particularmente el ritmo rápido y normal para un terremoto cortical.

Es importante considerar la percepción del tiempo durante una situación de riesgo, ya que ésta se ve afectada. Estudios científicos indican que el cerebro en situaciones de peligro es capaz de mantener su percepción normal del tiempo, sin embargo, es la memoria la que posteriormente alarga la duración de los recuerdos (Stetson, Fiesta, & Eagleman, 2007). De esta manera, la duración entregada por algunos relatos podría estar sobreestimada.

Por otro lado, si efectivamente los credos indicados como referencia para la duración fueron rezados mientras el terremoto ocurría, puede influir el factor estrés, el cual aumenta los niveles de adrenalina, acelera el corazón y las acciones realizadas se suelen acelerar, siendo más lógico rezar en un ritmo acelerado bajo una situación de peligro. Bajo esta hipótesis, se optaría por el ritmo rápido y por tanto el rango de duración de 65-87 segundos. Un tiempo prudente y lógico para un terremoto provocado por la FSR.

Se debe tener en cuenta también los deslizamientos y caídas de roca generados en la cordillera de los Andes y en el cerro Santa Lucía descritos en los relatos. Estas remociones inducidas por un evento sísmico pueden asociarse a magnitudes para haber sido generadas. Según el estudio de Keefer (1984), para producir caída de bloques o deslizamientos disgregados, la distancia máxima desde la falla o zona de ruptura para un evento de magnitud 7.5 sería de poco más de 100 km. Lo anterior tiene sentido para caídas de roca en el cerro Santa Lucía y deslizamientos en el sector cordillerano de Santiago, si la FSR fuese la fuente del terremoto. Deslizamientos o caídas de rocas en el cerro Santa Lucía no han ocurrido en la historia reciente, ni han sido relatadas en otros eventos históricos.

Sin embargo, cabe destacar que en el valle de Quillota existe el registro de que un hombre cayó en un socavón generado por el terremoto. Este fenómeno podría entrar en la categoría de movimientos de masa asociados a la licuefacción del suelo de Keefer (1984), donde plantea que la distancia máxima para producir este tipo de evento con una magnitud de 7.5 es de alrededor de 200 km del epicentro. Quillota se encuentra alrededor de 95 kilómetros de distancia en línea recta desde la traza de la FSR en Santiago, por tanto podría ser posible.

En resumen, el terremoto del 13 mayo de 1647 conocido como el gran terremoto de Santiago, cumple con suficientes características para ser asociado a la FSR. Sin embargo, la principal limitación para relacionarlo es la ausencia de ruptura en superficie, lo que limita la

magnitud máxima del sismo, que se relaciona con la extensión en que este puede ser percibido. Esto podría resolverse si la FSR estuviese compuesta no solo de los 35 km de traza reconocida por Armijo et al. (2010), si no que correspondiera a un sistema mayor y segmentado que para este evento activó gran parte de sus tramos, y que tal vez sí generó ruptura en algún segmento, sobre todo hacia el norte, para poder explicar los daños en el valle de Quillota.

El análisis de las características propone como posible fuente del terremoto del 13 de mayo de 1647 a la fuente intraplaca de profundidad intermedia, con epicentro bajo el valle de Santiago.

Capítulo 8 DISCUSIÓN

8.1 LÍMITES URBANOS

Los resultados entregados en el Capítulo 5 ilustran y describen el crecimiento de Santiago, el cual ha sido constante en el tiempo. Sin embargo, la forma en que el territorio ha crecido no ha sido sustentable ni coherente incluso con las normativas vigentes. Como se mencionó el crecimiento de Santiago tiene directa relación con las modificaciones a la norma, las cuales se ven resumidas a continuación:

Tabla 9: Instrumentos de Planificación Territorial y sus modificaciones. Tomado de Aguirre (2010).

Instrumento	Acción/poder del Estado	Acción/poder de los privados	Principales características	Límite urbano
PRIS 1960	Muy alta	Muy baja	Estado aporta la infraestructura y privados realizan los proyectos	Existe y es respetado
DS 420 1979	Casi nula	Casi completa	El privado hace casi todo, el Estado solo mantiene la construcción de viviendas sociales	No existe
PRMS 1994	Alta	Baja	El privado puede desarrollar sus proyectos, pero con una normativa muy estricta. Los monopolios naturales privatizados son los protagonistas.	Existe, pero es vulnerable
PRMS 1997	Media	Muy Alta	Los privados pueden generar sus condominios fuera del Límite urbano, pagando la urbanización y redes, fuera de pasar por el Sistema de impacto vial y ambiental. El estado solo financia las viviendas sociales, mediante un subsidio directo.	Existe pero no se respeta por las ZUC

Sobre las características expuestas en la Tabla 9, se puede desprender cómo la acción del Estado y de los privados se ha ido compartiendo, y no de forma equitativa, a lo largo de las modificaciones que han sufrido los instrumentos de planificación. Asimismo, durante el siglo

XXI han existido nuevas modificaciones, como el caso del PRMS 2003 y de la más reciente conocida como PRMS 100 aprobada en 2013. Esta última incluye 10.000 ha que pasaron de tener un uso agrícola a urbano, dónde según las especificaciones de esta modificación, el 25% del total del área incorporada debe corresponder a áreas verdes. Las hectáreas añadidas son distribuidas en ocho comunas: Quilicura, Renca, Pudahuel, Cerro Navia, Maipú, San Bernardo, La Pintana y Puente Alto (Figura 5.11). Se busca que para estas áreas exista un 30% de viviendas que puedan ser beneficiadas por subsidios y un 12% de viviendas sociales, intentando atacar la desigualdad y segregación social en que vive Santiago.

Específicamente para el área de estudio, la modificación más importante fue la de 1979, que abrió la zona del piedemonte a la urbanización con el Decreto Supremo (DS) 420. Antes de esto, el PRMS de 1960 entendía el frente cordillerano como una zona recreacional y turística, con alto valor en su calidad paisajística para la metrópolis. El piedemonte estaba formado por una banda de territorio de 5 km de ancho para la absorción de las aguas. En ese período la temática de los riesgos naturales no era desconocida, pero tampoco era tan explícita, ni contaba con el nivel de antecedentes que se tiene hoy. En este plan la temática de la pendiente no era considerada, así como tampoco los conos de deyección ni abanicos; se entendía que la urbanización en la zona plana estaba menos expuesta a riesgos y que la mínima ocupación contribuía a preservar los terrenos de cortes, entubamientos de quebradas y otras intervenciones, tan frecuentes como nocivas (Ferrando, 2008).

Ahora bien, como fue mencionado, los responsables de la expansión han sido el Estado y los privados. Sin embargo, son estos últimos quienes han acelerado el crecimiento de la mancha urbana, originando la habitabilidad de terrenos antes dispuestos para uso agrícola o áreas ecológicas mediante la especulación inmobiliaria.

Sin duda el riesgo no es una preocupación del sistema económico, en que el mercado busca generar rentabilidad de los suelos utilizados. Sobre el área de estudio, vale destacar que los principales agentes compradores de las inmobiliarias en el sector oriente han sido las clases medias y altas, quienes buscando mejores condiciones para su calidad de vida, alejados del ruido excesivo y las amenazas (ej. delincuencia) que aquejan al centro de Santiago han llegado a habitar áreas expuestas a mayor peligro. Ejemplo de ello son los condominios de Las Pircas en Peñalolén, ubicados sobre abanicos aluviales activos, amenazados por la Quebrada de Macul. Además, a esto se suma la creación de viviendas sociales en áreas periféricas y expuestas, como el caso de los abundantes proyectos entregados para familias vulnerables en la comuna de Peñalolén, como las viviendas de la Población Los Microbuseros, también conocidas popularmente como “Casas Chubis” (Figura 8.1).



Figura 8.1: Ubicación de condominio Las Pircas y viviendas sociales “Casas Chubi” sobre abanico aluvial de Quebrada de Macul en comuna de Peñalolen. Fuente: Google Earth.

El área aún no urbanizada del sector precordillerano se encuentra en la categoría rural, y sobre la dispersión urbana hacia las áreas rurales, Heinrichs et al. (2009) plantea que éstas continúan “desprotegidas” y expuestas a la presión de los intereses del desarrollo inmobiliario.

En relación a la vulnerabilidad en el piedemonte, toda el área urbanizada sería vulnerable considerando el factor físico que es encontrarse ahí emplazada. Pero además las áreas mapeadas en los resultados están constituidas no sólo por hogares o edificaciones comunes entre Lo Barnechea y Puente Alto, si no que por universidades (Universidad Adolfo Ibañez, Universidad SEK), numerosos colegios, centros de salud (ej: Hospital de Carabineros), el Reactor Nuclear de La Reina, compañías de bomberos, entre otras edificaciones como clubes, estadios, etc. La importancia de estos lugares es que son construcciones que reúnen grandes cantidades de personas, y/o que corresponden a infraestructura que debe prestar servicios en caso de emergencia y que por tanto, debiese contar con una baja exposición a peligros.

En definitiva, la evolución de la ciudad y su crecimiento radial ha generado que la exposición aumente sobre todo en el piedemonte. Este último es una de las zonas con mayor dinamismo en cuanto a procesos como remociones en masa e inundaciones. Además, este sector se ve cruzado de norte a sur por la FSR, la cual representa una potencial amenaza sísmica que puede desencadenar desprendimientos, deslizamientos y grandes daños a la zona urbana cercana a la estructura.

En cuanto a la metodología utilizada para este estudio, es necesario mencionar que corresponde a una información representativa con mayor precisión para los últimos años

mapeados. Como fue descrito en el Marco Metodológico, los mapas de imágenes del Santiago colonial y Santiago de la República son bosquejos realizados por algunos historiadores, los que fueron georreferenciados a partir de la coincidencia con las calles, que en algunos casos puede no ajustarse de la mejor manera. El mapeo se realizó a escala de menor detalle a medida que el mapa de Santiago crecía.

En cambio, para las imágenes mapeadas a partir de la información disponible en *Google Earth* la escala de mapeo fue de mucho mayor detalle, pues se contaba con mejor resolución para distinguir el relieve y la urbanización. En el caso del mapeo de Santiago en 1985, se debía seleccionar la imagen satelital a utilizar a una escala regional que fuera capaz de abarcar todo el Gran Santiago (~1:193.000), pero el mapeo fue realizado a una escala de aproximadamente 1:25.000. Para el caso de 1994, también se obtuvo una imagen satelital a escala del Gran Santiago, pero el mapeo se realizó a una escala aproximada de 1:17.000. Finalmente, la imagen de 2017 contaba con excelente resolución y detalle, lo que permitió mapear incluso la urbanización hacia las quebradas, usando una escala de mapeo de ~1:5.000.

En virtud de ello, al generar imágenes de escala del piedemonte (~1:70.000) el mapeo de detalle se pierde. Así, con un mapeo de menor escala de alrededor de la mitad (~1:35.000) hubiese sido más que suficiente para ser representativo. Por lo tanto, las escalas de mapeo para las imágenes de 1985 y 1960 cumplen con el detalle para representar la tendencia de la evolución del desarrollo urbano. Sin embargo, en este mismo sentido el mayor detalle no “ensucia” la tendencia del límite urbano para los años más recientes, lo que es el objetivo de este estudio. Además, como se busca encontrar la relación de la ocupación con la traza de la falla, y esta última esta mapeada a 1:25.000, las escalas de mapeo permiten una buena correlación.

8.2 GEOMORFOLOGÍA URBANA

Primeramente sobre la identificación de los escarpes, existen criterios a considerar sobre su validez e interpretación, debido a que la metodología utilizada para la obtención de los escarpes proyectados en el frente cordillerano en la Figura 6.2, empleada con anterioridad en la tesis de R. Rauld (2011), fue modificada para obtener como resultado final un producto coherente que permitiera visualizar claramente los escarpes morfológicos. Gran cantidad de puntos de base y techo identificados visualmente en el trabajo descrito en el Marco Metodológico fueron eliminados manualmente, buscando dejar solo puntos que representaran una tendencia congruente. Se eliminaron así todos los escarpes aislados y los saltos que posiblemente estaban asociados a la acción fluvial, los cuales se escapaban de la tendencia y que al observarlos en planta se ubicaban justamente sobre drenajes. Este trabajo de selección fue realizado visualizando los datos en el perfil transversal al frente cordillerano y en planta sobre el piedemonte.

Cabe destacar que el trabajo de identificación de los saltos de escarpes fue realizado visualmente, y los puntos de base y techo marcados de forma manual, por lo tanto, los resultados pueden estar marcados por un error sistemático ligado a la difícil estandarización del proceso de identificación, y a errores aleatorios. Además, se aplicó un criterio de eliminación de datos que podría considerarse subjetivo

Los escarpes identificados solo representan la peligrosidad sísmica de la FSR asociada a su ruptura en superficie, pero permiten dimensionar la extensión de la traza y por tanto modelar posibles escenarios sísmicos con ruptura o sin ruptura superficial.

Respecto al cruce entre la urbanización y los escarpes del piedemonte, se obtuvo un mapa de riesgos simplificado. En términos estrictos para este estudio, el riesgo sísmico de Santiago asociado a la FSR, se entiende como el área urbanizada que se encuentra bajo la amenaza de la FSR. Es decir, si no hay urbanización no hay riesgo. De esto se desprende que el riesgo de Santiago pueda seguir aumentando pues existen sectores de la falla que aún no se encuentran urbanizados.

Es posible observar como entre 1960 y 1985 comienza el crecimiento en el porcentaje del área expuesta, lo que nuevamente sería el resultado de la liberación del suelo urbano con la modificación de 1979. Específicamente en área sobre el bloque colgante, lo que demuestra la abertura del piedemonte.

Posteriormente, los valores en porcentaje comienzan a mantenerse para 1994 y 2017, lo que reflejaría tanto el ajuste de las regulaciones urbanas como el hecho de que cada vez se hace más difícil construir hacia el piedemonte, por la menor disponibilidad de terrenos que van quedando y los desafíos ingenieriles de territorio.

Es importante precisar que el control de la urbanización que ha intentado ser regulado por las normas y planes no ha considerado la FSR. Tal es el caso de la norma sísmica chilena NCh N° 433, que no distingue para el diseño sísmico de las edificaciones la naturaleza del movimiento telúrico. Por lo tanto, esta norma técnica no plantea características ni requisitos especiales para zonas con construcciones cercanas a fallas activas, y solo específica restricciones en función de la macrozonificación sísmica. El caso en Santiago se vuelve aún más crítico, ya que varios

segmentos de la falla se encuentran totalmente urbanizados, como se demostró en los resultados de esta investigación.

Se debe poner especial atención a los escarpes de falla que aún no se encuentran urbanizados, es decir, en Peñalolén, La Florida y algunos sectores de Puente Alto. Son estas comunas las que aún pueden controlar su exposición, evitando la urbanización de estos sectores expuestos al peligro de la ruptura en superficie de la FSR. Además es tiempo aún de proteger los escarpes pudiendo darles un enfoque científico y cultural, para difundir a la comunidad y enseñarles las evidencias de una de las amenazas sísmicas de su ciudad.

Como reflexión final, es interesante notar que son las clases de mayor poder adquisitivo las que han decidido habitar en estas partes altas y escarpadas, con un potencial paisajístico evidente. El desarrollo urbano hacia las mayores cotas podría representar una ejemplificación del deseo de ascenso. Una sensación de poder y control, dado por las mayores alturas que permiten visualizar hacia abajo la ciudad y sus movimientos. Es así como esta ubicación privilegiada permite ver todo desde la tranquilidad que parece inspirar el frente cordillerano de Santiago, el cual en realidad constituye una amenaza natural demostrada por estudios científicos, y evidenciada a lo largo de la historia geológica y humana.

Finalmente, como se vio demostrado, existen áreas de riesgo en el frente cordillerano, en las que los involucrados debiesen estar informados de los peligros que los rodean y amenazan. Se requiere no sólo modificar las regulaciones como planes regionales, comunales y normas técnicas, sino que también educar a la población para ser capaces de actuar frente a una emergencia, ser conscientes de las condiciones naturales y políticas de Chile, dando énfasis en la sustentabilidad necesaria para continuar habitando el territorio chileno.

8.3 TERREMOTO DEL 13 DE MAYO DE 1647

Luego del análisis existen factores que aún son debatibles considerando este terremoto como un sismo intraplaca de profundidad intermedia. Donde la fuente de la FSR no es completamente descartable, pues el terremoto del 13 de mayo de 1647 también cumple con las características generales de este tipo de sismos.

Una característica cuestionable en el caso que el terremoto del “Señor de mayo” sea del tipo intraplaca de profundidad intermedia, es que debido a su intensidad tendría una zona de percepción mucho mayor que la documentada si tuviese una magnitud de ~8. Pudiendo sentirse en Concepción o La Serena, ciudades ya fundadas en la época que no reportan daños ni detalles sobre los efectos del terremoto. Como fue el caso del terremoto de Chillán que con una magnitud de 7.4 Ms y 100 km de profundidad (CSN) se percibió entre Coquimbo y Puerto Montt (1490 km de distancia). Este terremoto solo registra ser percibido en un área de 570 km de largo aproximadamente.

Todo lo anterior respecto a estas dos fuentes posibles se resume en la siguiente tabla:

Tabla 10: Factores a favor y en contra para fuente intraplaca y cortical para terremoto de mayo de 1647.

Fuente Intraplaca de profundidad intermedia		Fuente Cortical FSR	
M: ~8, Intensidad IX, 154 %g		M: ?, Intensidad VII, 44%g	
A FAVOR	EN CONTRA	A FAVOR	EN CONTRA
Ubicación del epicentro: Valle Central		Ubicación del epicentro: frente cordillerano	
	Requiere más extensión de la zona afectada de la documentada en los relatos.	Si solo se <u>percibió</u> entre la IV y VII. (Comportamiento similar a Chusmiza 2001).	Si se <u>produjeron daños</u> entre la IV y VII región, no es capaz de afectar un área tan grande.
Nivel de daño catastrófico en Santiago		Nivel de daño catastrófico en Santiago	
	Algunos edificios resistieron el sismo	Algunos edificios resistieron el sismo	
Sin Tsunami		Sin Tsunami	
Deslizamiento en los Andes y caída de bloques en cerro Santa		Deslizamiento en los Andes y caída de bloques en cerro	

Lucía		Santa Lucía. Máximo de 10^3 m^3	
Gran cantidad de grietas profundas		Grietas pequeñas	Grietas profundas. No es capaz de generar grietas profundas con tan baja intensidad (ESI-2007).
Se secaron manantiales, cambio de cursos en ríos			Se secaron manantiales, algunos ríos cambian de curso. Con tan baja intensidad no es capaz de cambiar cursos de ríos (ESI -2007)

Considerando todos los aspectos mencionados, se esperaría que si el terremoto tiene una fuente intraplaca, debiese tener una magnitud menor a 8, pues los daños serían aún mayores que los descritos. Correspondería tal vez a un 7.1, como el terremoto de Punitaqui de 1997. Esta magnitud estaría muy por debajo de lo publicado por el Centro Sismológico Nacional, quienes sin especificar la fuente indican que el terremoto del 13 de mayo de 1647 tuvo una magnitud M_s de 8.5.

Al estimar la intensidad del terremoto para una fuente intraplaca de profundidad intermedia con Magnitud $M_s=7.1$ y profundidad hipocentral de 70 km, el valor de aceleración horizontal es de 383.85 cm/s^2 , y un %g de 39.1, lo que se asocia -según Worden et al. (2010)- a una intensidad de VIII en el epicentro. El sismo tendría un mapa de intensidades que se vería de forma esquemática como lo muestra la Figura 8.2, interpolada a partir de las intensidades en escala de Mercalli para algunas localidades de Chile, con base en los registros históricos. Las condiciones de borde utilizadas fueron:

Tabla 11: Condiciones de borde mapa de intensidades.

Localidades	Observaciones	Intensidad (Mercalli)
Santiago	Epicentro del sismo. Daños Catastróficos. 39,1%g	VIII
Illapel (Río Choapa)	Registro de percepción sin detalle de daños. Límite norte de área afectada.	III
Río Maule	Registro de percepción sin detalle de daños. Límite sur de área afectada.	III
Mendoza	Hay registro de que se escuchó pero no se remeció.	II
Concepción	Sin reporte de daños ni percepción de sismo.	-
La Serena	Sin reporte de daños ni percepción de sismo.	-

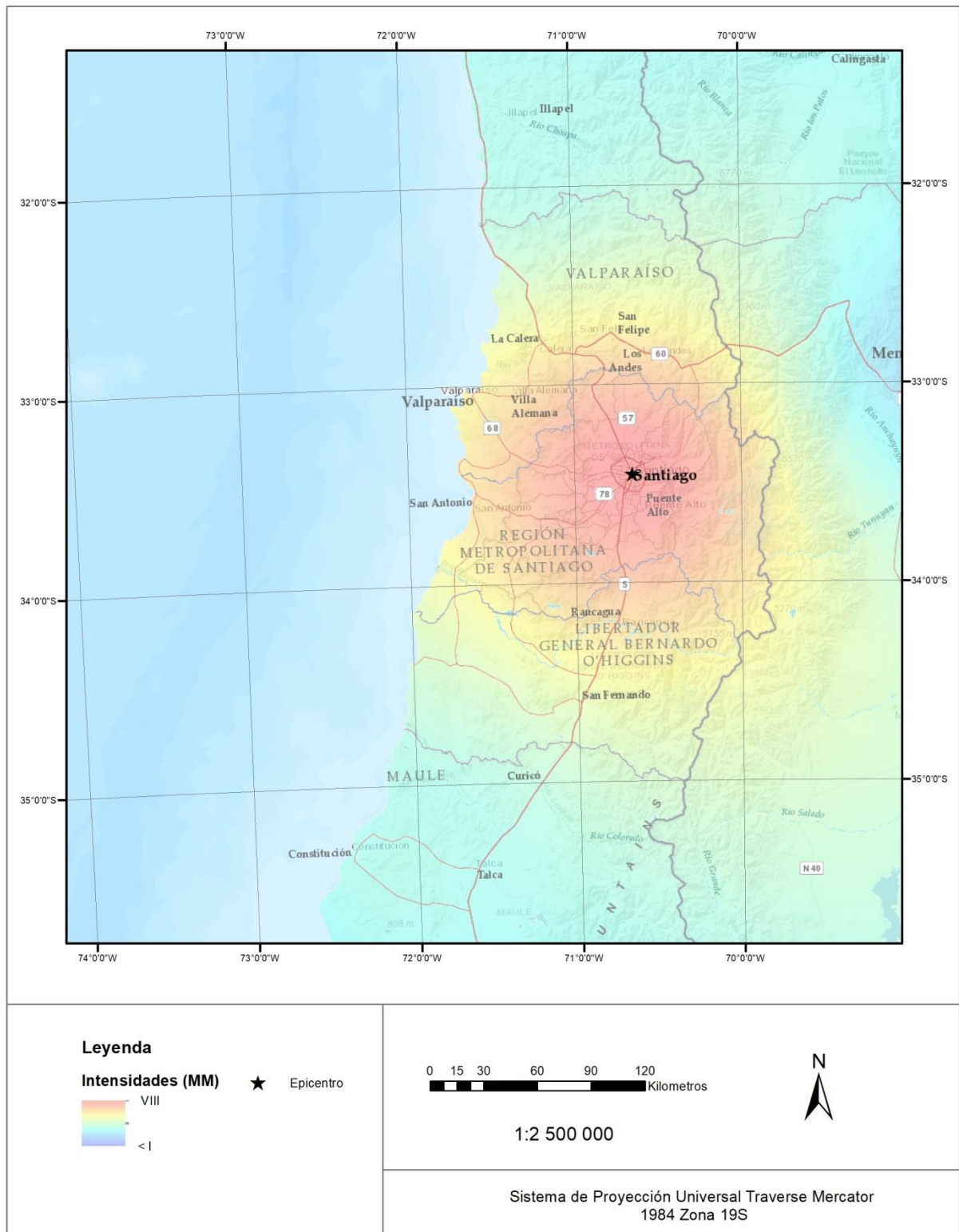


Figura 8.2: Mapa de intensidades para el terremoto del 13 de mayo de 1647 con fuente intraplaca de profundidad intermedia referencial.

Por otro lado, si el evento fuese cortical generado por la FSR, se esperaría que tuviese la máxima magnitud posible sin producir ruptura superficial, que sería la principal limitante. La información inferida a partir de la clasificación de los escarpes de falla, indicarían que la mayor tasa de deslizamiento se encontraría en el sector norte. Esto podría ayudar a explicar que el terremoto de mayo de 1647 reporte daños importantes hacia el valle de Quillota, pudiendo representar una extensión de la falla hacia el norte de la RM.

Sería muy relevante para el estudio actual en torno a la falla el que el terremoto de mayo de 1647 correspondiera efectivamente a un evento generado por la FSR, pues se agregaría un nuevo evento a la escasa historia sísmica de la estructura, lo que permitiría ser parte relevante de la información necesaria para la estimación de la amenaza sísmica de esta falla en la ciudad de Santiago. La catástrofe de Santiago originada en 1647 serviría como ejemplo del escenario de la capital frente a un terremoto producido por la FSR, con una ciudad que claramente hoy está evolucionada en términos culturales e ingenieriles, pero no menos expuesta.

Tanto la generación de terremotos de la fuente intraplaca de profundidad intermedia como de la fuente cortical, son eventos que llaman particularmente la atención de los científicos debido a su amenaza sísmica poco conocida, con mucha menor recurrencia que los eventos interplaca, lo que dificulta su entendimiento y comportamiento. Estudios chilenos del presente siglo han tratado los sismos corticales (ej. Campos et al., 2005), comparado sus características con eventos ocurridos en el extranjero como el terremoto de Kobe de 1995 y el de Northridge de 1994, y han concluido que los terremotos superficiales ocurridos en Chile tienen características particulares (como mayores aceleraciones que quedan por sobre las curvas de atenuación propuestas para California), lo que implica que se deben impulsar medidas diseñadas especialmente para terremotos superficiales chilenos.

Si la fuente del terremoto de mayo de 1647 efectivamente fuera cortical asociada a la FSR o intraplaca de profundidad intermedia, la normativa sísmica no considera explícitamente ninguno de estos tipos de terremotos. Se debe reestudiar la macrozonificación sísmica de la norma del país, y crear normas capaces de considerar todas las fuentes sismogénicas que ponen en riesgo la ocupación del territorio chileno.

El estudio realizado concluye y propone que el terremoto del 13 de mayo de 1647, que devastó al Santiago colonial corresponde a un sismo con epicentro bajo el valle de Santiago, a unos 70 km de profundidad, con magnitud $M_s \sim 7$ e intensidad VIII en la capital.

Por último, se debe tener en consideración que las fuentes directas que relatan la información utilizada eran principalmente informativos del estado en que el Reino de Chile había quedado posterior a la catástrofe, dirigidos a la Corona Española, en que se buscaba solicitar dinero para su reconstrucción. Es por ello, que todos los registros podrían ser sobreestimaciones para conseguir el apoyo buscado, y por consiguiente, los datos recopilados podrían no ser completamente fidedignos.

Capítulo 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados de esta investigación es posible concluir que la ciudad de Santiago, que ha tenido un crecimiento espacial de forma radial desde su núcleo histórico fundado al sur del Mapocho, no ha considerado en su evolución hacia el piedemonte las amenazas naturales ahí presentes: la Falla San Ramón (FSR) y los abanicos aluviales de quebradas activas.

El crecimiento urbano y su desarrollo son total consecuencia de la normativa que ha regido a la ciudad en su expansión. Destaca en el siglo XX la abertura del piedemonte por decreto supremo en 1979, la cual provocó el uso desmedido y a altas tasas, de zonas que antes eran consideradas áreas protegidas. Esto trajo consigo la especulación inmobiliaria, acompañada del deseo de las clases medias y altas por habitar sectores altos con un paisaje rodeado de naturaleza y buena conectividad. Producto de ello, la tasa de crecimiento urbano hacia el bloque colgante de la FSR, entre 1985 y 2017, fue de 175 hectáreas por año en promedio.

La identificación de los escarpes morfotectónicos del frente cordillerano permite diferenciar 3 niveles de escarpes: mayores con menor preservación, medianos, y pequeños mejor preservados. La continuidad que muestran los escarpes pequeños permite interpretar que la FSR se comporta como un sistema y no como segmentos con rupturas locales. La presencia de saltos en el sector sur del piedemonte en afloramientos de la Ignimbrita Pudahuel (edad 0.13 Ma según Pineda, 2015), es consistente con una actividad sismogénica con ruptura superficial en la FSR posterior al asentamiento de la ignimbrita. Los resultados de la cuantificación de escarpes vienen a completar información sobre la traza de la FSR, sobretodo en el sector en torno a la quebrada Lo Cañas, donde se separa en dos segmentos.

Respecto a la relación de la evolución de las áreas urbanas y la amenaza de la Falla San Ramón, se comprueba la hipótesis, pues es posible reconocer como Santiago ha aumentado su exposición al peligro sísmico de esta estructura. Si se considera un escenario de simulación de ruptura sísmica en la FSR ($M_w=7,4$; SEREMI & MINVU, 2012), hacia el año 1960, 11.110 hectáreas estaban en riesgo sísmico específico por esta fuente sísmica cortical, lo que se triplicó con los años hasta alcanzar 33.700 hectáreas en 2017, que representa casi el 42% del área urbanizada de Santiago.

Se reconocen en este trabajo zonas de riesgo con base en la vulnerabilidad física, es decir, exposición de Santiago, definidas como de grado medio (26%g a 37%g PGA) a muy alto (58%g a 70%g PGA) para un evento de $M_w=7.4$ generado por la FSR, donde las comunas precordilleranas incorporarían zonas de muy alto y alto riesgo (47%g a 58%g PGA), como es el caso de Lo Barnechea, Las Condes, Vitacura, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto. Las comunas pericentrales de Recoleta, Providencia, Ñuñoa, Macul, La Granja, y parte de Santiago, San Ramón y La Pintana son áreas de riesgo medio según el escenario considerado (26%g a 37%g PGA). Desde la zona central hacia el norte, sur y poniente de la capital el riesgo disminuye a bajo para estas condiciones, es decir, en donde, de acuerdo al escenario considerado, se podrían esperar aceleraciones del suelo inferiores a las registradas durante el terremoto del Maule en 2010.

Con el fin de confirmar la presencia de los escarpes identificados se recomienda realizar un reconocimiento en terreno, acudiendo a las áreas dónde se agregaron nuevos datos y a los sectores con ausencia de información, para así perfeccionar la cartografía de la traza de la FSR.

En cuanto al terremoto ocurrido el 13 de mayo de 1647 en el Santiago colonial, se reconoce el nivel de daños asociado al evento, considerado una de las mayores catástrofes en la historia de Santiago. En relación a su origen, las fuentes sismogénicas intraplaca de profundidad intermedia y cortical, son las que mejor se ajustan a las características reportadas en las crónicas y relatos.

La modelación del sismo como un evento intraplaca de profundidad intermedia con epicentro en Santiago entrega valores de intensidades de IX para una magnitud de 8, escenario que produciría mayores daños a los reportados por las fuentes.

Por otro lado, el sismo entendido como un evento asociado a la FSR precisa tener la mayor magnitud posible sin generar ruptura superficial, con un área mayor a la que hoy en día se encuentra reconocida por los estudios científicos. De esta forma se correspondería con las características relatadas por los documentos consultados.

Debido a la mayor cantidad de coincidencias, se propone que el terremoto del 13 de mayo de 1647 correspondería más bien a un sismo intraplaca de profundidad intermedia con epicentro en Santiago a 70 km de profundidad, magnitud $M_s \sim 7$ e intensidad VIII, valor muy por debajo de las estimaciones de estudios anteriores y de fuentes oficiales. Sin embargo no es posible descartar completamente la fuente cortical (FSR).

De forma general, la normativa y la necesidad de su modificación es un aspecto recurrente a lo largo de este estudio. Independiente de que la fuente del terremoto de mayo de 1647 sea intraplaca de profundidad intermedia o superficial, la macrozonificación sísmica no incluye estas fuentes sismogénicas.

Se recomienda indagar en el estudio de los eventos máximos creíbles para la Falla San Ramón buscando determinar cuál es el valor de la magnitud máxima sin que se produzca ruptura superficial. Esto permitirá mediante la comparación de intensidades tener mayores argumentos para adjudicar o descartar la FSR como fuente del terremoto de mayo de 1647.

Finalmente, Santiago es una ciudad que hoy en día es poco o nada sustentable en muchos aspectos, donde además parece existir una falta de memoria histórica colectiva que olvida los eventos naturales que han ocurrido y que, por ende, seguirán ocurriendo en el futuro. La ciudad continuará creciendo y expandiéndose, por lo que se deben reconocer y valorar los recursos. Tal es el caso del suelo de la capital el cual es un recurso limitado y que no puede seguir siendo consumido de forma irresponsable. El conocimiento y las evidencias están disponibles y es momento de tomar y crear las acciones que permitan que la capital de Chile, sea capaz de crecer manteniendo a sus habitantes viviendo y disfrutando de esta hermosa ciudad de forma justa y sostenible.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, C. (2010). El Plan regulador Metropolitano de Santiago, una mirada prospectiva a su modificación. *Ignire Centro de Estudio de Política Pública*, 65-80.
- Aguirre, L. (1960). *Geología de los Andes de Chile Central, Provincia de Aconcagua*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile.
- Amunátegui, M. (1882). *El Terremoto del 13 de Mayo de 1647*. Santiago de Chile.
- Arenas, F., Lagos, M., & Hidalgo, R. (2010). *Los riesgos naturales en la planificación territorial*. Centro de Políticas Públicas UC, Instituto de Geografía.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, L., & Kausel, E. (2010). The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*.
- Astroza, M., & Astroza, R. (2008). Comparación de los daños producidos por terremotos chilenos con diferente fuentes sismogénicas. *XXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. Santiago.
- Barros Arana, D. (1889). *Historia Jeneral de Chile Tomo IV*. Santiago de Chile .
- Brüggen, J. (1950). *Fundamentos de la Geología de Chile*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.
- Burton , I., & Kates, R. (1964). The perception of natural hazards in resource management. *Natural Resources Journal* , 412-441.
- Bustos, N. (1998). El ordenamiento y planificación territorial en Chile: elementos para su discusión. *Revista de Geografía Norte Grande*, 49-53.
- Camara Chilena de la Construcción. (2007). *Informe de disponibilidad de suelo urbano en Santiago*. CCHC, Gerencia de Estudios, Santiago.
- Camarasa, A. M., Salas, J., & Chuvieco, E. (2001). Información geográfica y riesgos naturales. *Servicio de Estudios BBVA*.
- Campos, J., Ruiz, S., Pérez, A., Ruiz, J., Kausel, E., Thiele , R., . . . Sepúlveda, S. (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 en Chile. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas*. Concepción.
- Cardona, O. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. 18.
- Carter, W., & Aguirre, L. (1965). Structural Geology of Aconcagua Province and Its Relationship to the Central Valley Graben, Chile . *GSA Bulletin* , 651-664.

- Ceballos, P. (2016). *Evaluación del peligro de remociones en masa en quebrada de Apoquindo, sector oriente de Santiago, Región Metropolitana*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago de Chile.
- Centro Sismológico Nacional. (2014). *Terremotos y Sismicidad en Chile*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- CEPAL, Naciones Unidas. (2005). *Elementos Conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas socionaturales. Cuatro experiencias en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: LOM Ediciones.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, S., & Zurita, E. (2002). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33–36 SL). *Journal of South American Earth Sciences*, 117-139.
- Comisión Chilena de Energía Nuclear. (1998). *Descripción del Reactor del RECH-1, Centro de Estudios Nucleares La Reina*. Departamento de Aplicaciones Nucleares, Unidad de Reactores, Santiago.
- Cruden, D. (1991). A simple definition of landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43-27.
- De Ramón, A. (1978). Santiago de Chile 1850-1900 Límites urbanos y segregación espacial según estratos. *Revista Paraguaya de Sociología*, 253-276.
- De Ramón, A. (2000). *Santiago de Chile (1541-1991): Historia de una sociedad urbana*. Santiago de Chile: Sudamericana.
- EIRD. (2004). *Vivir con el riesgo: Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*. Ginebra.
- Farias, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., . . . Comte, D. (2008). Late Miocene high and apid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°-35°S). *Tectonics*.
- Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., David, C., Tassara, A., . . . Fock, A. (2010). Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. *Tectonics*, 29.
- Farias, M., Vargas, G., Tassara, A., Carretier, S., Baize, S., Melnick, D., & Bataille, K. (2010). Land-Level Changes Produced by the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake. *Science*, 329, 916. doi:10.1126/science.1192094
- Fernández, J. (2001). *Estudio geológico ambiental para la planificación territorial de sector TilTil-Santiago*. Memoria para optar título de geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Ferrando, F. (2008). Santiago de Chile: antecedentes demográficos, expansión urbana y conflictos. *Revista de Urbanismo*.

- 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 Magister, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Galetovic, A., & Jordán, P. (2006). *Santiago: dónde estamos y hacia dónde vamos*. Santiago de Chile : Centro de Estudios Públicos.
- Gana, P., & Wall, R. (1997). Evidencias geocronológicas $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ y K-Ar de un hiatus Cretácico Superior- Eoceno en Chile central (33°-33°30'S). *Revista Geológica de Chile*, 145-163.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Hayes, G., Wald, D., & Johnson, R. (2012). Slab 1.0: A three-dimensional model of a global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research*.
- Heinrichs, D., Nuissl, H., & Rodríguez Seeger, C. (2009). Dispersión urbana y nuevos desafíos para la gobernanza (metropolitana) en América Latina: el caso de Santiago de Chile. *EURE*, 29-46.
- Hurtado, H. (1996). Concentración de población y desarrollo económico: el caso chileno. *Universidad de Chile*.
- Isacks, B. (1988). Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 3211-3231.
- Kagawa, T., Irikura, K., & Somerville, P. (2004). Differences in ground motion and fault rupture process between the surface and buried rupture earthquakes. *Earth, Planets and Space*, 3-14.
- Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 406-421.
- Klohn, C. (1960). *Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile.
- Leon Echaiz, R. (1975). *Historia de Santiago Tomo II La Republica*. Santiago de Chile.
- Leyton, F., Pérez, A., Campos, J., Rauld, R., & Kausel, E. (2009). Anomalous seismicity in the lower crust of the Santiago Basin, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 17-25.
- Leyton, F., Sepulveda, S., Astroza, M., Rebolledo, S., Acevedo, P., Ruiz, S., . . . Foncea, C. (2011). Seismic zonation of the Santiago basin, Chile. *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Santiago, Chile.
- Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 368-378.
- Los Oidores. (1648). *Carta de la Real Audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647*. Santiago de Chile.

- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales del tipo geomofológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *Eure*, XXVII(81).
- Michetti, A., Esposito, E., & et al. (2007). *Intensita' scale ESI 2007*. Servizio Geologico d'Italia, Dipartimento Difensa del Suolo. Rome: In: Guerrieri, L. & Vittori, E.
- Mpodozis, C., & Ramos, V. (1989). The Andes of Chile and Argentina. *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources 2009 - Geology of the Andes and Its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*.
- Mpodozis, C., & Ramos, V. (2008). Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones? *Asociación Geológica Argentina* .
- Municipalidad de Santiago. (2010). *Plan estratégico de desarrollo comunal*. Santiago .
- Nyström, J., Vergara, M., Morata, D., & Levi, B. (2003). Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (33 15'–33 45' S). *GSA Bulletin*, 1523-1537.
- ONEMI. (1991). *inundaciones Región Metropolitana 1982/1987*. Santiago.
- ONEMI. (2009). *Sismo destructivo del 03 Marzo 1985*. Gobierno de Chile, Ministerio del Interior. Santiago: Unidad Riesgos de Origen Natural.
- ONEMI. (2012). *Aluviones en Chile en la década del 90*. Santiago.
- Pavez, M. (2009). Planificación urbana y regional para Santiago de Chile desde 1960: aporte conceptual y proyectual temprano para la sustentabilidad. *Investigaciones Geográficas*, 111-129.
- Pavez, M. (2011). Marcha a pie urbana y regional y movilidad en los modelos de ciudad para Santiago de Chile. *Revista INVI*, 57-85.
- Perez, A., Ruiz, J., Vargas, G., Rauld, R., Rebolledo, S., & Campos, J. (2014). Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramón Fault at the eastern border of Santiago city, Chile. *Natural Hazards*.
- Petermann, A. (2006). ¿Quién extendió a Santiago? Una breve hisotria del límite urbano 1953-1994. En A. Parker, & A. Aravena, *Santiago: dónde estamos y hacia dónde vamos* (págs. 205-230). Santiago : Centro de Estudios Públicos .
- Pineda, C. (2015). *Geocronología U/Pb en circones de la Ignimbrita Pudahuel*. Memoria para optar al Título de Geóloga , Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago de Chile .
- Rauld, R. (2002). *Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago oriente, entre el Río Mapocho y la Quebrada de Macul*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago de Chile .
- Rauld, R. (2011). *Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la Falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S)*. Tesis Doctoral, Universidad de Chile, Santiago de Chile.

- Rodriguez, J. (2007). Paradojas y contrapuntos de dinámica demográfica metropolitana: algunas respuestas basadas en la explotación intensiva de microdatos censales. En C. Mattos, & R. Fortunatti, *Santiago de Chile: movilidad espacial y reconfiguración metropolitana* (págs. 19-52). Santiago: Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ruiz, S., & Saragoni, G. (2005). Formulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismogenesis y los efectos del suelo. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas*. Concepción.
- Santibáñez, I., Cembrano, J., García, T., González, G., Yañez, G., & Arancibia, G. (2015). Potencial Sismogénico de las Fallas Corticales en los Andes chilenos. *XIV Congreso Geológico Chileno*, (págs. 352-354). La Serena.
- Saragoni, R. (2011). El mega terremoto del Maule de 2010: una lección de buena ingeniería pero con sorpresas y nuevos desafíos. *Anales*, 35-56.
- Sellés, D. (1999). *La Formación Abanico en el Cuadrángulo Santiago (33°15' - 33°30'S, 70°30' - 70°45'O), Chile Central. Estratigrafía y Geoquímica*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Sellés, D., & Gana, P. (2001). *Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal: Regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Sepulveda, S., Astroza, M., Kausel, E., Campos, J., Casas, E., Rebolledo, S., & 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*.
- SEREMI & MINVU. (2012). *Estudio de Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón*. Santiago.
- Servicio Sismológico Nacional. (2010). *Informe de sismo*. Universidad de Chile, Santiago.
- Stehberg, R., & Sotomayor, G. (2012). *Mapocho Incaico*. Chile : Boletín del Museo Nacional de Historia Natural.
- Stern, C., Amini, H., Charrier, R., Godoy, E., Herve, F., & Varela, J. (1984). Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the Rio Maipo and Rio Cachapoal (Chile) and the Rio Yaucha and Rio Papagayos (Argentina). *Revista Geológica de Chile*(23), 39-52.
- Stetson, C., Fiesta, M., & Eagleman, D. (2007). Does time really slow down during a frightening event? *PloS one*, e1295.
- Subsecretaría del Interior de Chile. (2011). *Informa final de fallecidos y desaparecidos por comuna*. Santiago de Chile.
- Thayer Ojeda, L., & Miranda, G. (1906). *Origenes de Chile: Elementos étnicos, apellidos, familias*. Santiago de Chile : Andrés Bello.

- Thiele, R. (1980). Hoja Santiago: región metropolitana: carta geológica de Chile escala 1: 250.000. *Instituto de Investigaciones Geológicas*.
- Tornero, R. S. (1872). *Chile Ilustrado. Guía descriptiva del territorio de Chile, de las capitales de provincia y de los puertos principales*. Valparaíso.
- Udías, A., Madariaga, R., Buform, E., Muñoz, D., & Ros, M. (2012). The Large Chilean Historical Earthquakes of 1647, 1657, 1730, and 1751 from Contemporary Documents. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1639–1653.
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*. Ginebra, Suiza.
- Vargas, G., Farías, M., Carretier, S., Tassara, A., Baize, S., & Melnick, D. (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 38, 219-238.
- Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T., Forman, S., Rebolledo, S., Baize, S., & Armijo, R. (2014). Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 11-33.
- Vergara, M., López-Escobar, L., Palma, J., Hickey-Vargas, R., & Roeschmann, C. (2004). Late tertiary volcanic episodes in the area of the city of Santiago de Chile: new geochronological and geochemical data. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Vicuña Mackenna, B. (1857). *La Ciudad de Santiago. Su pasado, su presente, su futuro*. Santiago de Chile.: Boletín Mensual de la Sociedad Nacional de Agricultura, Tomo 2°.
- Vicuña Mackenna, B. (1869). *Historia Crítica y Social de la Ciudad de Santiago desde su fundación hasta nuestros días (1541-1868)*. Valparaíso: Imprenta del Mercurio.
- Vigny, C., Rudloff, A., Ruegg, J., Madariaga, R., Campos, J., & Alvarez, M. (2009). Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 86-95.
- Villarroel, F. G. (1647). *Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile*. Santiago de Chile.
- Villarroel, F. G. (9 de Junio de 1647). Relación del terremoto que asoló a la ciudad de Santiago de Chile. Santiago: Imprenta de La Sociedad.
- Vladilo, I. (1977). *Caracterización del terremoto del 13 de mayo de 1647 y estudio del comportamiento sísmico de la iglesia de San Francisco de Santiago de Chile*. Universidad de Chile, Departamento de Obras Civiles, Santiago de Chile.
- Wall, R., Gana, P., & Gutiérrez, A. (1996). *Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla, Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins*. Mapas Geológicos, Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, Santiago.
- Wall, R., Selles, D., & Gana, P. (1999). *Mapa geológico del área de Tiltill-Santiago, Región Metropolitana*. Mapas Geológicos, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.

Worden, C., Wald, D., Allen, T., Lin, K., Garcia, D., & Cua, G. (2010). A revised ground-motion and intensity interpolation scheme for shakemap. *Bulletin of Seismological Society of America*, 3083-3096.

Capítulo 10 ANEXOS

ANEXO I: Base de datos escarpes identificados y seleccionados.

Coordenada N	Coordenada E Base	Base	Coordenada E Techo	Techo	Salto	Tipo
6304100	356964,592	755,7	357090,592	779,29	23,62	Mediano
6304000	356856,592	752,5	357036,592	810,03	57,57	Mediano
6303900	356721,592	740,4	356766,592	745,80	5,40	Pequeño
6303900	356829,592	750,5	357063,592	844,81	94,33	Grande
6303800	356721,592	740,0	356775,592	746,43	6,43	Pequeño
6303800	356829,592	751,3	357036,592	853,91	102,66	Grande
6303700	356766,592	742,4	357045,592	856,78	114,41	Grande
6303600	356685,592	734,9	356730,592	739,44	4,54	Pequeño
6303500	356739,592	735,2	356766,592	739,93	4,76	Pequeño
6303500	356775,592	741,5	357027,592	863,89	122,43	Grande
6303400	356793,592	745,5	357027,592	863,57	118,06	Grande
6303100	356748,592	731,2	356784,592	739,94	8,74	Pequeño
6303000	356775,592	730,3	356829,592	739,11	8,82	Pequeño
6302900	356802,592	730,4	356865,592	739,97	9,54	Mediano
6302800	356739,592	725,0	356820,592	734,93	9,88	Mediano
6302600	357162,592	741,0	357297,592	759,24	18,29	Mediano
6302600	357432,592	761,6	357702,592	844,99	83,36	Grande
6302500	357252,592	738,0	357369,592	754,97	16,92	Mediano
6302500	357432,592	760,1	357666,592	844,55	84,43	Grande
6302400	357225,592	731,3	357306,592	744,28	12,95	Mediano
6302300	357396,592	745,2	357711,592	839,38	94,18	Grande
6302200	357171,592	722,0	357234,592	732,72	10,75	Mediano
6302000	357126,592	712,5	357144,592	713,23	0,77	Pequeño
6302000	357270,592	719,8	357351,592	731,42	11,61	Mediano
6301900	357117,592	710,4	357171,592	715,42	5,06	Pequeño
6301800	357126,592	709,9	357180,592	715,52	5,62	Pequeño
6301800	357297,592	720,0	357378,592	730,00	10,00	Mediano
6301700	357117,592	709,2	357207,592	720,33	11,10	Mediano
6301600	357117,592	710,0	357198,592	719,92	9,92	Mediano
6301500	357234,592	715,0	357306,592	721,78	6,76	Pequeño
6301500	358008,592	755,0	358233,592	847,63	92,60	Grande
6301400	357288,592	714,9	357342,592	720,54	5,64	Pequeño
6301400	357756,592	736,1	357873,592	745,01	8,91	Pequeño
6301400	357972,592	751,5	358251,592	859,62	108,08	Grande
6301300	357396,592	715,7	357495,592	723,99	8,29	Pequeño
6301300	357800,592	735,1	357873,592	748,73	13,66	Mediano

6301200	357495,592	715,3	357594,592	728,02	12,74	Mediano
6301200	357954,592	760,7	358404,592	874,97	114,32	Grande
6301100	357783,592	725,0	357972,592	763,96	38,97	Mediano
6301100	357999,592	767,7	358503,592	885,97	118,30	Grande
6301000	357810,592	728,0	357963,592	769,47	41,45	Mediano
6301000	357981,592	772,1	358665,592	907,06	134,93	Grande
6300900	357855,592	731,4	358026,592	768,84	37,40	Mediano
6300900	358134,592	777,1	358827,592	930,44	153,31	Grande
6300800	358008,592	740,3	358188,592	769,09	28,75	Mediano
6300800	358215,592	772,1	358872,592	935,08	162,95	Grande
6300600	358260,592	754,3	358944,592	952,38	198,07	Grande
6300500	358332,592	760,1	359106,592	987,19	227,11	Grande
6300400	358368,592	764,1	359142,592	996,23	232,09	Grande
6300300	358395,592	770,1	359241,592	1000,55	230,45	Grande
6300200	358431,592	775,4	359241,592	1000,77	225,37	Grande
6300100	358476,592	781,6	359223,592	993,29	211,69	Grande
6300000	358512,592	788,5	359223,592	958,33	169,87	Grande
6299600	358836,592	823,0	358890,592	841,51	18,49	Mediano
6299500	358872,592	822,2	358917,592	841,75	19,58	Mediano
6299400	358899,592	826,3	358926,592	838,90	12,56	Mediano
6299400	358953,592	845,8	359331,592	951,00	105,18	Grande
6299100	358611,5	783,7	358674,592	799,58	15,88	Mediano
6299000	358818,592	821,4	358890,592	841,94	20,56	Mediano
6299000	358611,5	776,8	358683,592	798,53	21,73	Mediano
6298900	358602,592	768,4	358683,592	793,66	25,26	Mediano
6298700	359124,592	860,0	359376,592	921,82	61,81	Mediano
6298600	358620,592	774,6	358701,592	807,72	33,08	Mediano
6298600	358872,592	820,2	359043,592	856,47	36,31	Mediano
6298500	358656,5	785,5	358728,5	806,30	20,80	Mediano
6298500	358836,592	825,0	358971,592	854,61	29,60	Mediano
6298300	358584,592	785,2	358674,592	805,80	20,56	Mediano
6298200	358557,592	781,1	358629,5	798,80	17,66	Mediano
6298100	358431,592	755,1	358494,592	774,06	18,94	Mediano
6298000	358467,592	760,0	358530,592	773,42	13,40	Mediano
6297600	358530,592	770,2	358575,592	782,88	12,70	Mediano
6297300	358593,5	788,3	358629,5	796,20	7,90	Pequeño
6297200	358611,5	787,9	358638,592	794,60	6,70	Pequeño
6297100	358638,592	787,1	358683,5	799,70	12,63	Mediano
6296600	358917,592	823,4	359034,592	854,80	31,39	Mediano
6296400	358917,592	830,5	358953,592	843,22	12,68	Mediano
6296100	358773,592	826,3	358827,592	838,63	12,37	Mediano
6296000	358827,592	840,1	358863,592	849,64	9,54	Mediano
6296000	358755,592	825,9	358791,5	835,80	9,88	Mediano
6295900	358764,592	828,4	358791,592	834,56	6,18	Pequeño

6295900	358863,592	845,2	358899,592	854,91	9,70	Mediano
6295700	358863,592	828,4	359034,592	893,57	65,20	Mediano
6295600	358863,592	839,1	359052,592	894,38	55,27	Mediano
6295400	358872,592	847,3	359088,592	904,99	57,71	Mediano
6295300	358926,592	860,1	359043,592	900,06	40,00	Mediano
6295100	359054,592	882,5	359088,592	903,18	20,65	Mediano
6295000	359043,592	891,3	359115,592	911,13	19,80	Mediano
6294600	359034,592	902,2	359070,592	914,11	11,93	Mediano
6294500	359052,592	904,6	359097,592	918,48	13,90	Mediano
6294500	358800,592	846,9	358854,592	865,03	18,08	Mediano
6294400	358818,592	840,6	358908,592	866,31	25,72	Mediano
6294321,858	358877,7044	845,0	358958,753	869,39	24,35	Mediano
6294300	358863,592	845,2	358944,592	871,19	26,03	Mediano
6294235,835	359095,411	904,5	359185,4212	940,04	35,58	Mediano
6294235,64	358897,3885	852,4	358960,3957	877,10	24,72	Mediano
6294200	359097,592	912,5	359187,592	942,12	29,62	Mediano
6294200	358881,592	852,4	358962,952	882,56	30,17	Mediano
6294159,601	358906,5057	856,6	358978,5489	884,79	28,23	Mediano
6294100	359115,592	919,4	359187,592	937,80	18,35	Mediano
6294100	358818,592	845,6	358926,592	882,67	37,11	Mediano
6294065,737	358851,6247	852,2	358932,6931	884,54	32,30	Mediano
6294029,635	358848,9845	855,0	358930,0727	887,19	32,22	Mediano
6294000	358845,592	857,5	358917,592	887,14	29,64	Mediano
6293866,992	358838,8791	864,3	358901,9016	889,61	25,29	Mediano
6293636,092	358736,3829	849,5	358817,4481	883,14	33,68	Mediano
6293636,092	358736,3829	849,5	358835,4625	888,95	39,49	Mediano
6293527,708	358766,9106	859,8	358838,9714	890,22	30,40	Mediano
6293400	358719,592	855,1	358737,592	859,79	4,65	Pequeño
6293350,74	358727,3056	856,9	358754,3284	864,34	7,39	Pequeño
6293200	358728,592	858,2	358746,592	862,11	3,96	Pequeño
6293100	359115,592	890,3	359304,592	979,42	89,13	Grande
6293000	359115,592	888,4	359403,592	1009,66	121,22	Grande
6292900	359151,592	894,3	359412,592	1019,20	124,90	Grande
6292800	359160,592	899,5	359502,592	1048,82	149,35	Grande
6292700	359169,592	911,0	359556,592	1062,56	151,53	Grande
6292600	359214,592	922,7	359592,592	1065,94	143,29	Grande
6292500	359259,592	937,2	359628,592	1074,72	137,52	Grande
6291867,154	359067,0092	910,2	359121,0681	924,80	14,63	Mediano
6291827,09	359034,4024	908,0	359061,4183	914,19	6,23	Pequeño
6291827,009	359115,4501	916,6	359187,4925	933,13	16,57	Mediano
6291800	359106,592	910,3	359178,592	928,72	18,37	Mediano
6291762,912	359137,8566	910,0	359191,8758	927,05	17,01	Mediano
6291700	359151,592	900,6	359205,592	914,43	13,82	Mediano
6291657,765	359236,089	912,1	359308,1314	936,84	24,74	Mediano

6291627,735	359241,7745	911,4	359304,8431	936,32	24,94	Mediano
6291600	359241,592	907,9	359331,592	945,01	37,16	Mediano
6291563,901	359278,2534	919,8	359350,279	949,12	29,30	Mediano
6291527,799	359232,4387	905,6	359304,4811	936,93	31,35	Mediano
6291500	359250,592	912,3	359313,592	939,58	27,30	Mediano
6291462,817	359277,5121	921,6	359322,5391	937,01	15,44	Mediano
6291400	359349,592	938,9	359376,592	948,72	9,85	Mediano
6291328,558	359345,9376	933,1	359463,0065	973,69	40,63	Mediano
6291300	359286,592	925,1	359394,592	954,09	28,98	Mediano
6291260,648	359377,2886	947,6	359467,3207	982,17	34,61	Mediano
6291231,767	359366,5025	945,5	359474,541	987,00	41,45	Mediano
6291200	359349,592	942,4	359466,592	994,29	51,88	Mediano
6291169,665	359418,7563	965,0	359490,7793	1001,96	36,95	Mediano
6291126,35	359397,1134	959,2	359505,1506	1005,19	46,01	Mediano
6291100	359376,592	955,4	359493,592	998,36	43,00	Mediano
6291000	359457,592	985,0	359511,592	1002,38	17,42	Mediano
6290531,397	357398,3645	758,9	357668,6608	814,64	55,75	Mediano
6290500	359313,592	995,7	359358,592	1015,91	20,24	Mediano
6290466,414	357413,9836	762,4	357675,2039	823,91	61,55	Mediano
6290430,313	357438,0038	766,3	357726,1029	830,88	64,59	Mediano
6290365,33	357450,0377	770,0	357747,2913	836,18	66,14	Mediano
6290322,008	357486,5849	777,4	357729,6685	835,92	58,52	Mediano
6290300	358557,592	891,2	358620,592	907,69	16,45	Mediano
6290300	357486,592	777,2	357720,592	833,74	56,51	Mediano
6290271,466	357486,6152	777,6	357702,6922	828,42	50,86	Mediano
6290235,365	357507,0186	782,4	357822,2076	845,60	63,20	Mediano
6290100	357588,592	792,8	357711,592	832,28	39,45	Mediano
6290100	358557,592	900,0	358656,592	939,81	39,82	Mediano
6290019,47	357618,24	801,6	357788,24	846,06	44,42	Mediano
6290000	358539,592	907,2	358656,592	933,24	26,09	Mediano
6290000	357630,592	804,7	357765,592	844,37	39,63	Mediano
6289916,11	357688,24	810,0	357848,24	851,69	41,69	Mediano
6289900	357711,592	814,9	357828,592	847,68	32,76	Mediano
6289812,75	357798,24	827,3	357928,24	864,77	37,49	Mediano
6289716,84	357768,24	824,0	358018,24	877,02	53,00	Mediano
6289610,35	359018,24	977,3	359208,24	1029,26	51,98	Mediano
6289510,7	359428,24	1058,6	359558,24	1102,58	43,98	Mediano
6289509,96	358958,24	984,1	359178,24	1038,43	54,36	Mediano
6289412,24	358923,93	1000,6	359093,93	1040,28	39,70	Mediano
6289412,24	359463,93	1080,1	359593,93	1122,86	42,81	Mediano
6289127,017	358692,1612	961,7	358809,2314	985,79	24,11	Mediano
6288915,08	358597,58	955,8	358717,58	966,97	11,17	Mediano
6288811,63	359287,58	1045,8	359447,58	1095,07	49,30	Mediano
6288612,69	358107,58	893,9	358167,58	903,27	9,36	Mediano

6288610,62	359297,58	1066,0	359437,58	1109,86	43,84	Mediano
6288417,41	357956,19	874,1	358016,19	887,99	13,94	Mediano
6288317,09	359176,2	1042,9	359306,2	1106,38	63,46	Mediano
6288218,03	359166,2	1050,6	359276,2	1098,29	47,71	Mediano
6288118,98	359149,12	1057,3	359259,12	1088,18	30,85	Mediano
6287612,019	358867,7259	1064,7	359097,7256	1128,11	63,39	Mediano
6287409	358747,54	1050,6	358864,61	1095,31	44,75	Mediano
6287311,5	358699,93	1040,0	358806,66	1076,14	36,12	Mediano
6287219,19	358593,57	1025,7	358673,57	1039,94	14,20	Mediano
6287113,4	358538,57	1019,0	358628,57	1032,18	13,23	Mediano
6287016,5	358423,57	1001,3	358528,57	1024,42	23,13	Mediano
6286713,22	358189,26	875,6	358259,26	906,15	30,55	Mediano
6286612,12	358136,16	860,2	358178,25	873,88	13,70	Mediano
6286310,66	357873,65	819,2	357996,53	857,48	38,27	Mediano
6286211,61	357872,4	811,8	357978,44	847,29	35,54	Mediano
6286200	357891,592	818,0	357954,592	840,88	22,85	Mediano
6286112,56	357835,46	802,7	357970,62	836,32	33,64	Mediano
6286100	357864,592	813,8	357963,592	835,00	21,23	Mediano
6286013,51	357747,12	788,5	357800,27	800,97	12,44	Mediano
6286000	357756,592	791,7	357819,592	805,00	13,30	Mediano
6285900	357711,592	782,6	357765,592	793,57	10,93	Mediano
6285800	357702,592	775,4	357783,592	786,75	11,34	Mediano
6285700	357756,592	780,1	357783,592	789,25	9,20	Mediano
6285600	357810,592	790,6	357837,592	798,25	7,61	Pequeño
6285507,92	357974,91	820,9	358108,52	856,54	35,66	Mediano
6285500	357810,592	790,8	357882,592	808,17	17,33	Mediano
6285309,81	357911,74	805,4	357971,53	819,40	14,05	Mediano
6285300	357927,592	808,9	357963,592	816,85	7,92	Pequeño
6285200	357900,592	823,4	357954,592	834,74	11,38	Mediano
6285124,63	357924,95	834,6	357954,95	843,29	8,66	Pequeño
6285124,63	358024,95	853,7	358074,95	874,52	20,85	Mediano
6284814,48	358006,48	870,4	358056,48	881,20	10,84	Mediano
6284596,05	357889,51	860,2	357979,51	876,55	16,33	Mediano
6282100	357585,592	765,7	357648,592	775,02	9,30	Mediano
6282000	357567,592	760,7	357693,592	779,27	18,62	Mediano
6281736,25	357537,57	746,3	357612,14	757,14	10,80	Mediano
6281700	357549,592	745,3	357621,592	754,20	8,90	Pequeño
6281614,83	357687,2	749,3	357729,6	755,27	5,97	Pequeño
6281464,09	357748,63	747,0	357801,35	750,12	3,12	Pequeño
6281332,71	357766,31	745,0	357820,67	749,55	4,55	Pequeño
6281228,06	357776,4	745,0	357884,41	750,01	5,00	Pequeño
6281098,86	357818,19	745,0	357894,26	752,60	7,57	Pequeño
6280961,05	357818,42	744,6	357864,98	748,34	3,75	Pequeño
6280900	357759,7	741,2	357840,7	750,51	9,27	Mediano

6280821,03	357742,46	741,4	357812,35	749,82	8,46	Pequeño
6280800	357741,7	741,2	357813,7	750,80	9,56	Mediano
6280705,24	357748,04	742,3	357802,41	749,91	7,60	Pequeño
6280700	357732,7	740,9	357804,7	749,99	9,07	Mediano
6280600	357705,7	740,5	357813,7	748,99	8,49	Pequeño
6280567,43	357697,03	740,0	357769,86	745,54	5,50	Pequeño
6280500	357714,7	740,9	357732,7	744,36	3,50	Pequeño

ANEXO II: perfiles topográficos

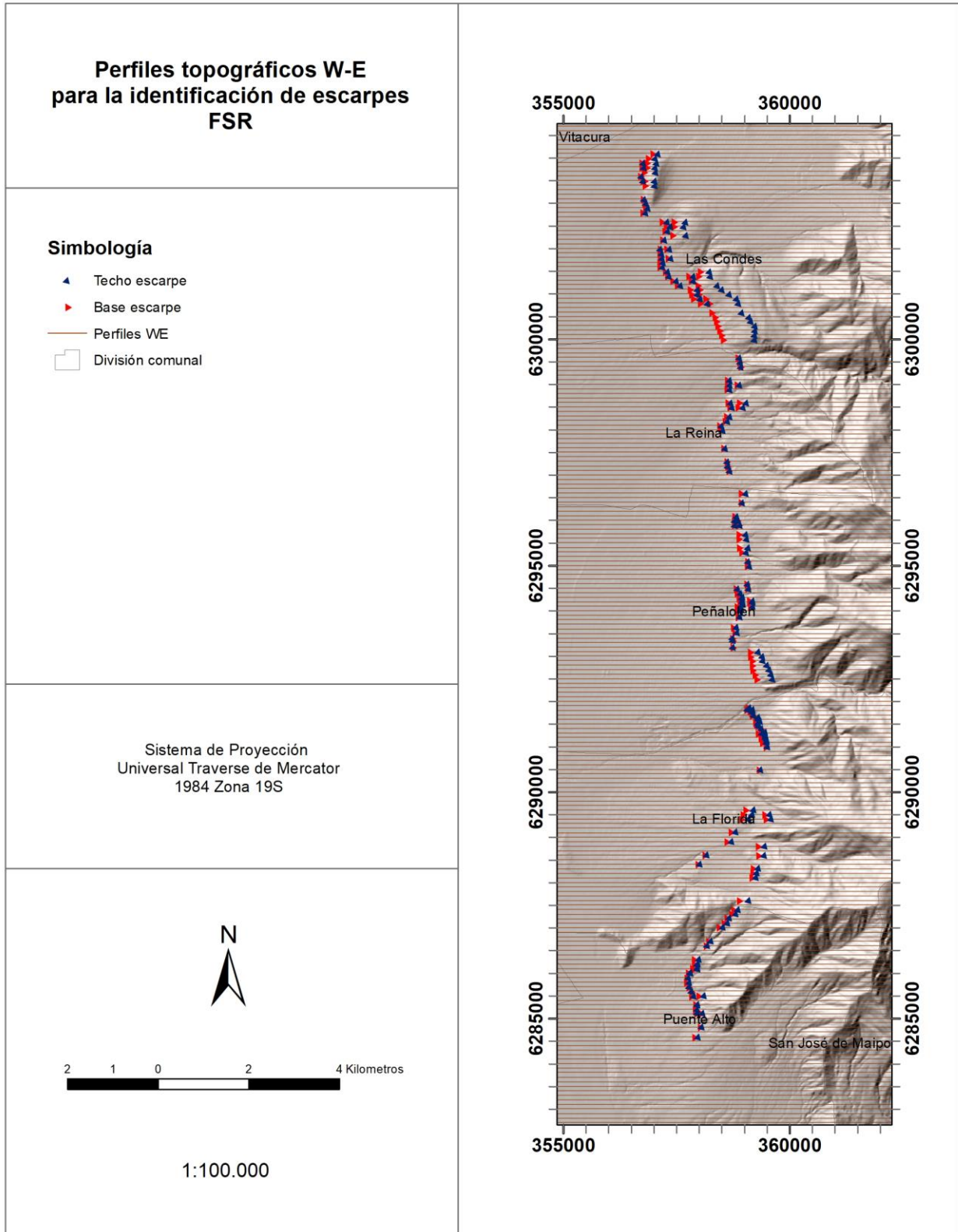
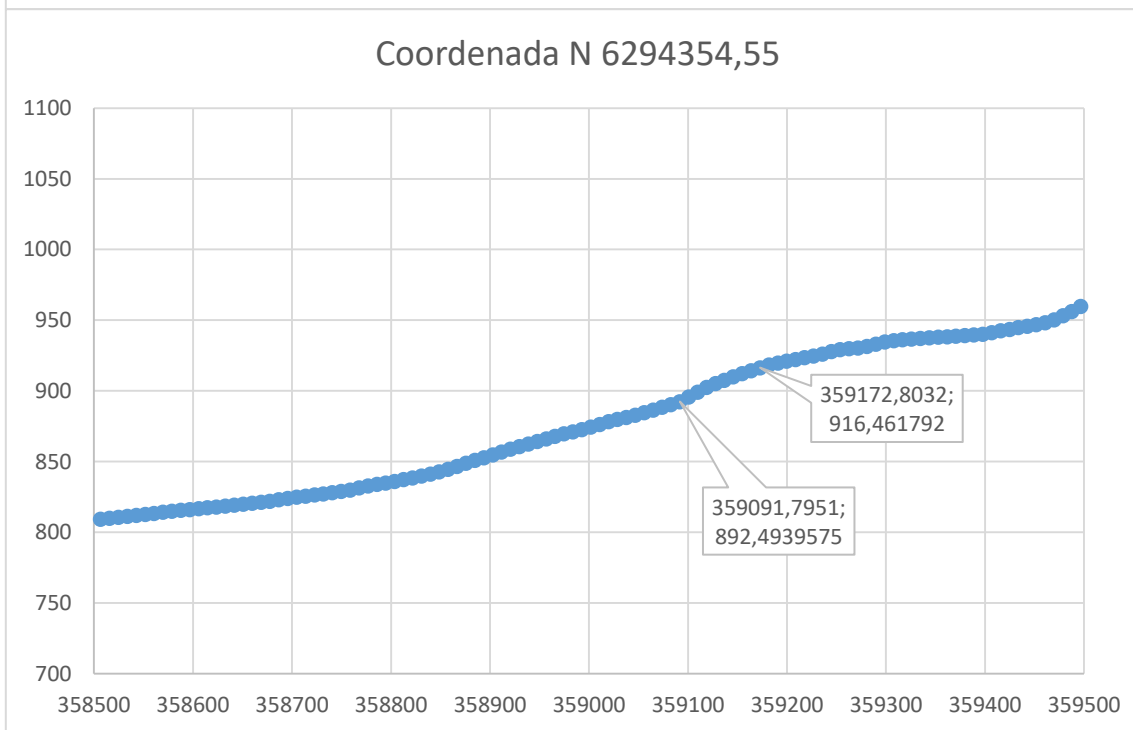
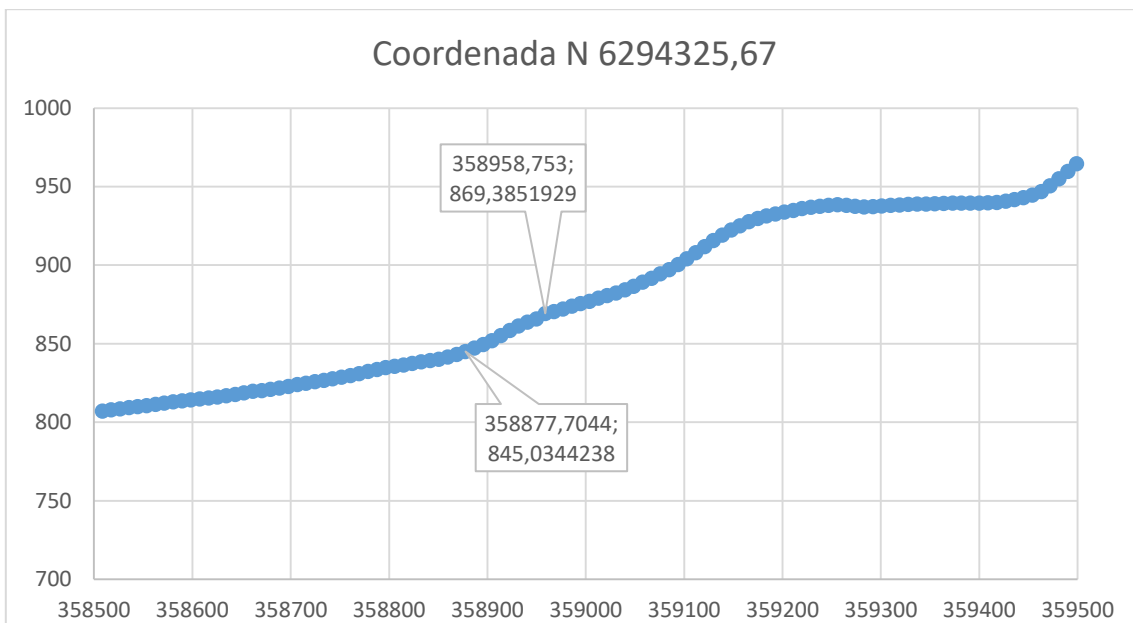
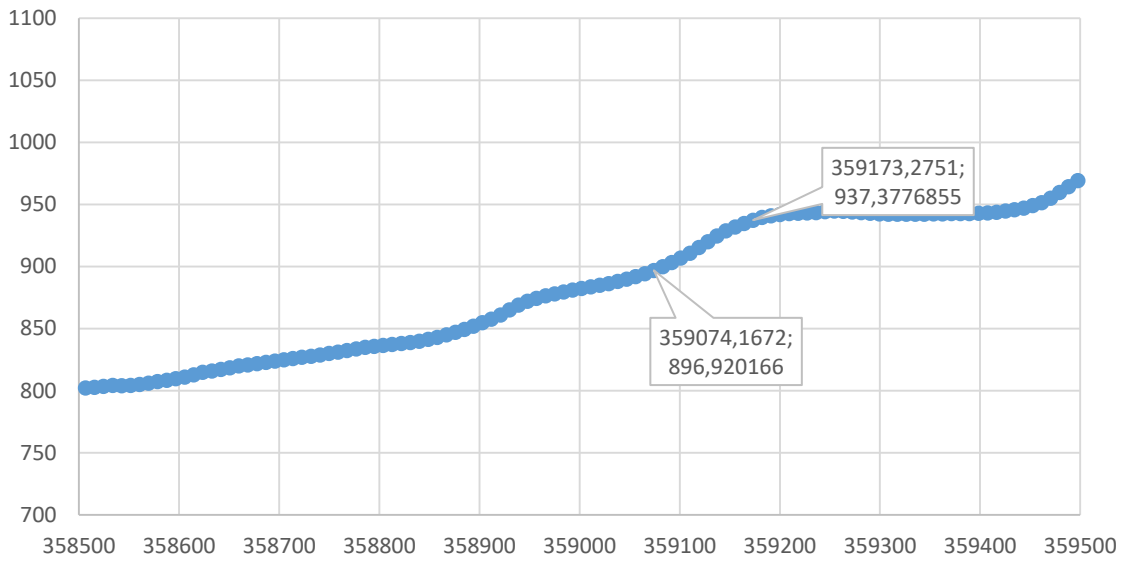


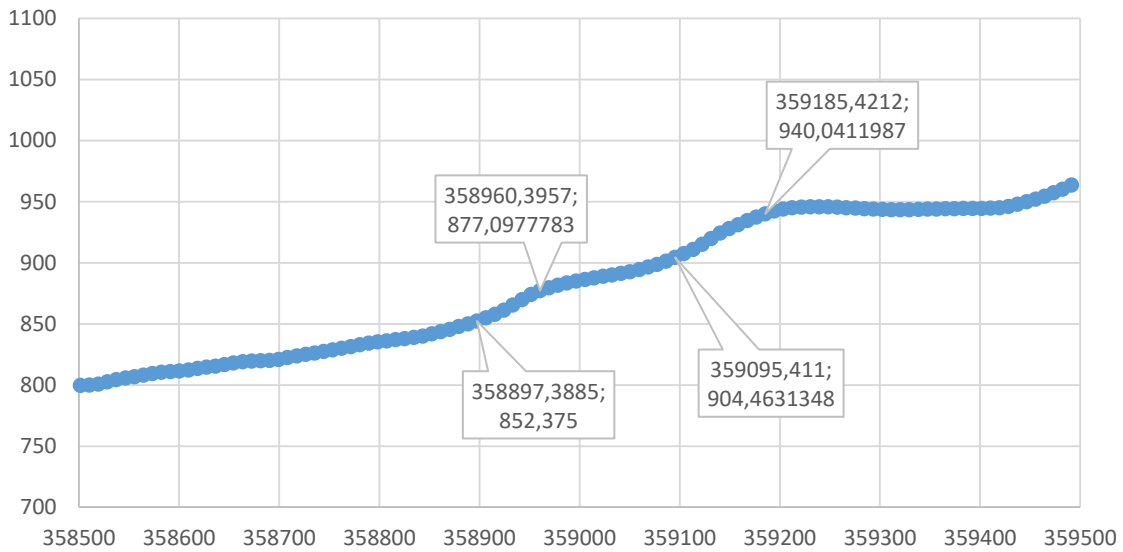
Figura 10.1: Proyección de perfiles topográficos sobre frente cordillerano de Santiago.



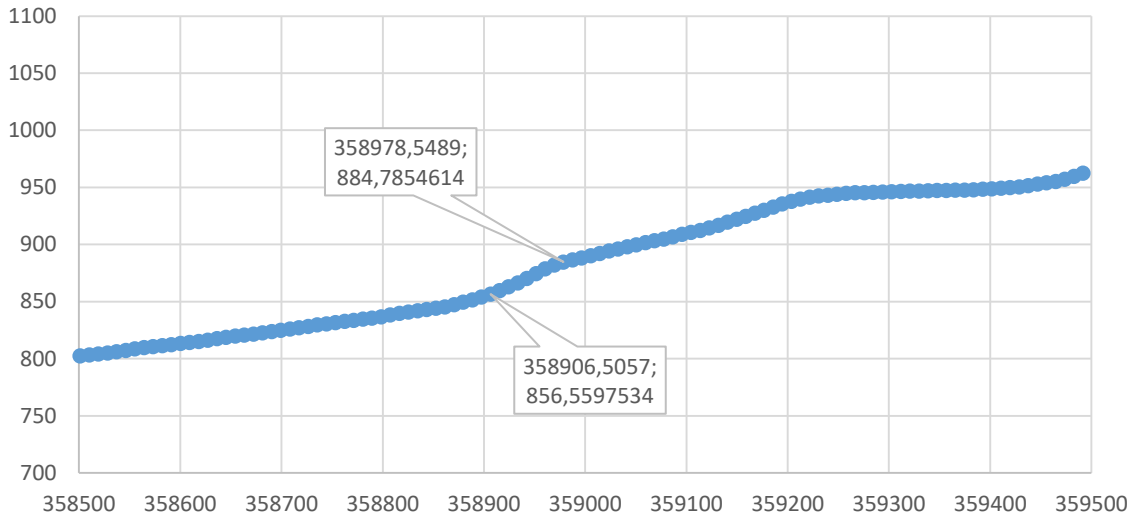
Coordenada N 6294260,69



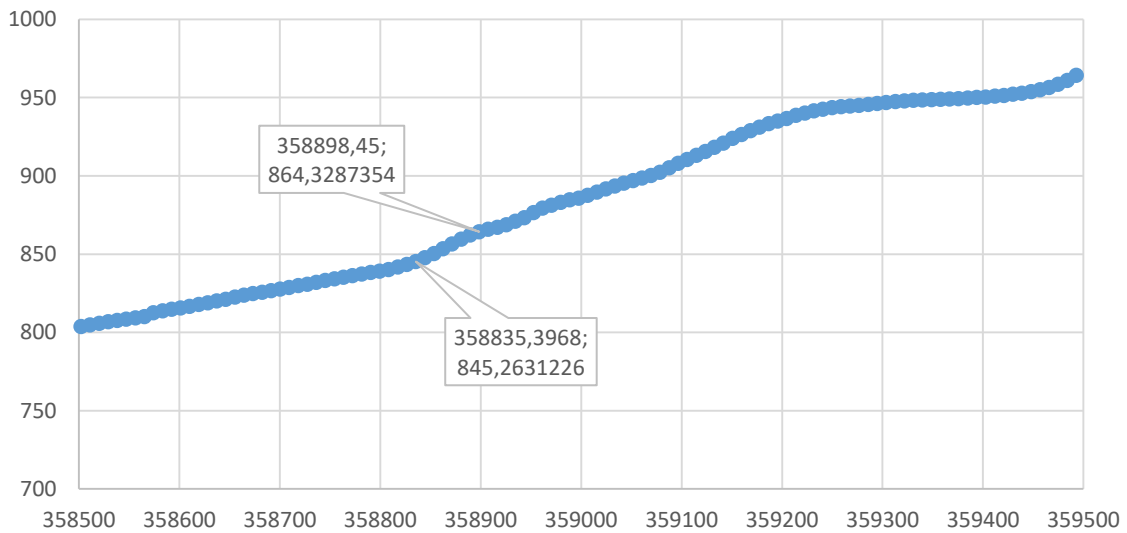
Coordenada N 6294232,02



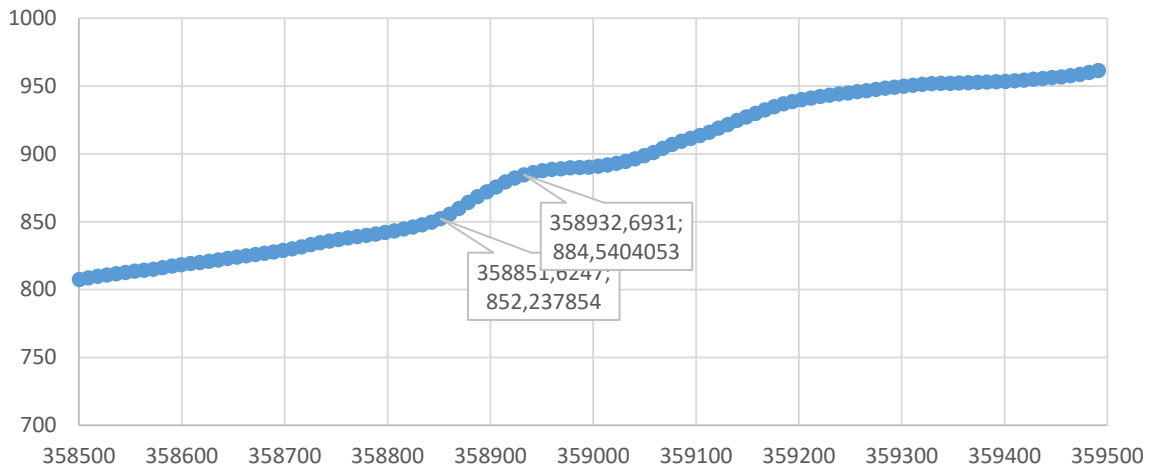
Coordenada N 6294159,6



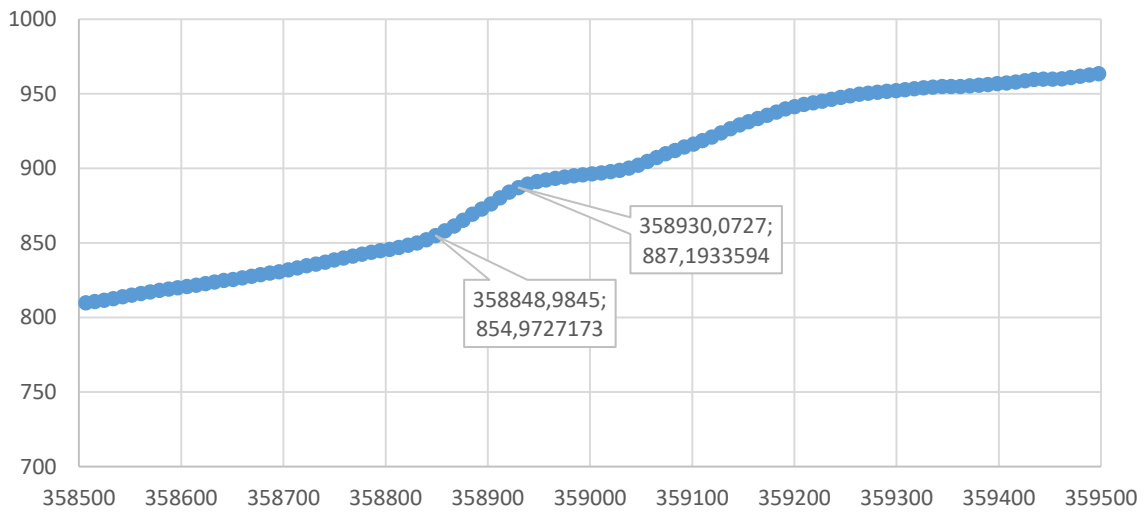
Coordenada N 6294130,72

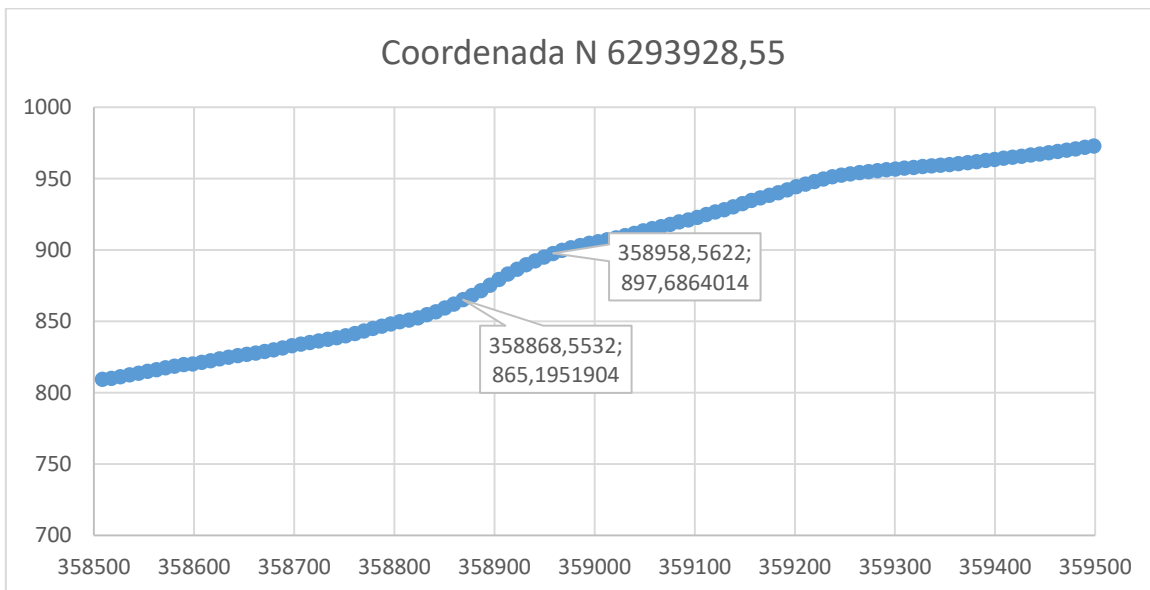
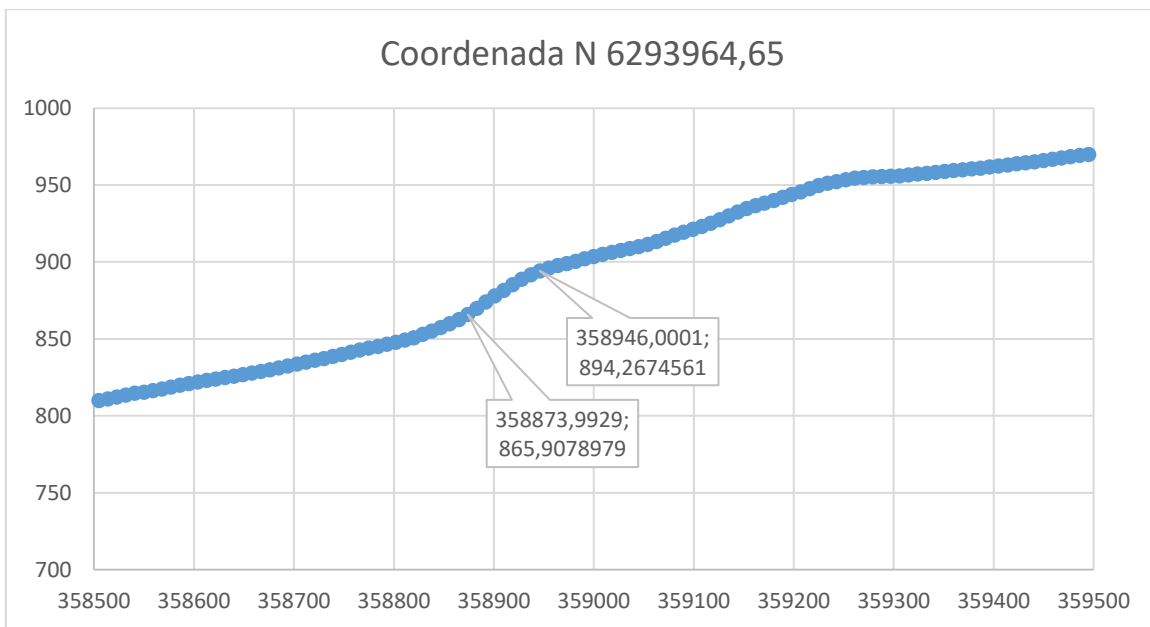


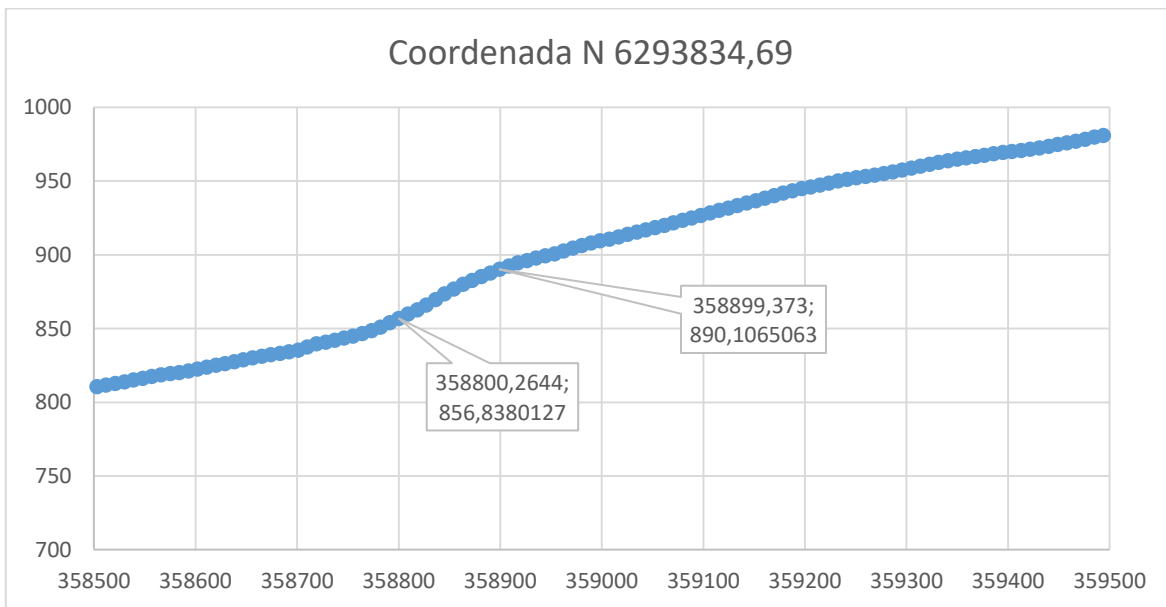
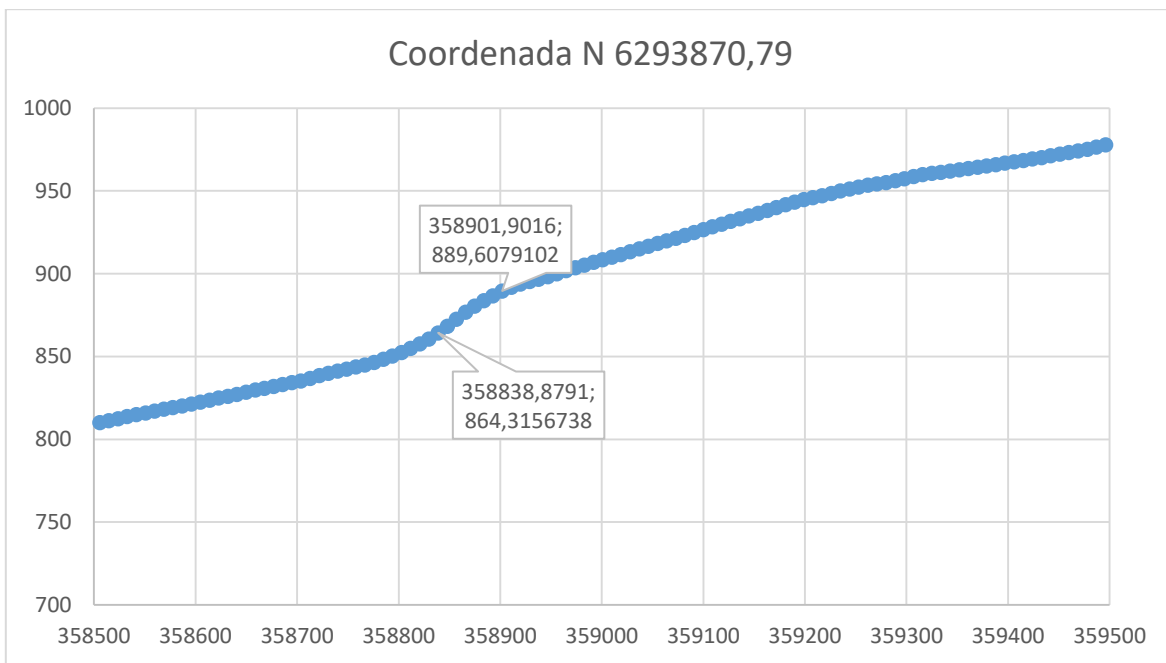
Coordenada N 6294065,74

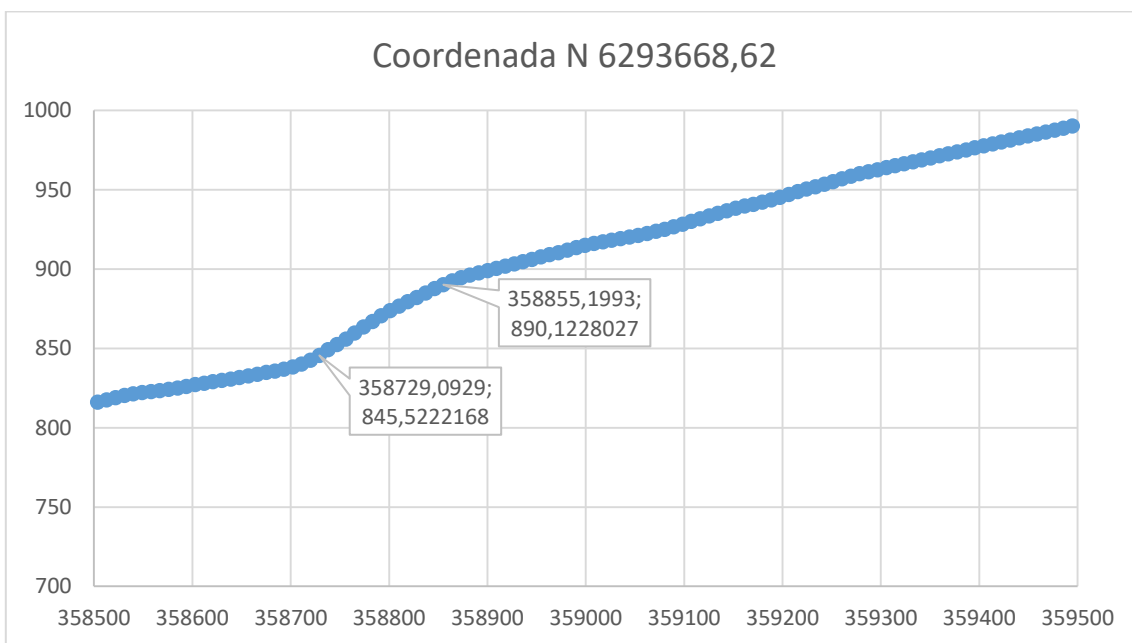
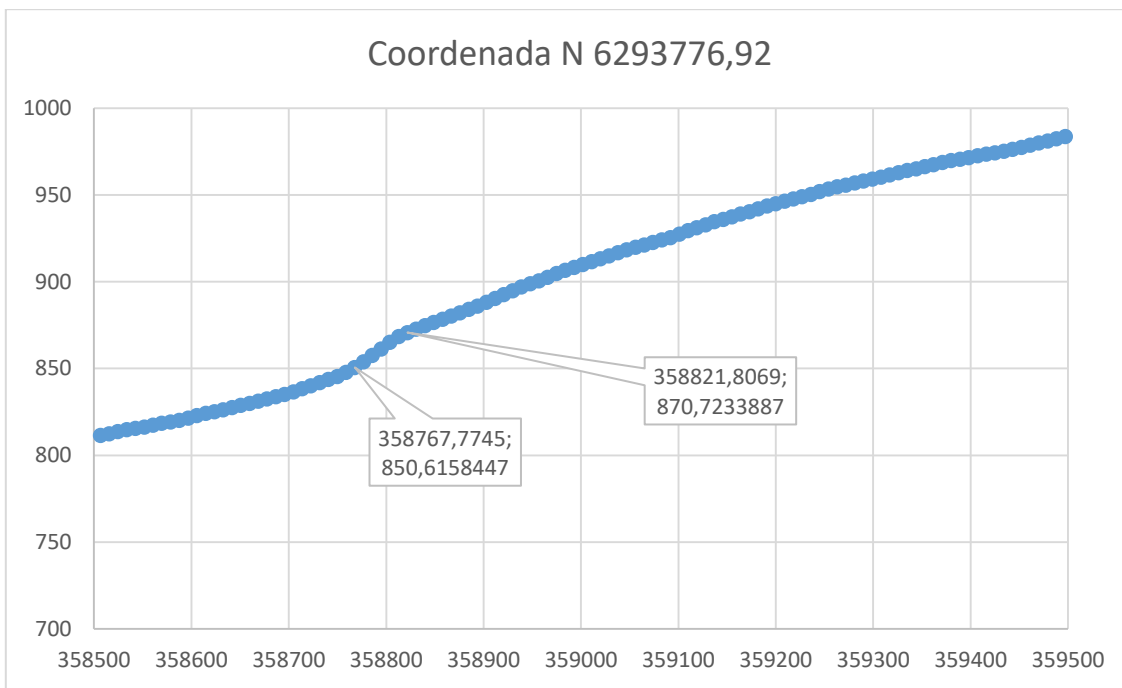


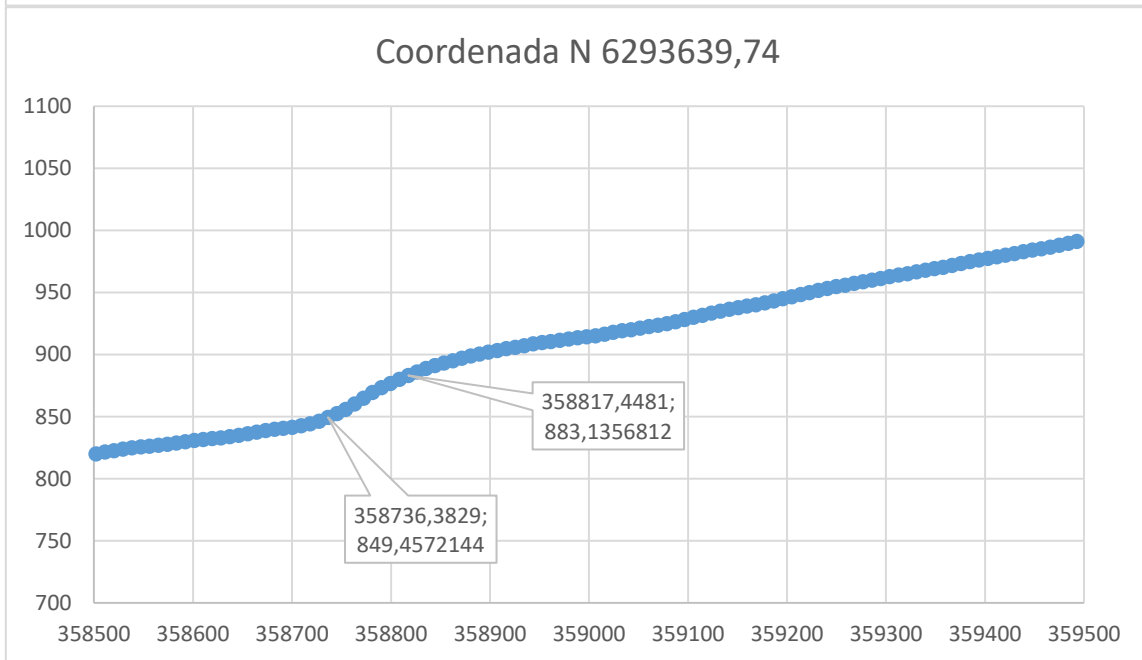
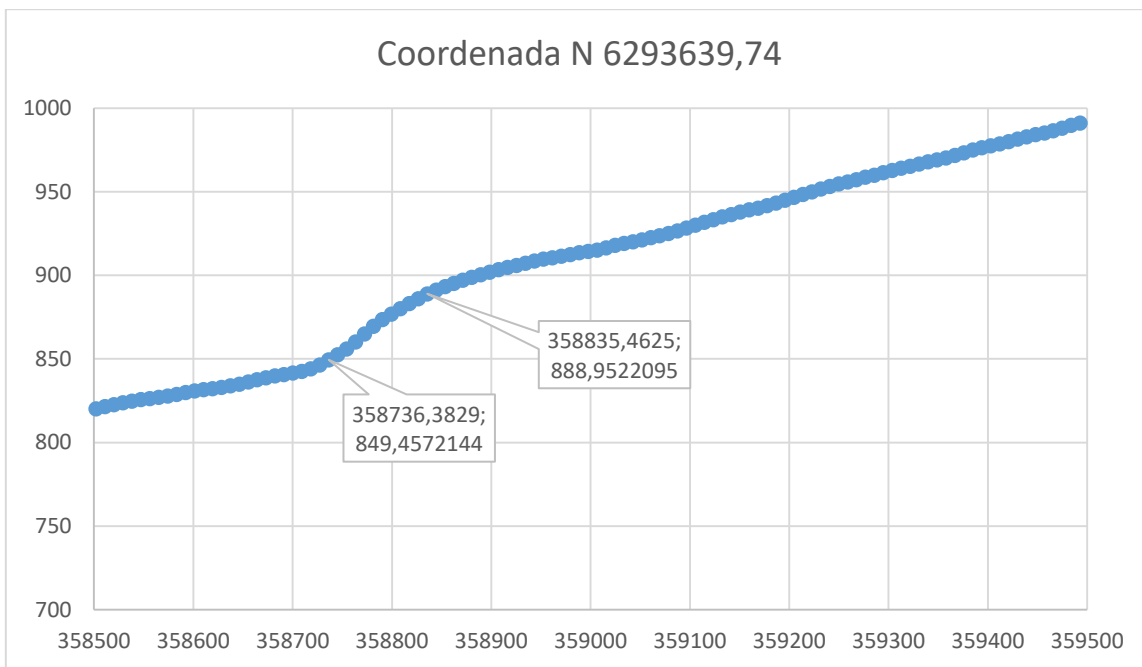
Coordenada N 6294029,64



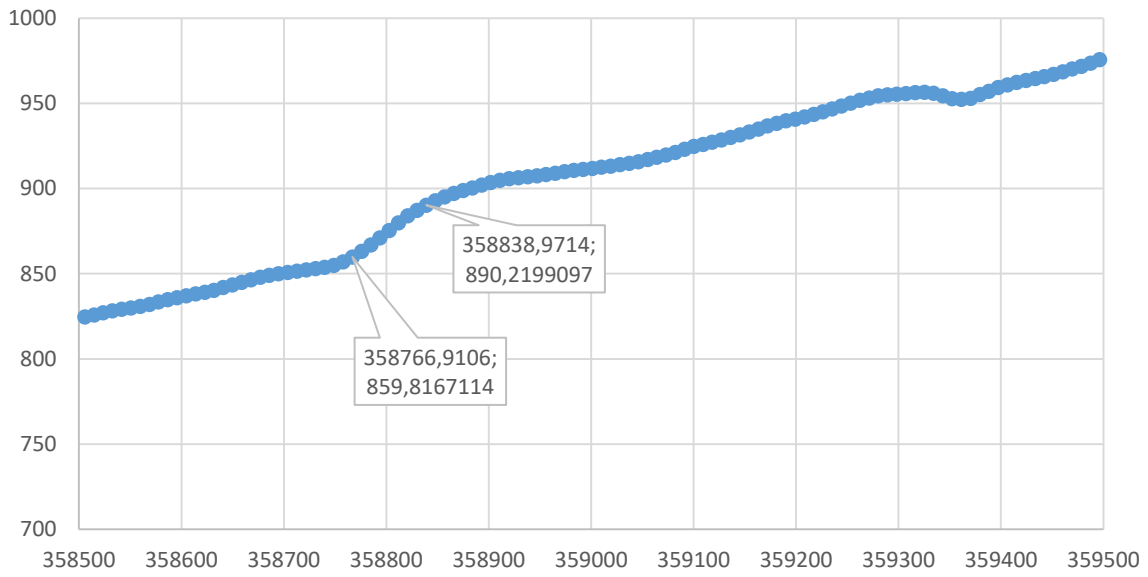




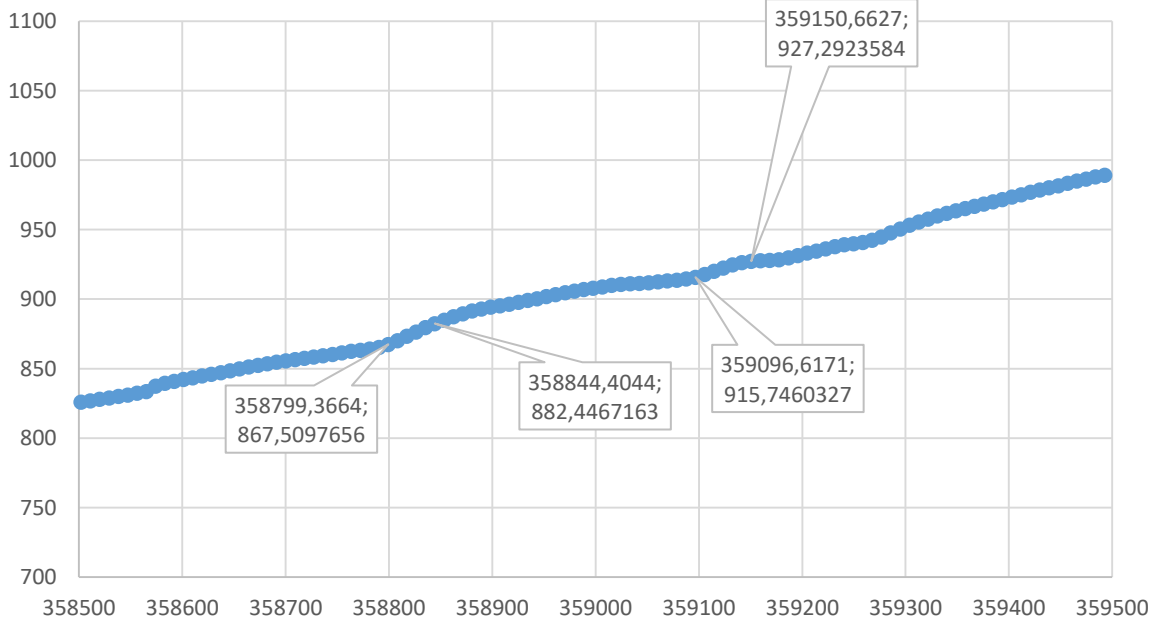


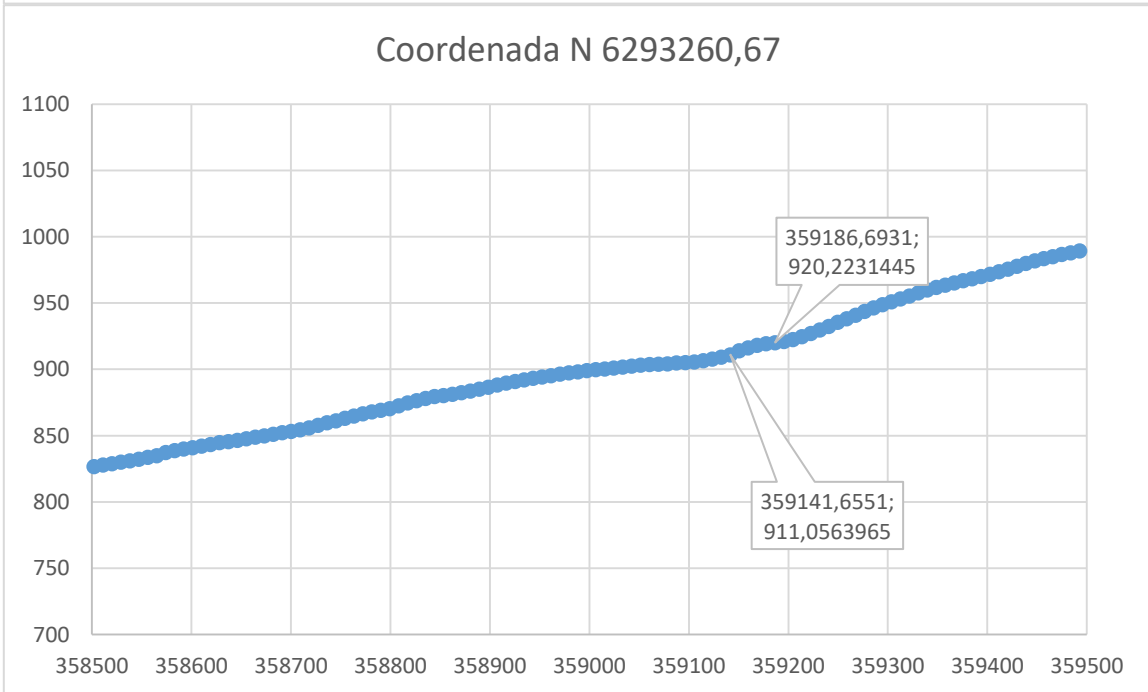
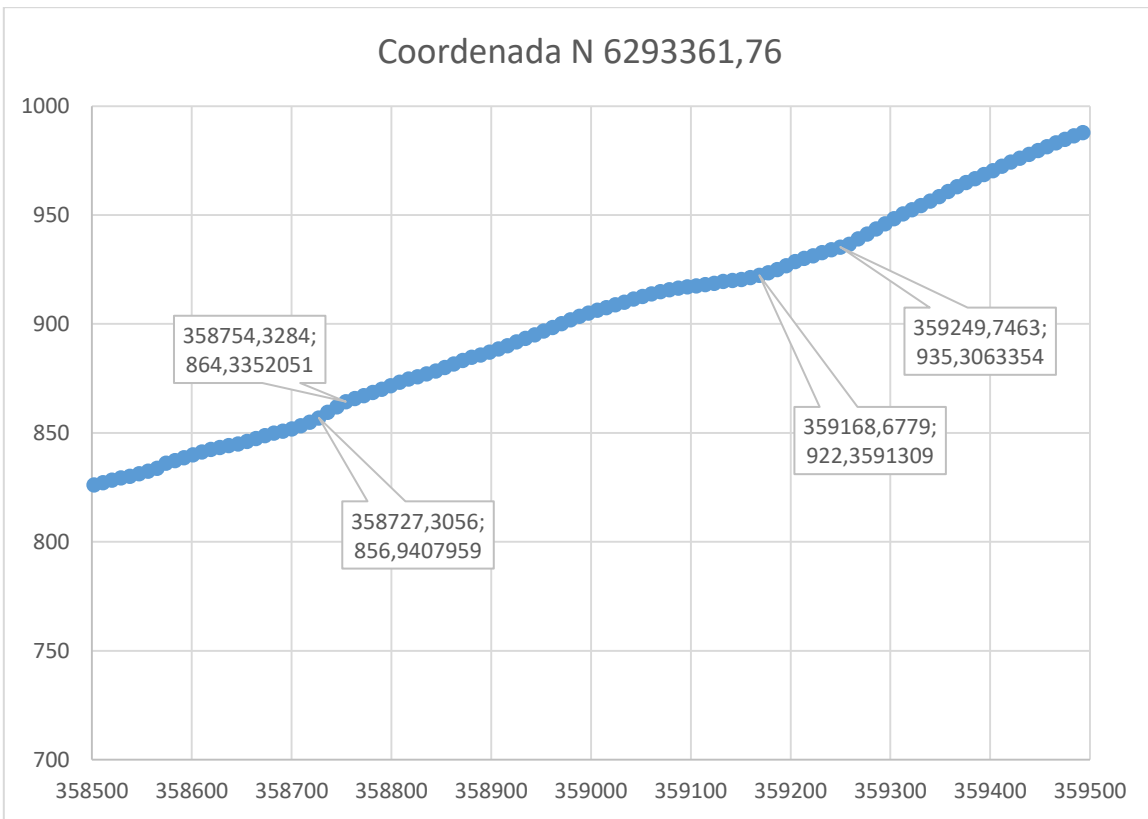


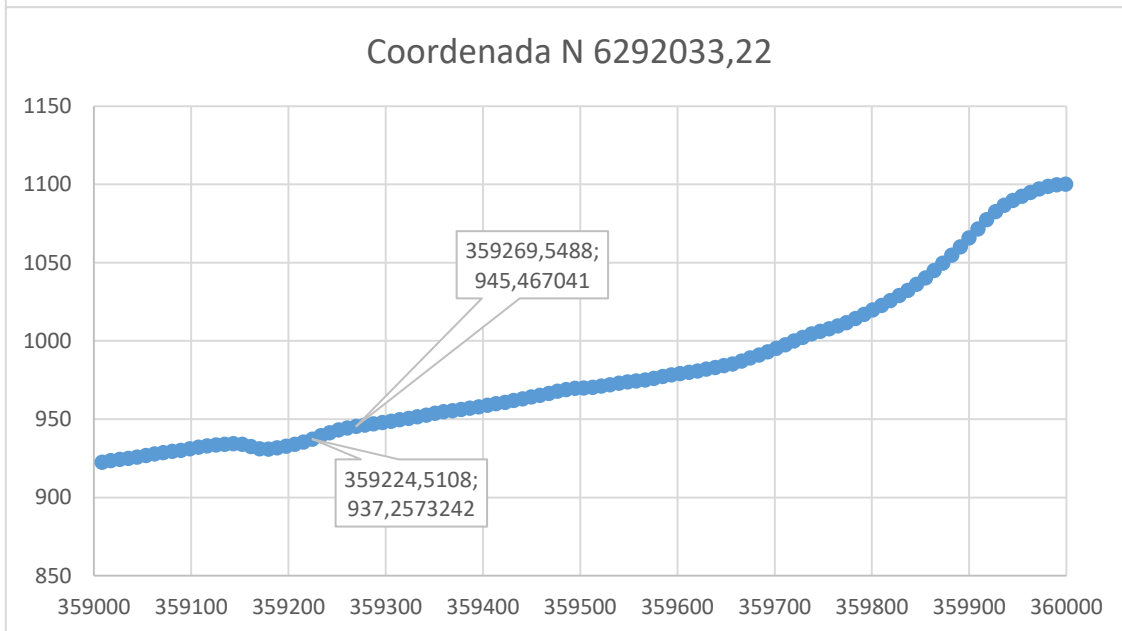
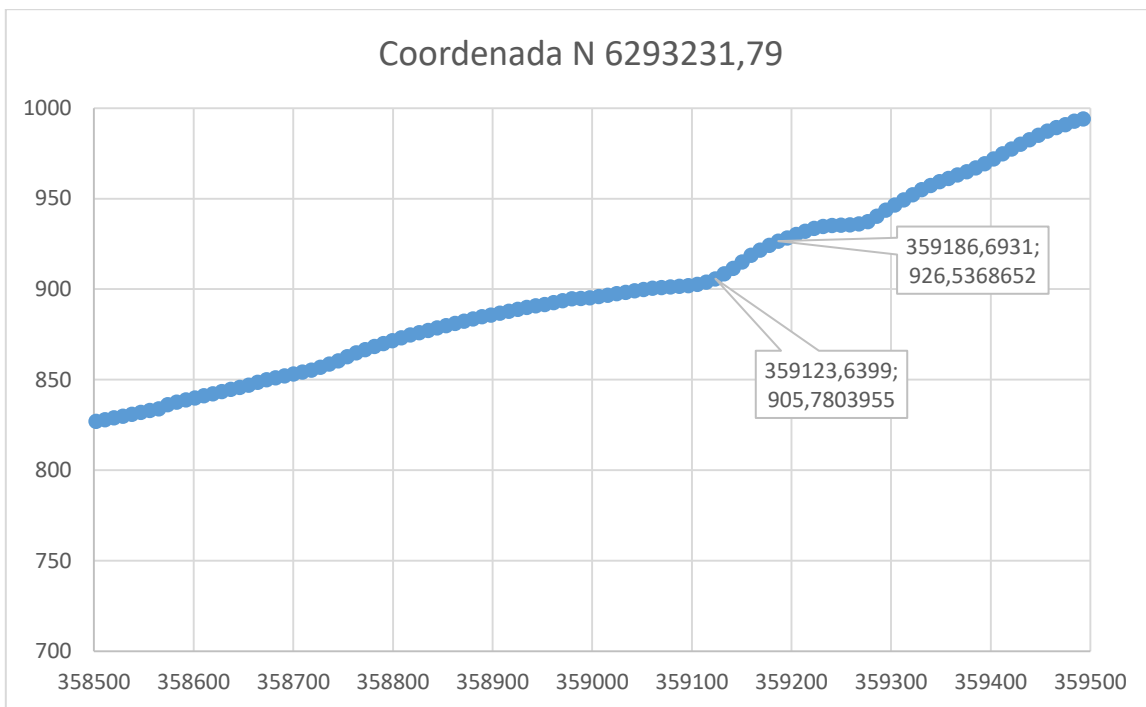
Coordenada N 6293531,43

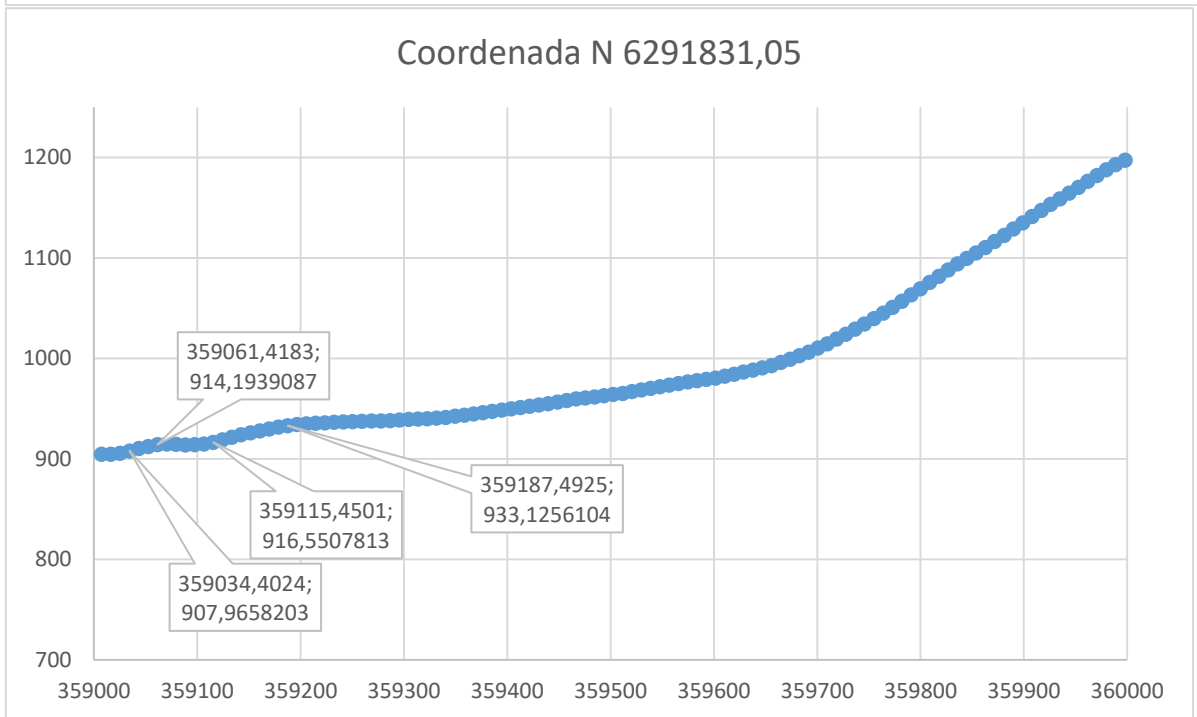
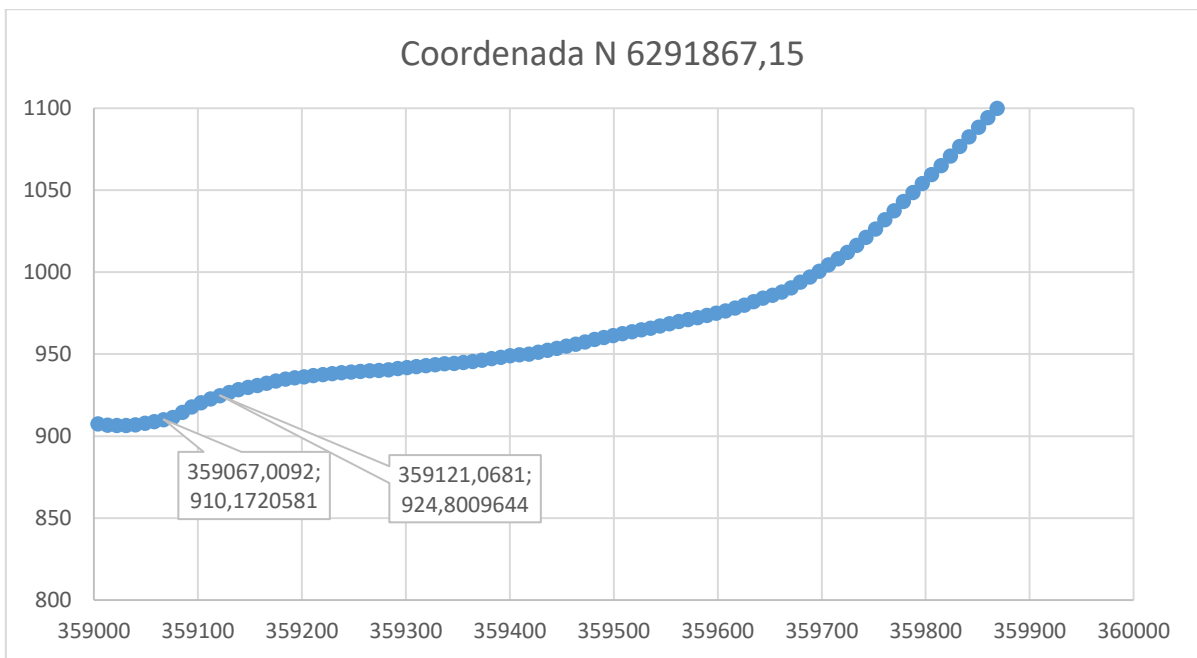


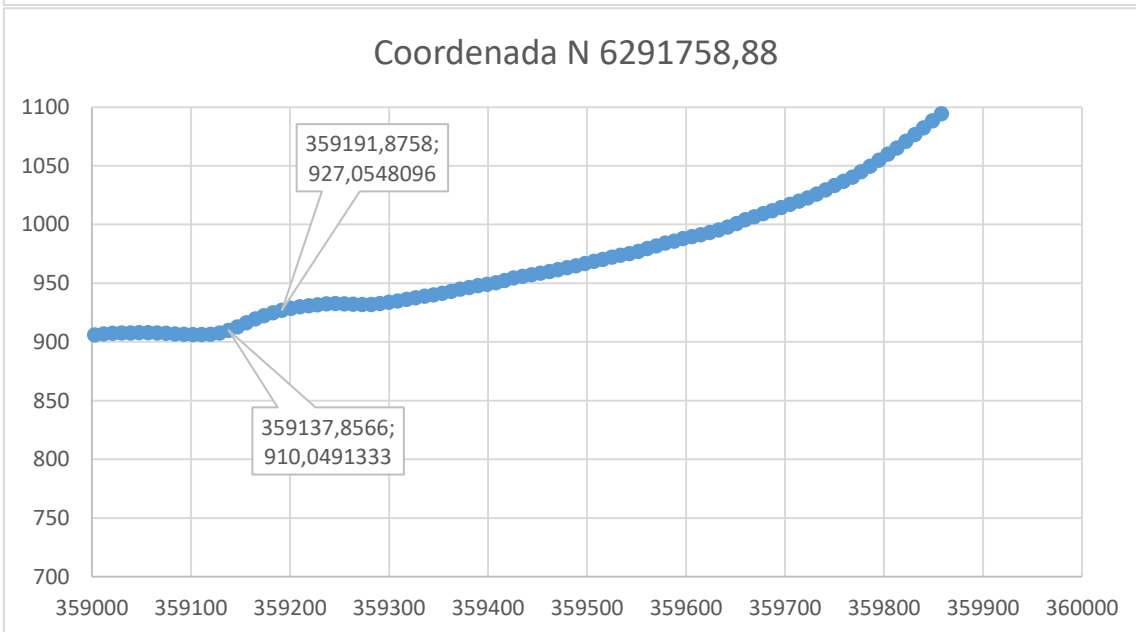
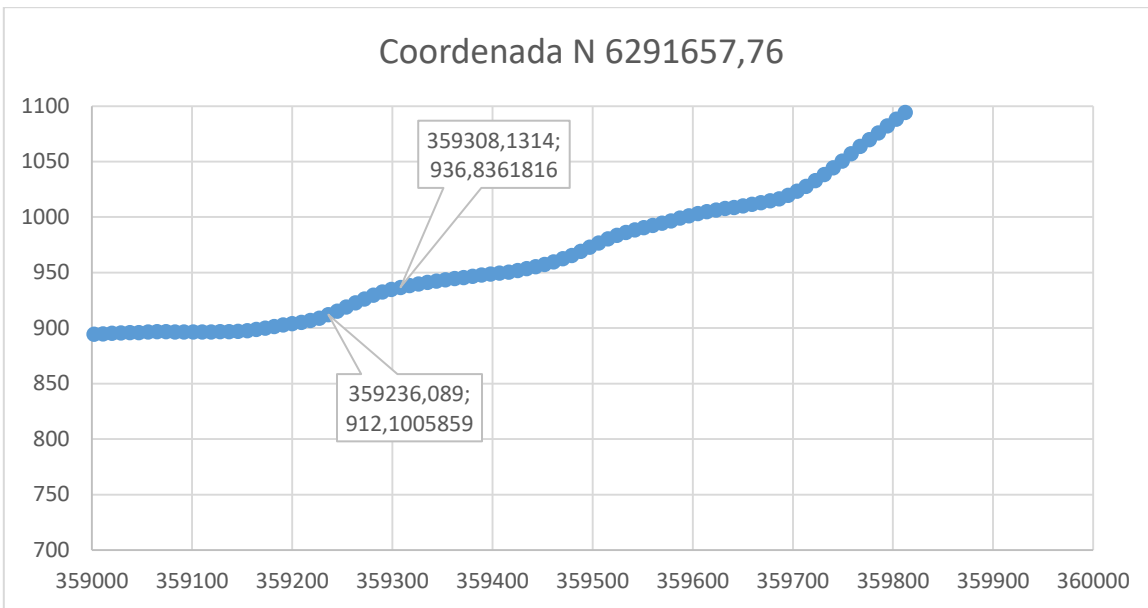
Coordenada N 6293455,62

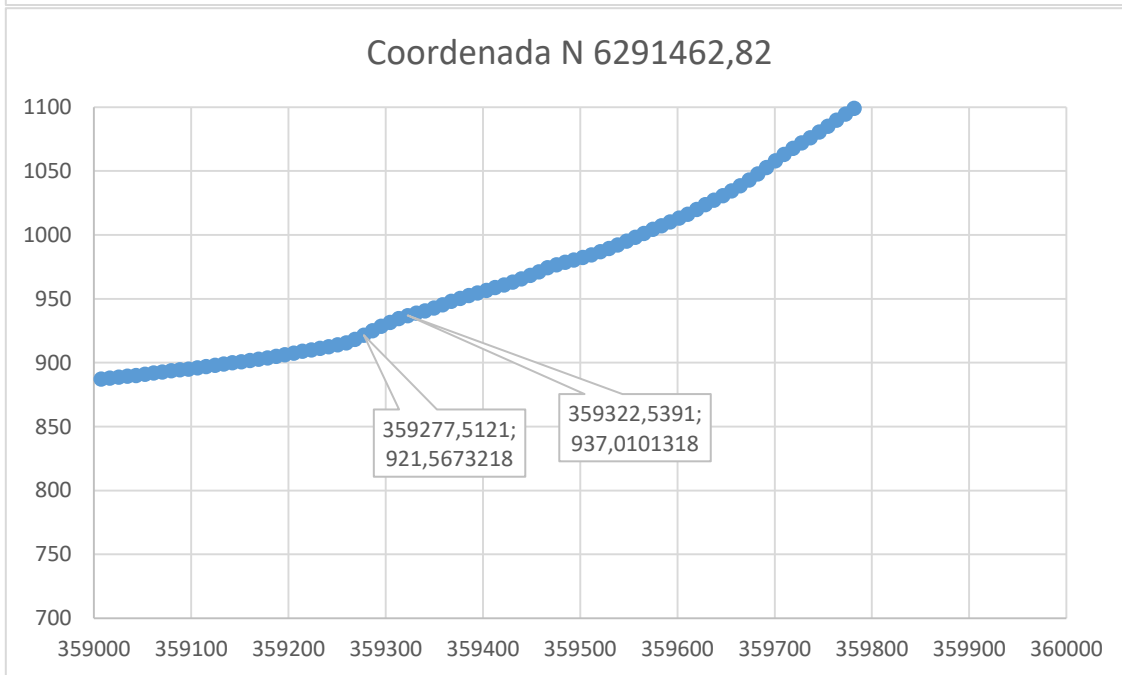
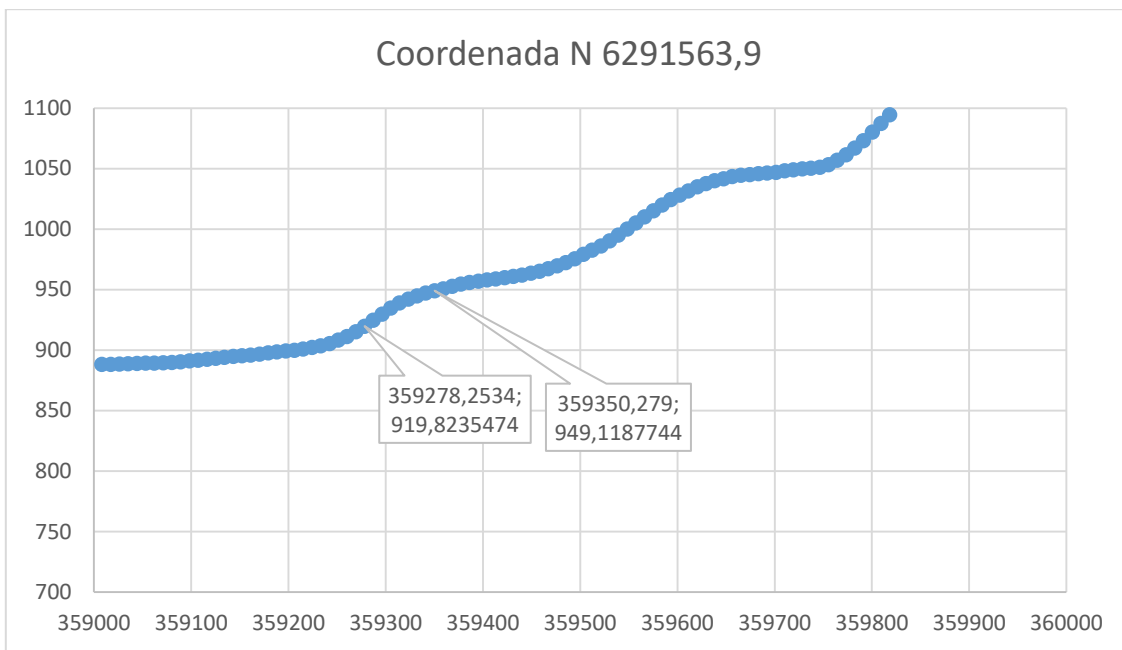


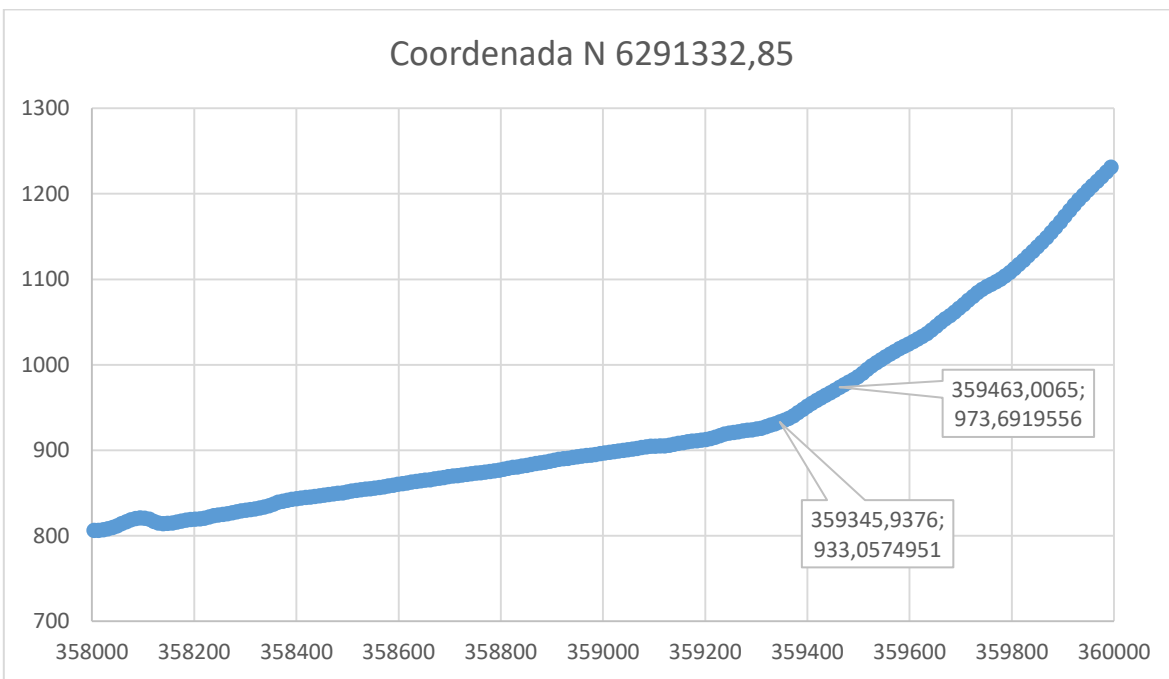
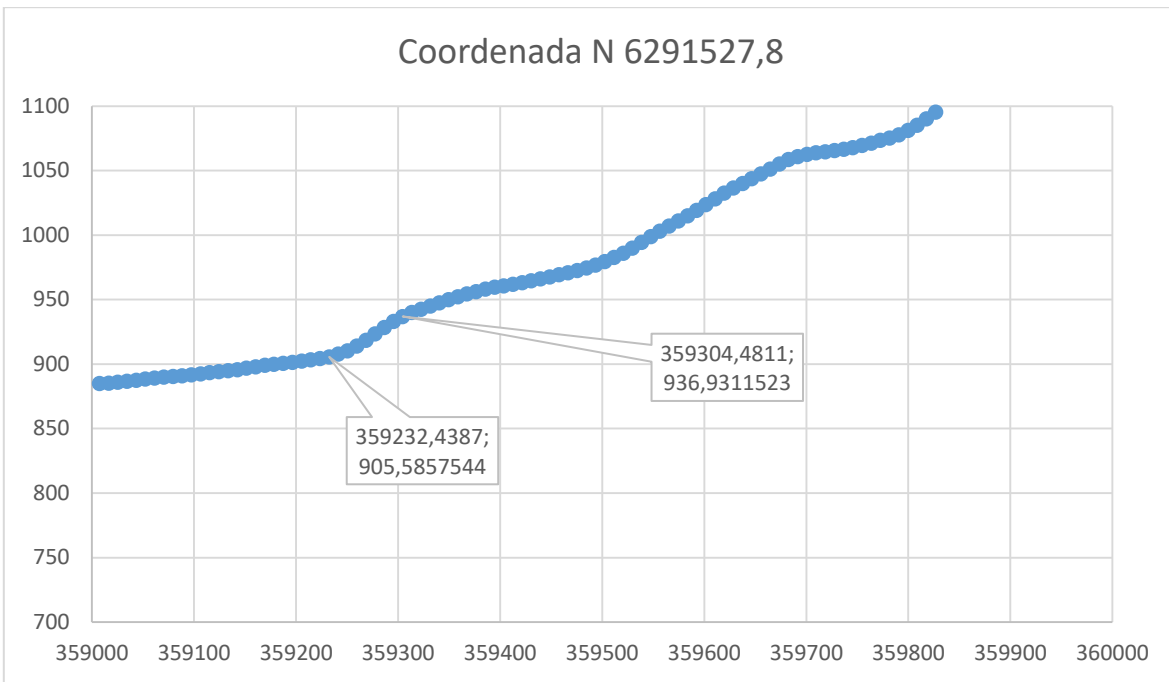




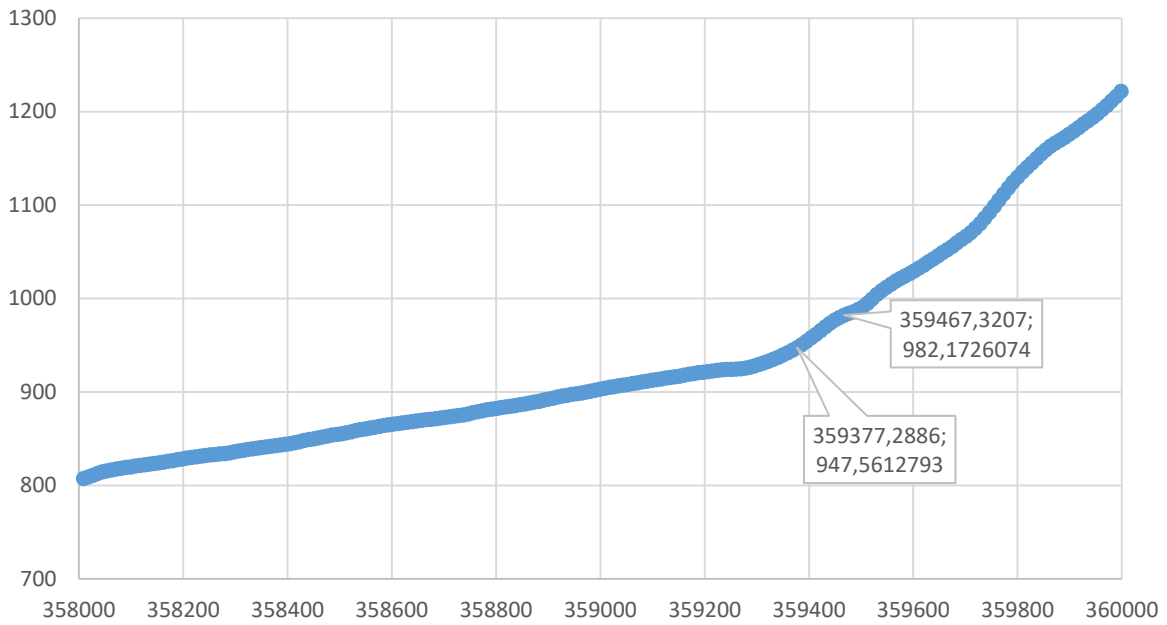




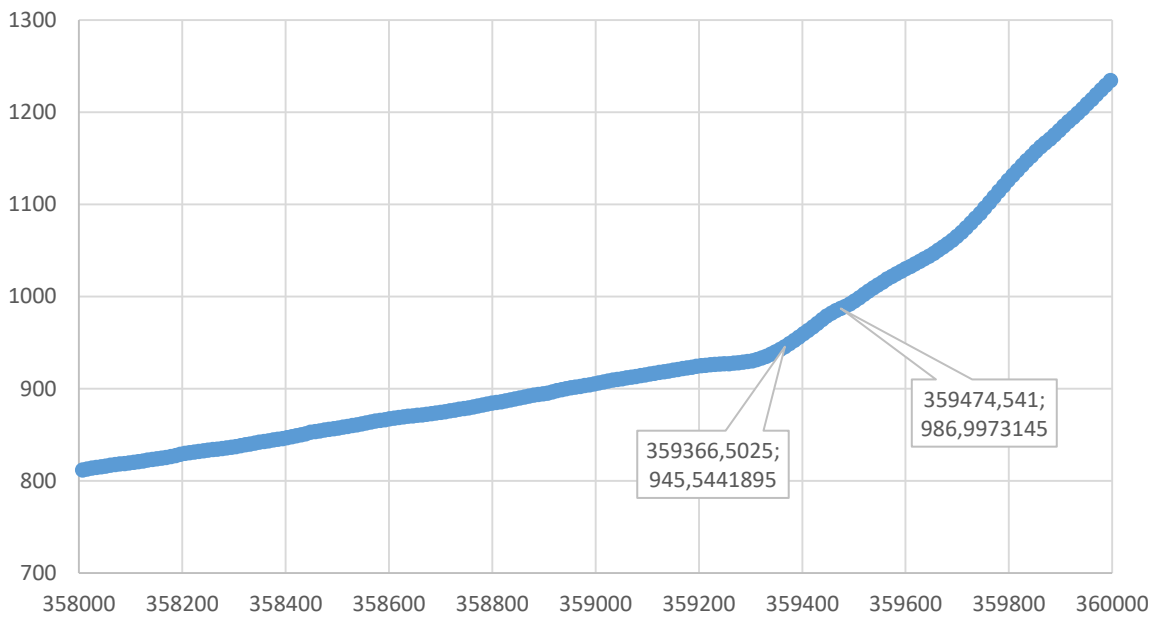


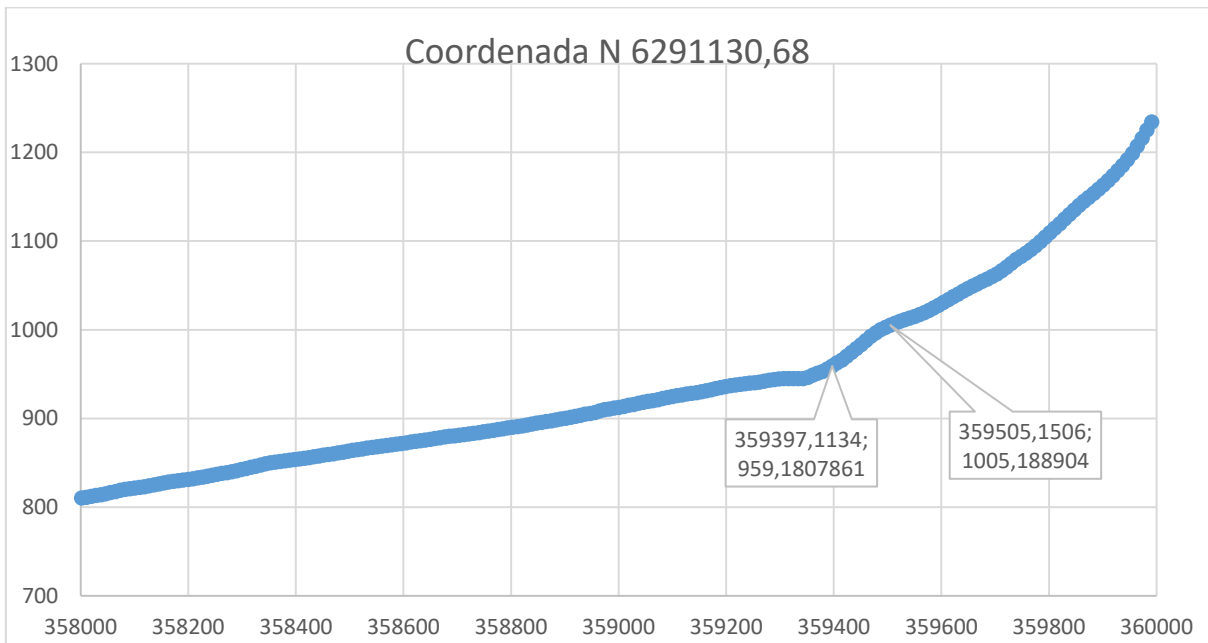
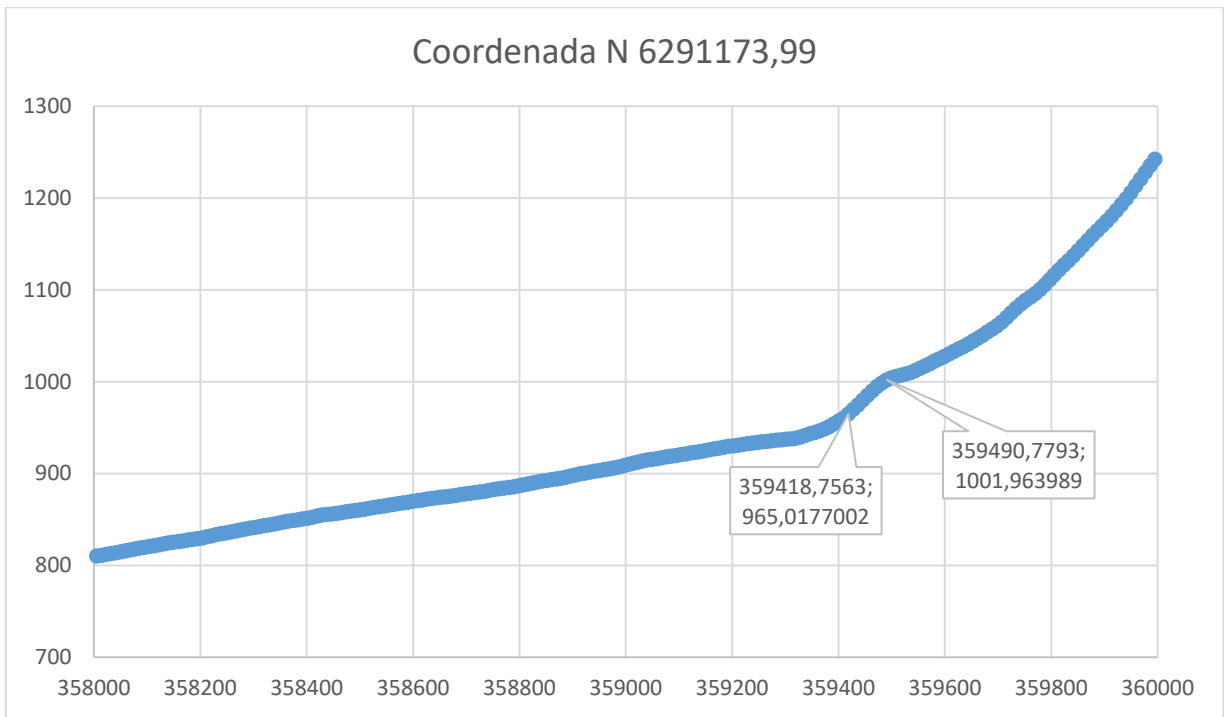


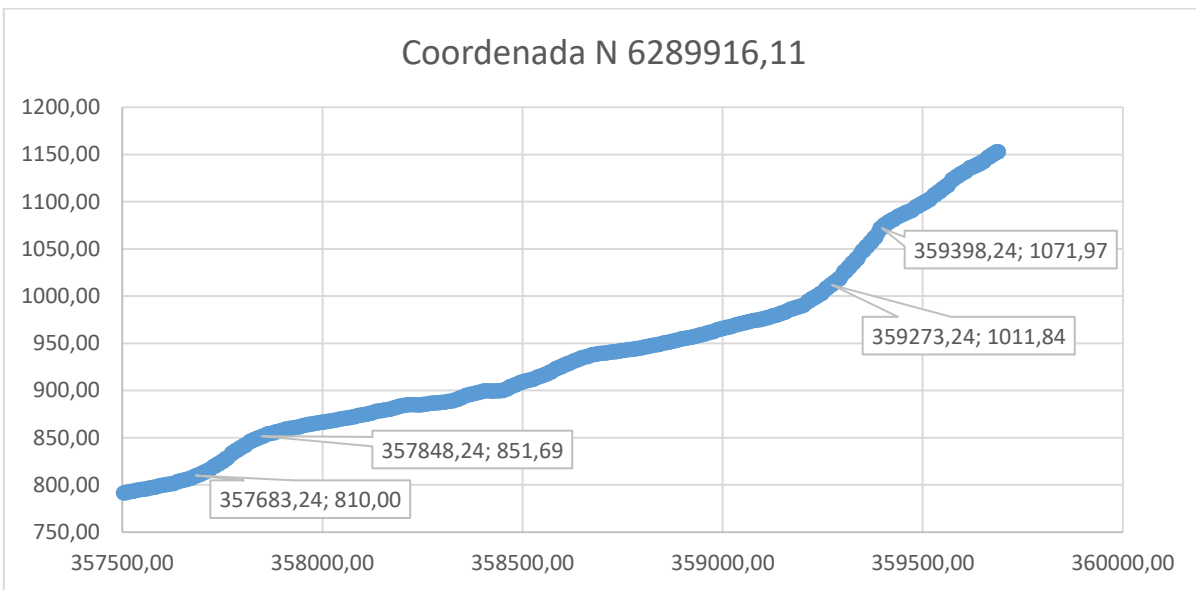
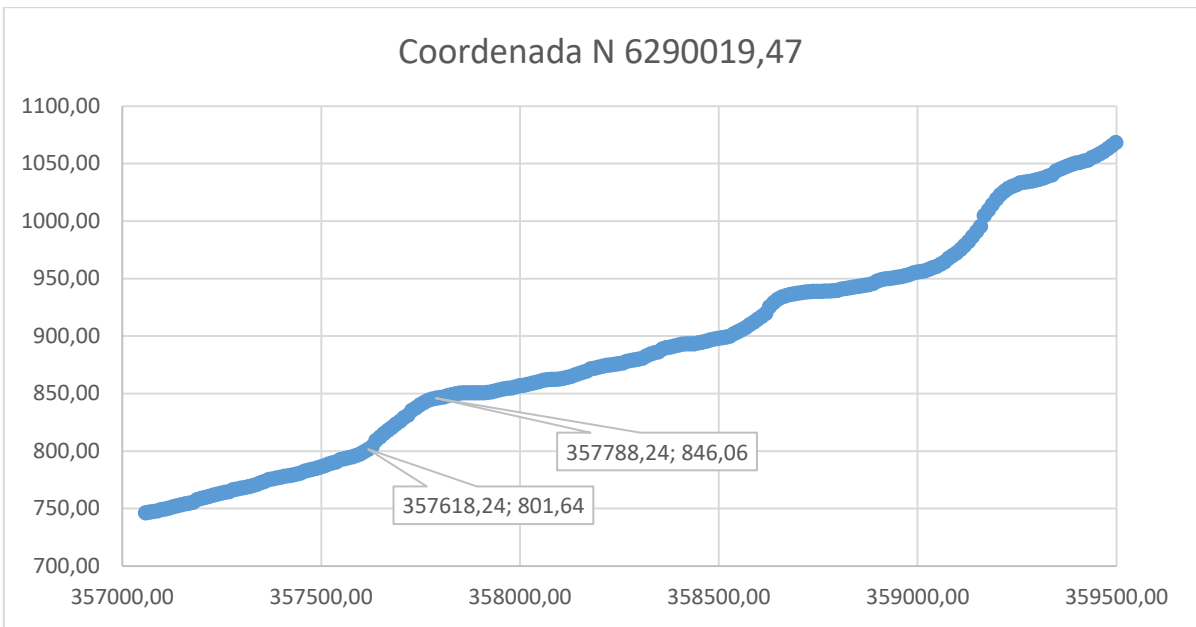
Coordenada N 6291260,65

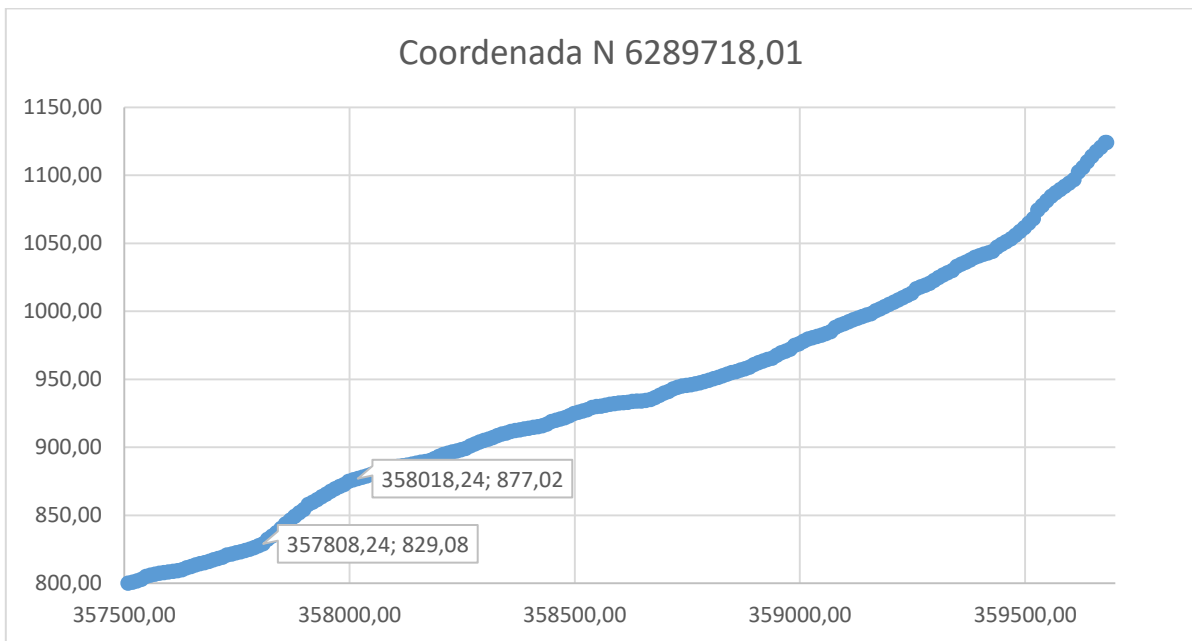
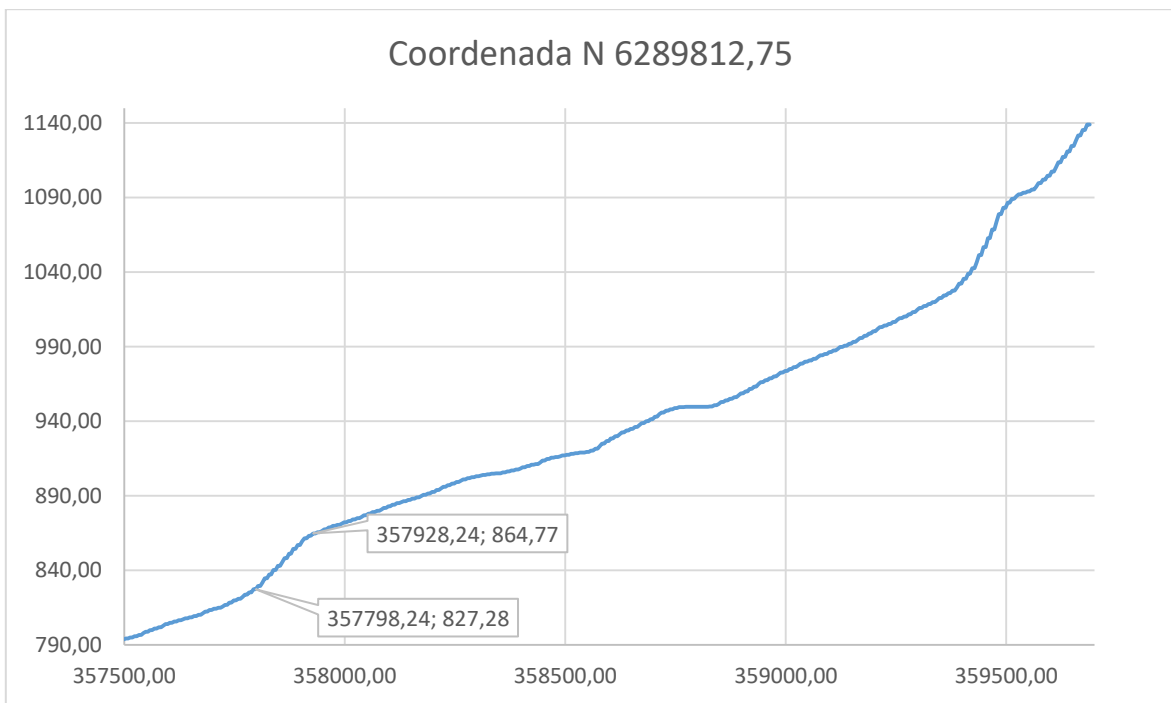


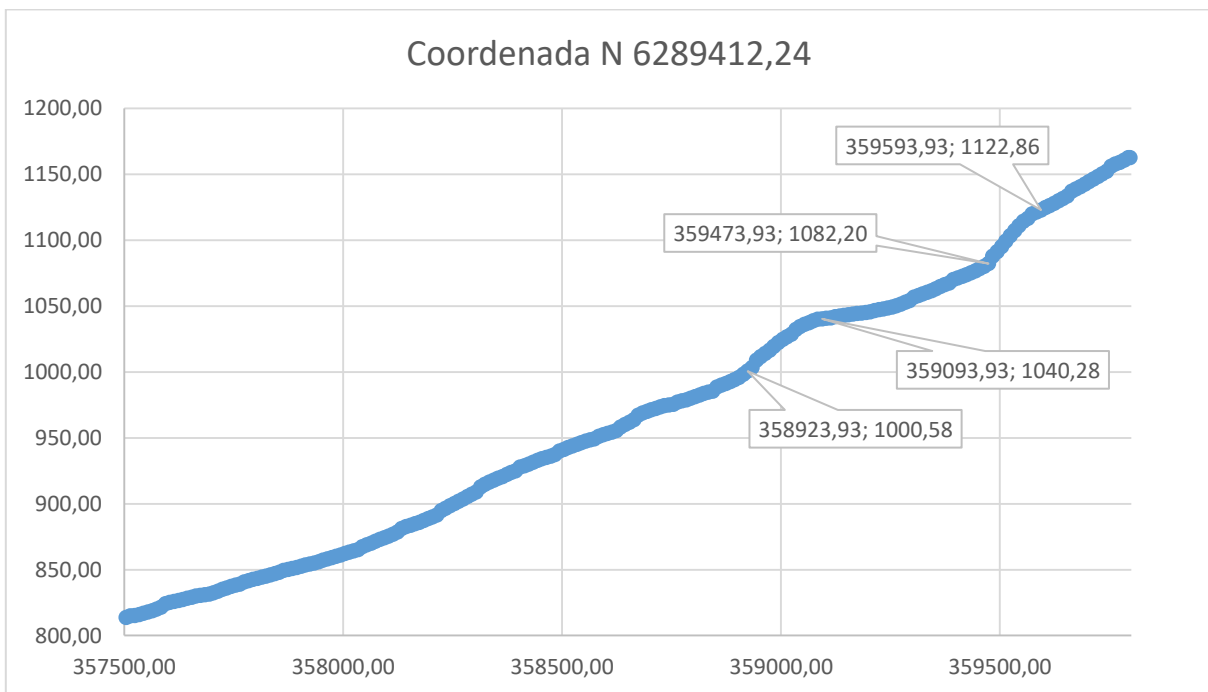
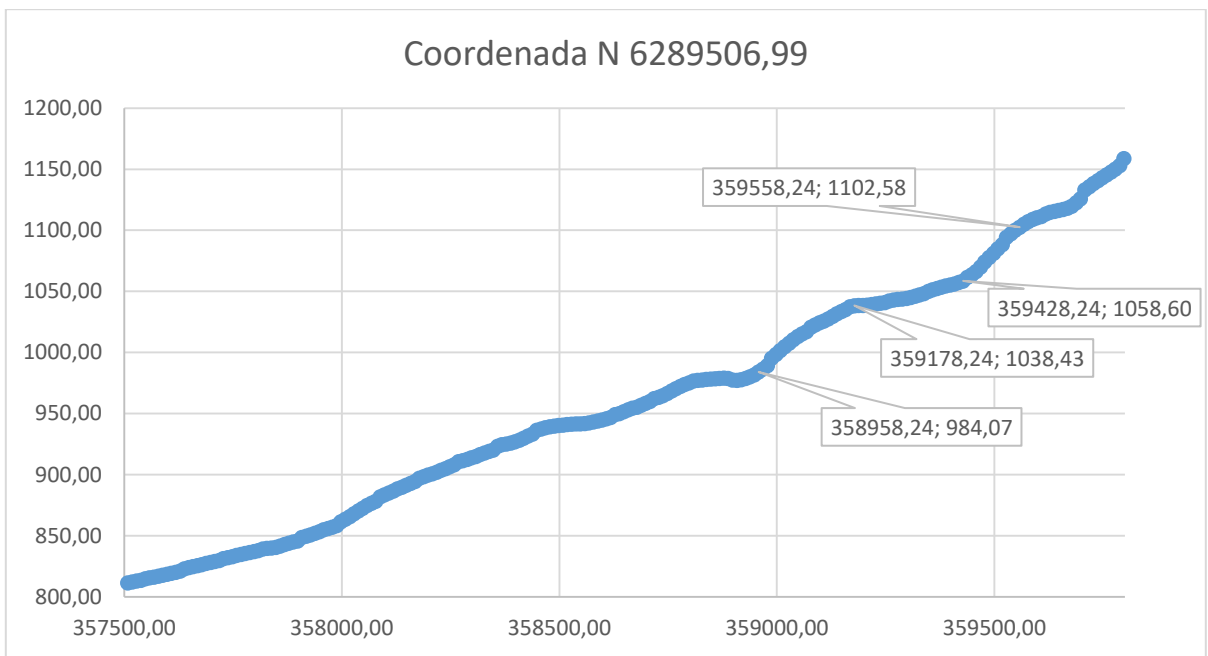
Coordenada N 6291231,77

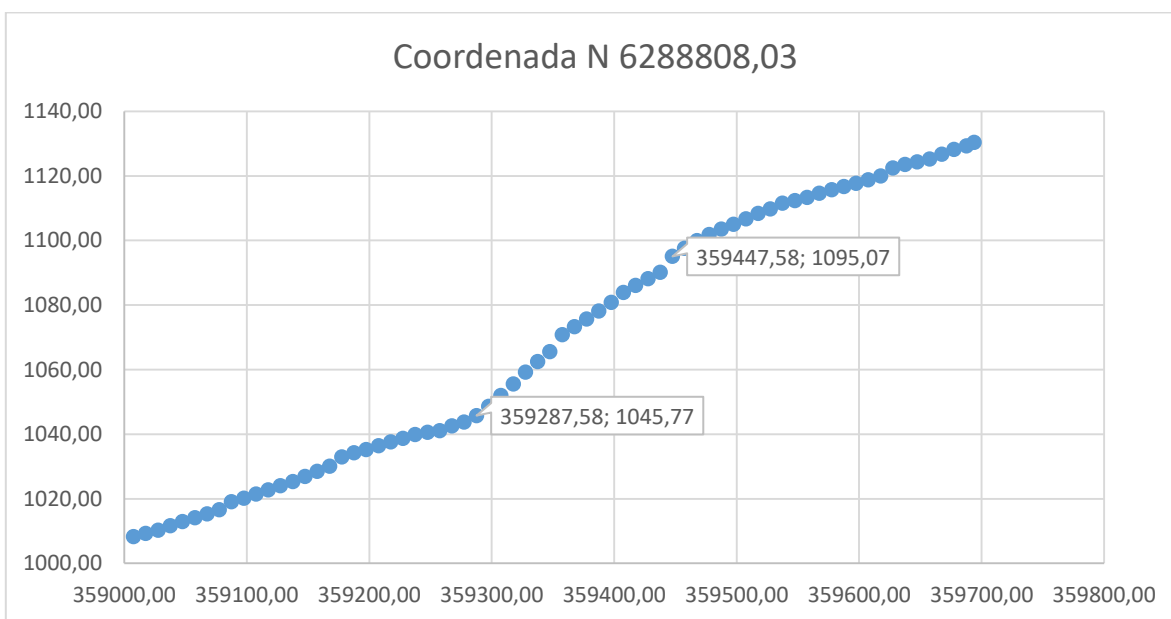
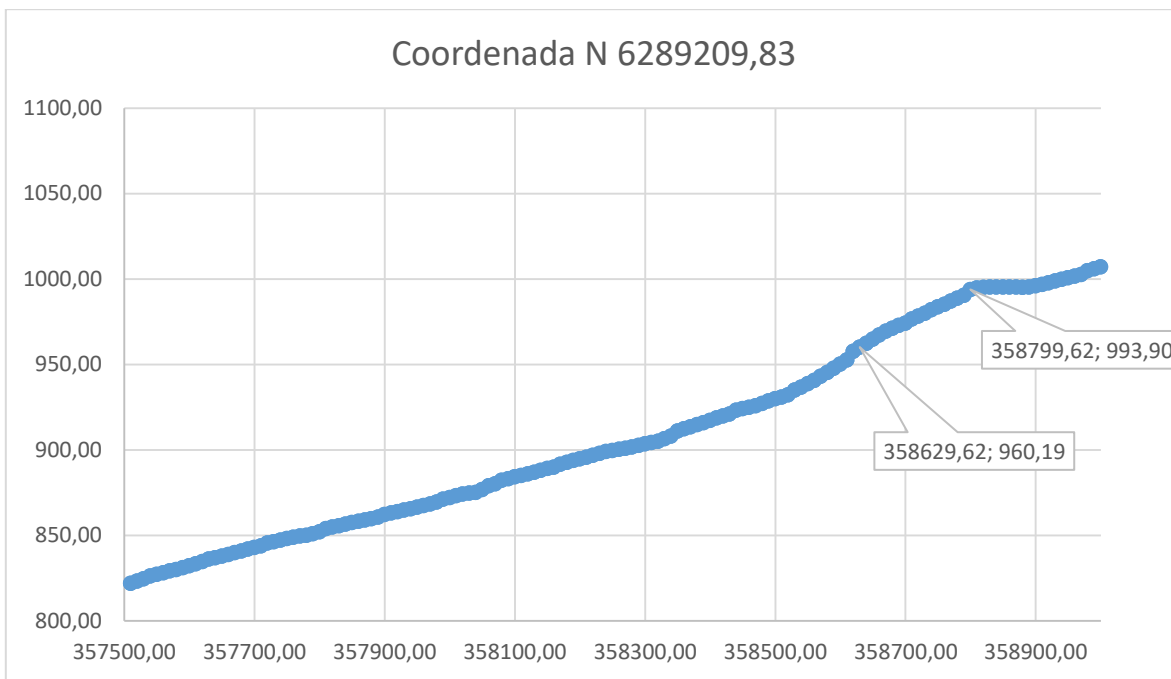




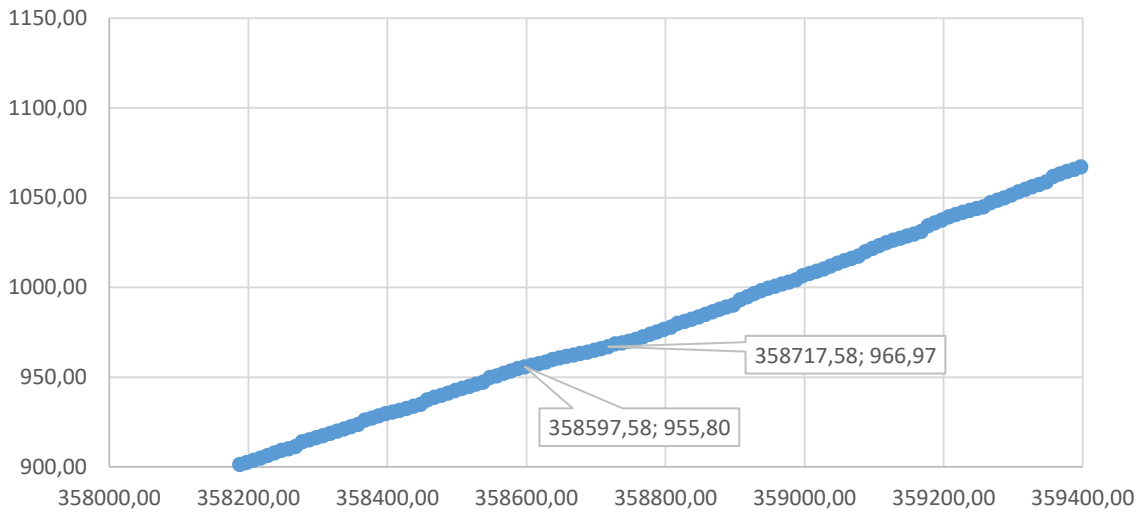




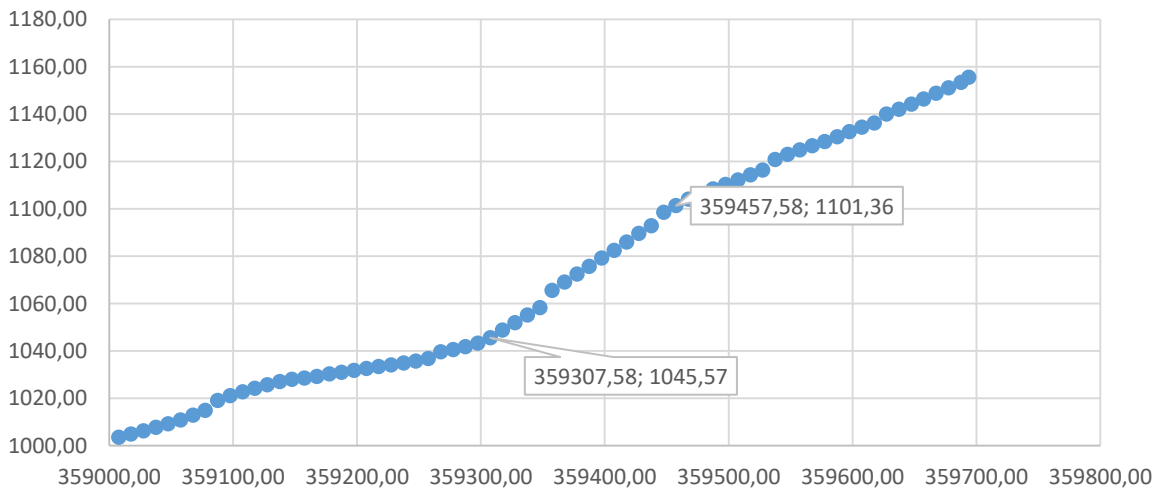




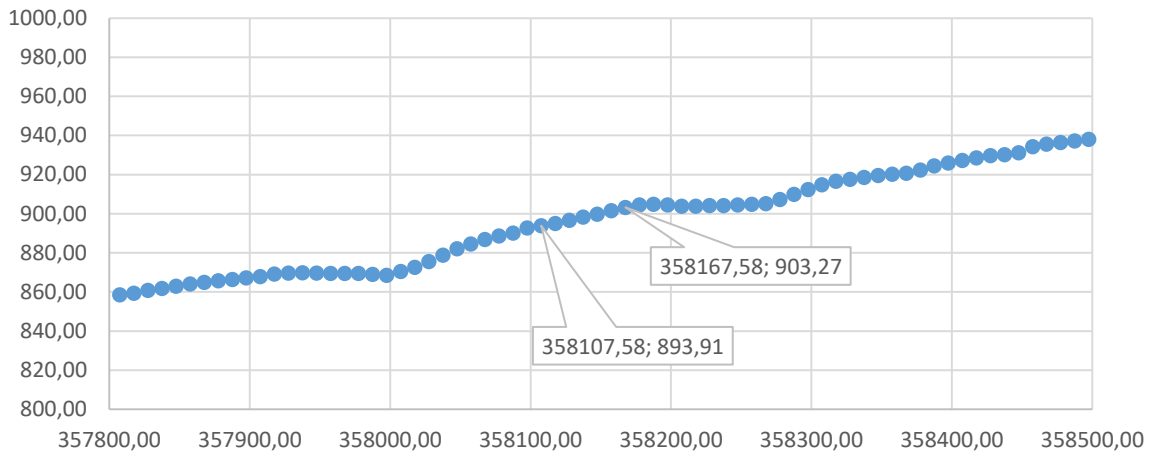
Coordenada N 6288912,68



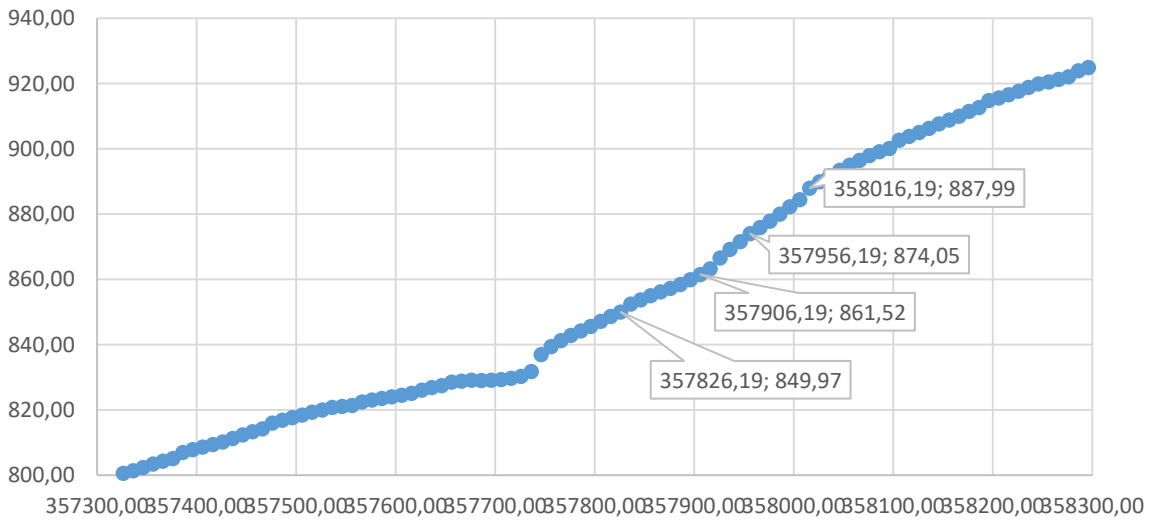
Coordenada N 6288713,29

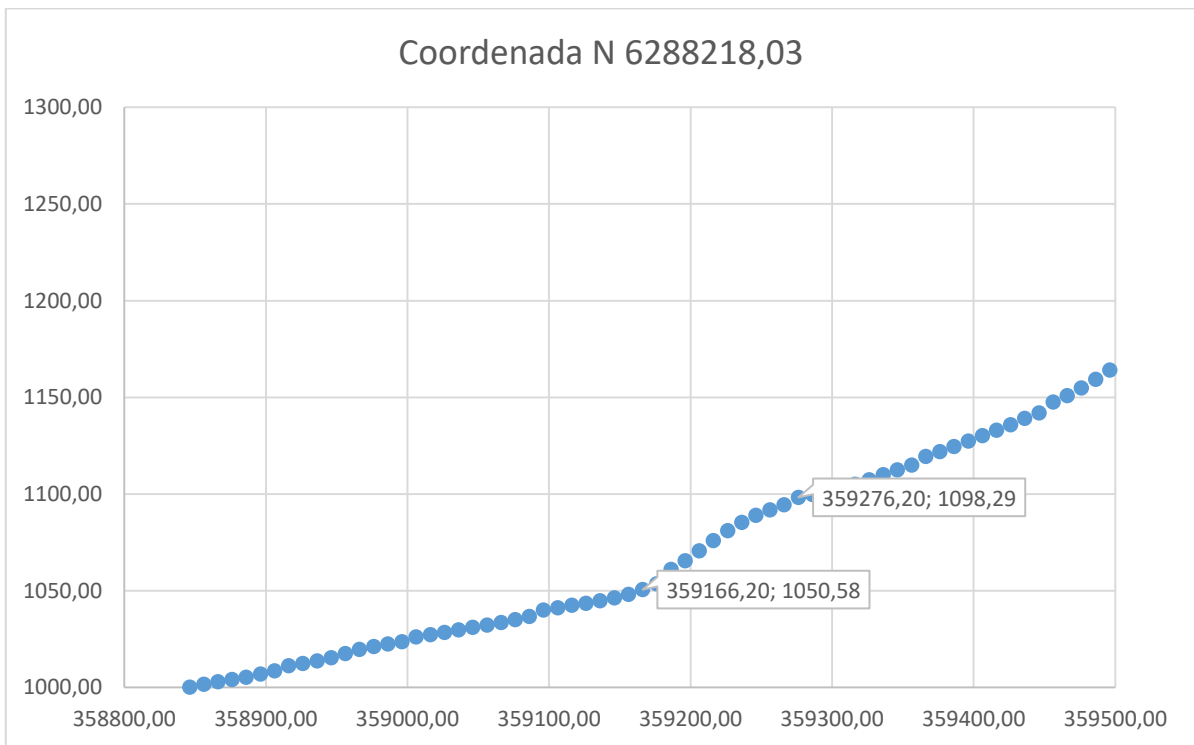
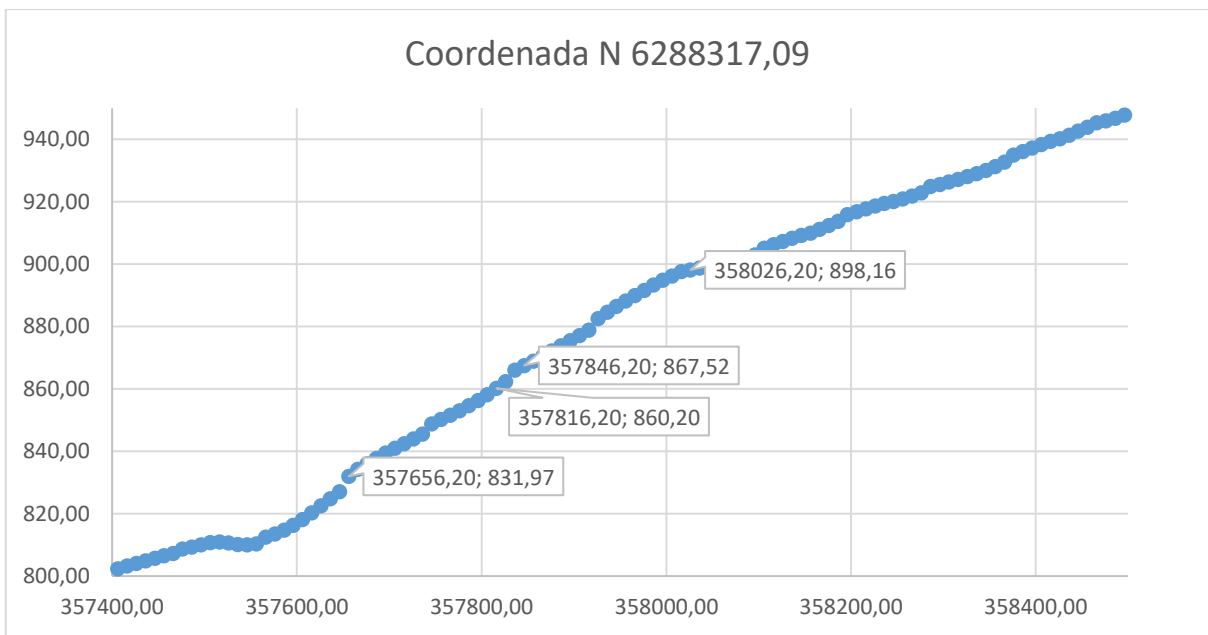


Coordenada N 6288614,24

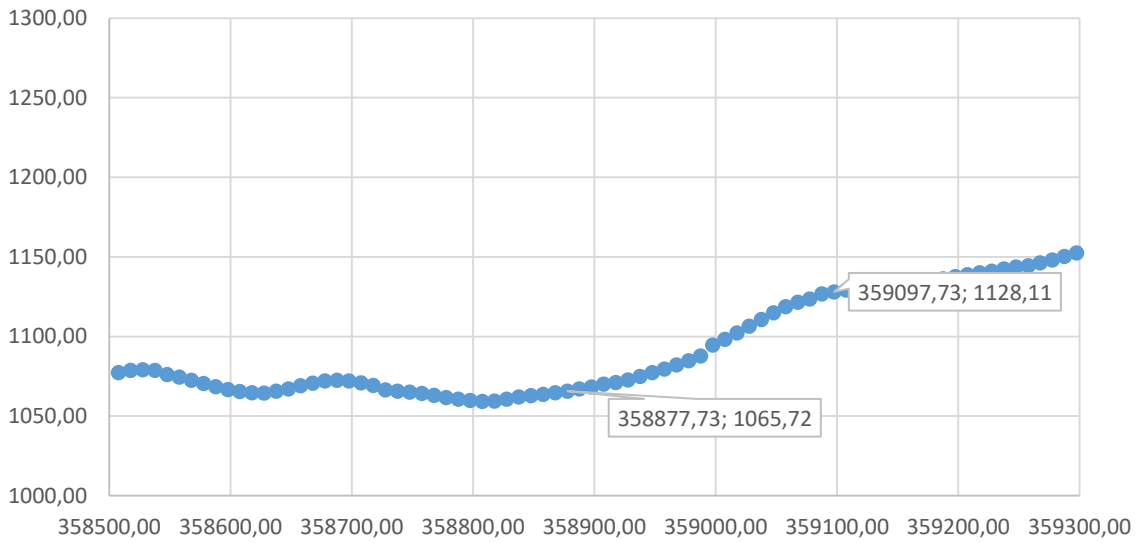


Coordenada N 6288416,14

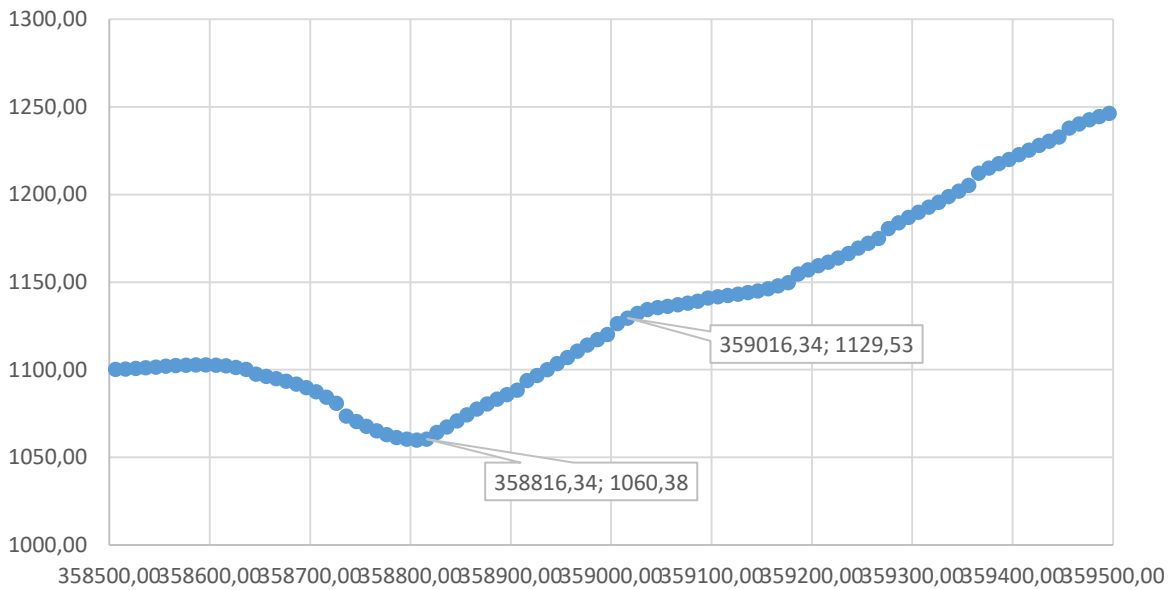




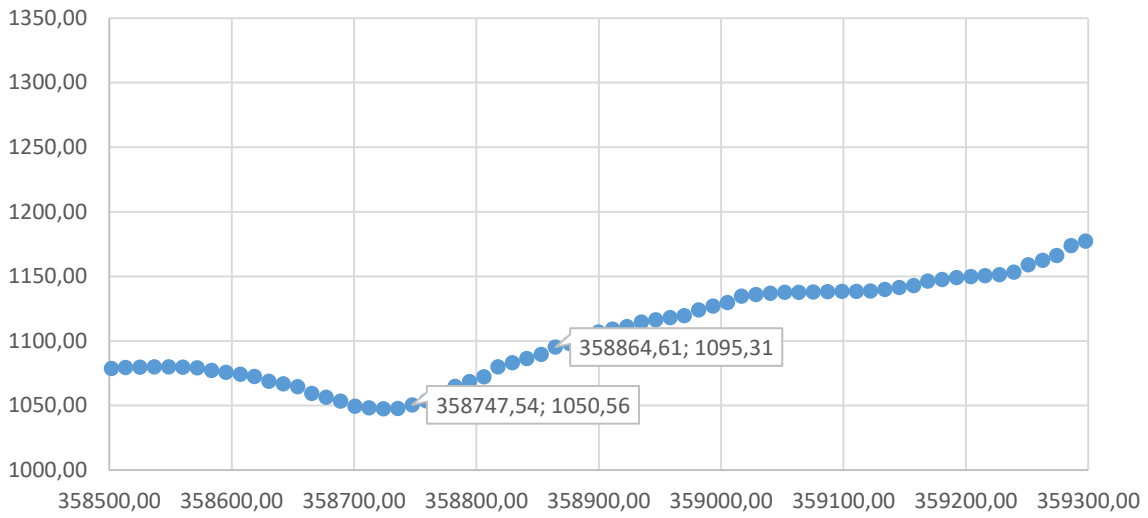
Coordenada N 6287608,66



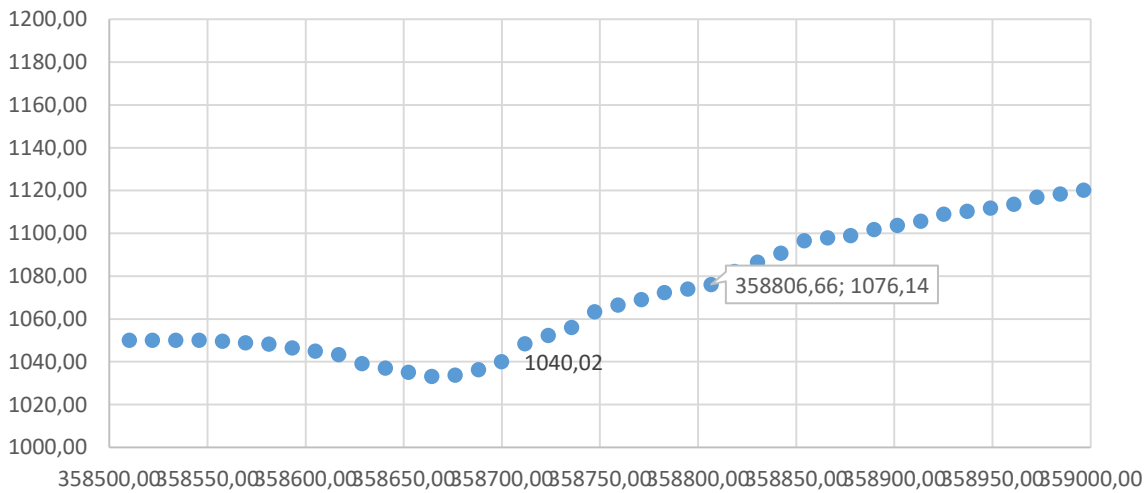
Coordenada N 6287509,60



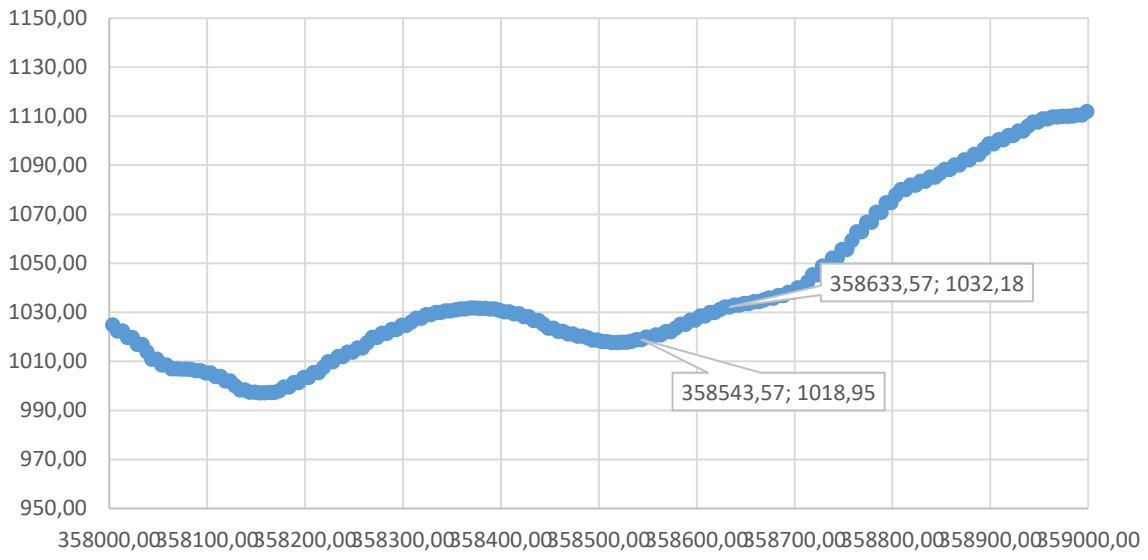
Coordenada N 6287406,25



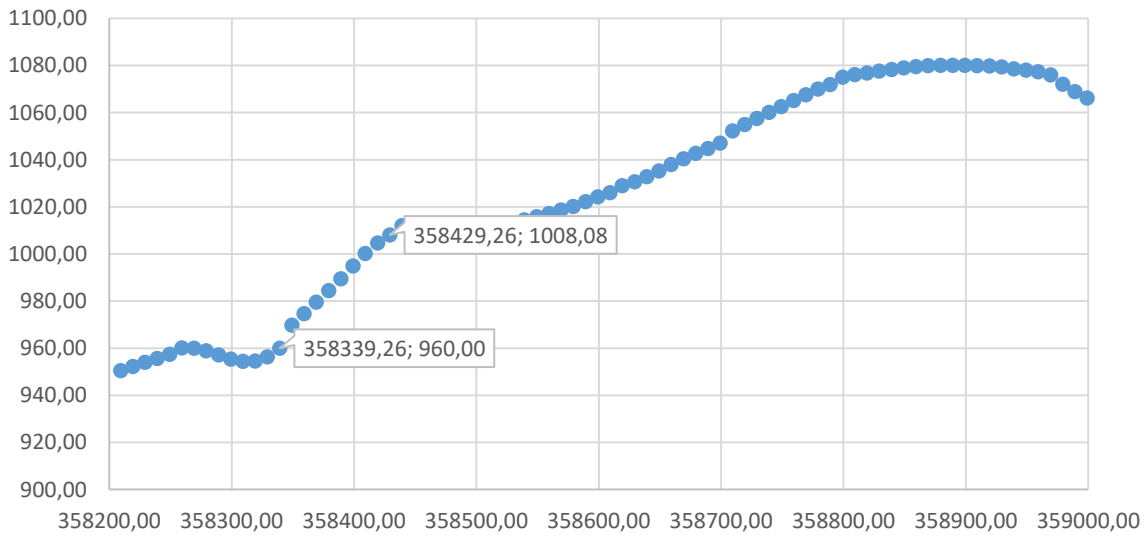
Coordenada N 6287311,50

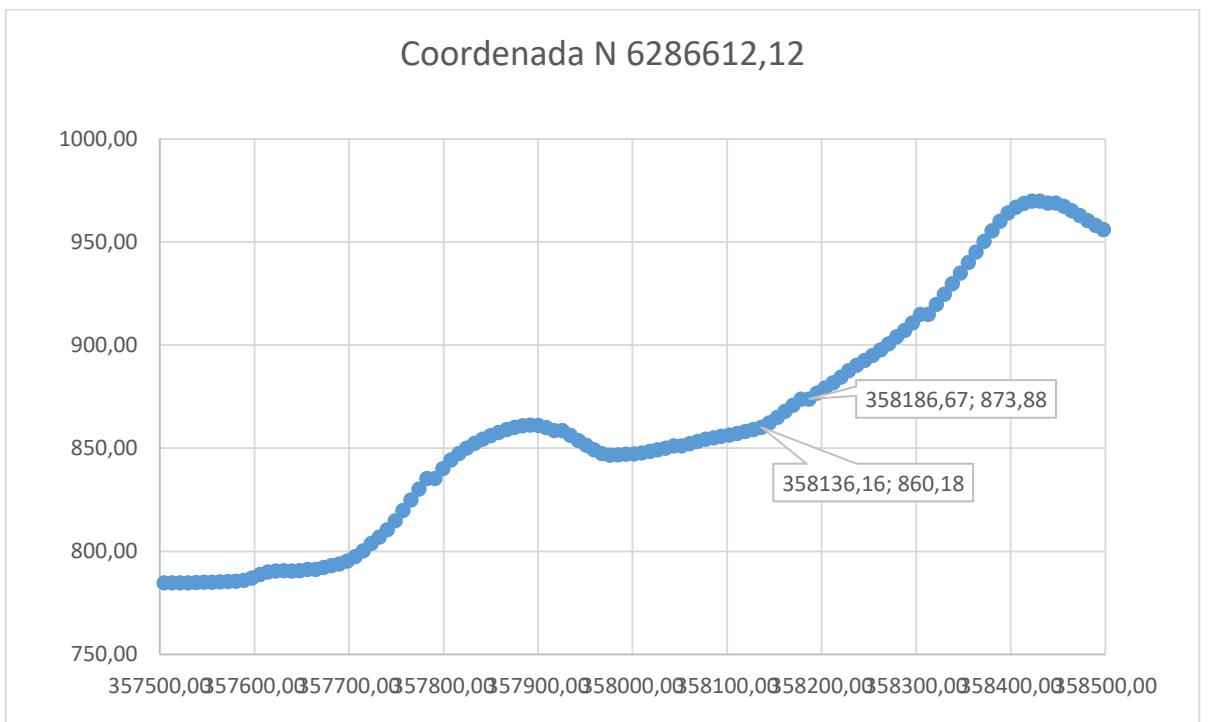
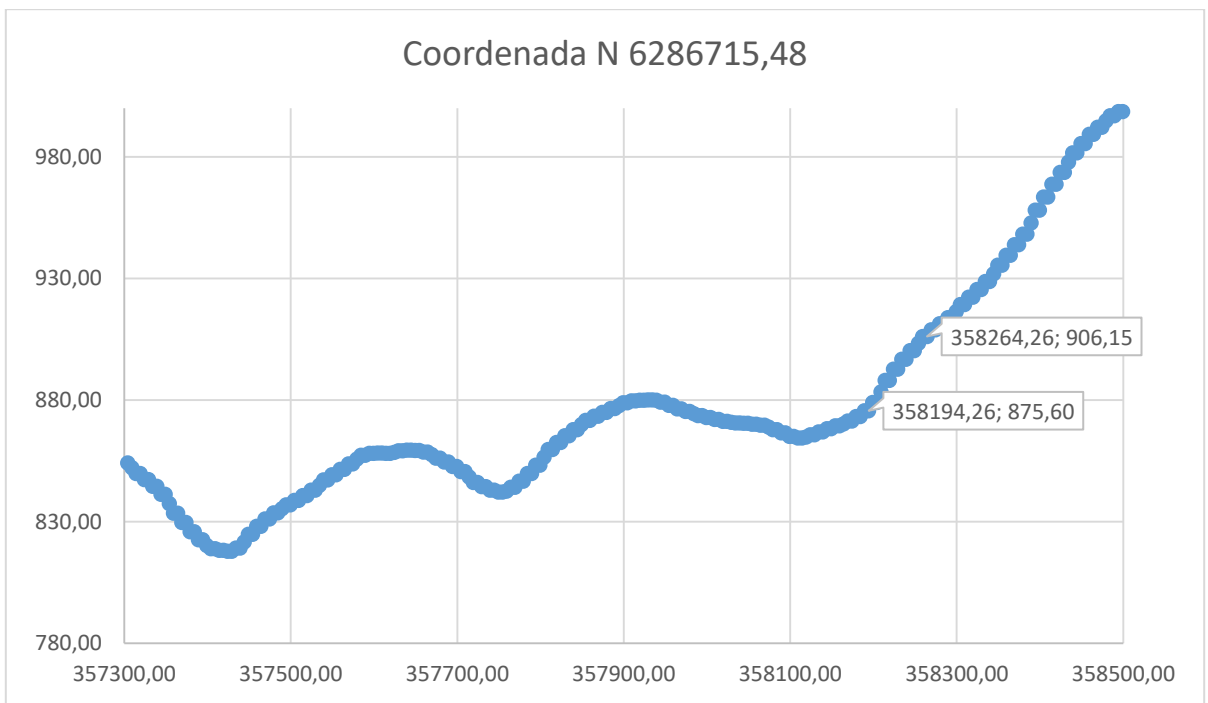


Coordenada N 6287113,40

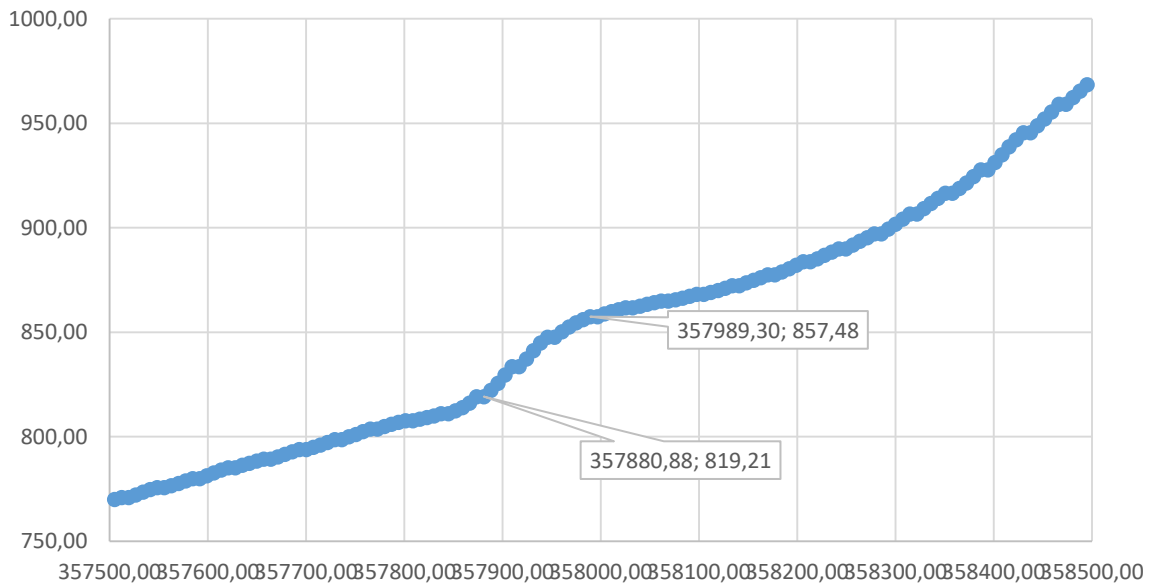


Coordenada N 6286910,99

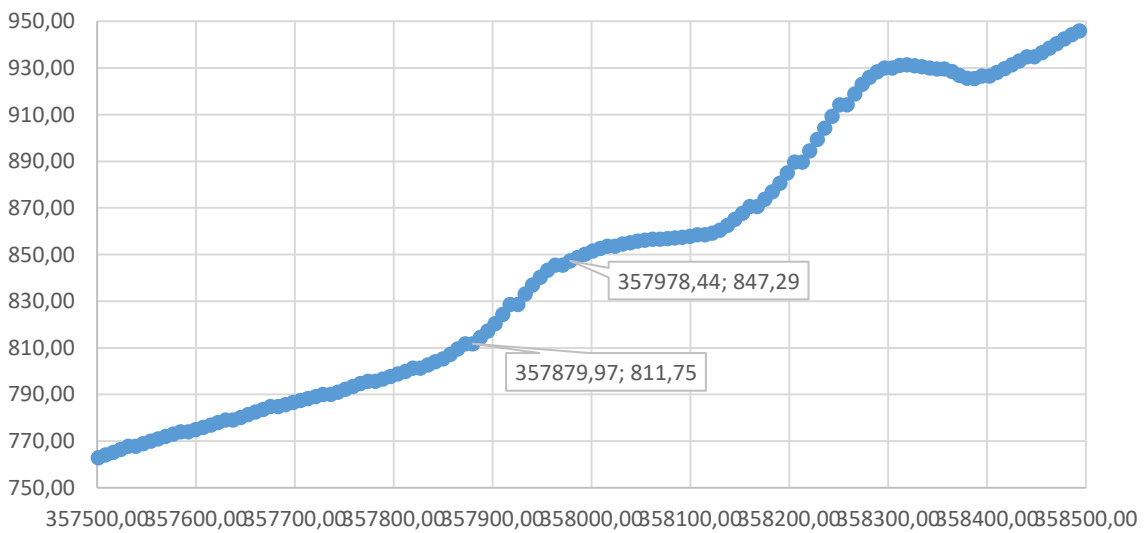


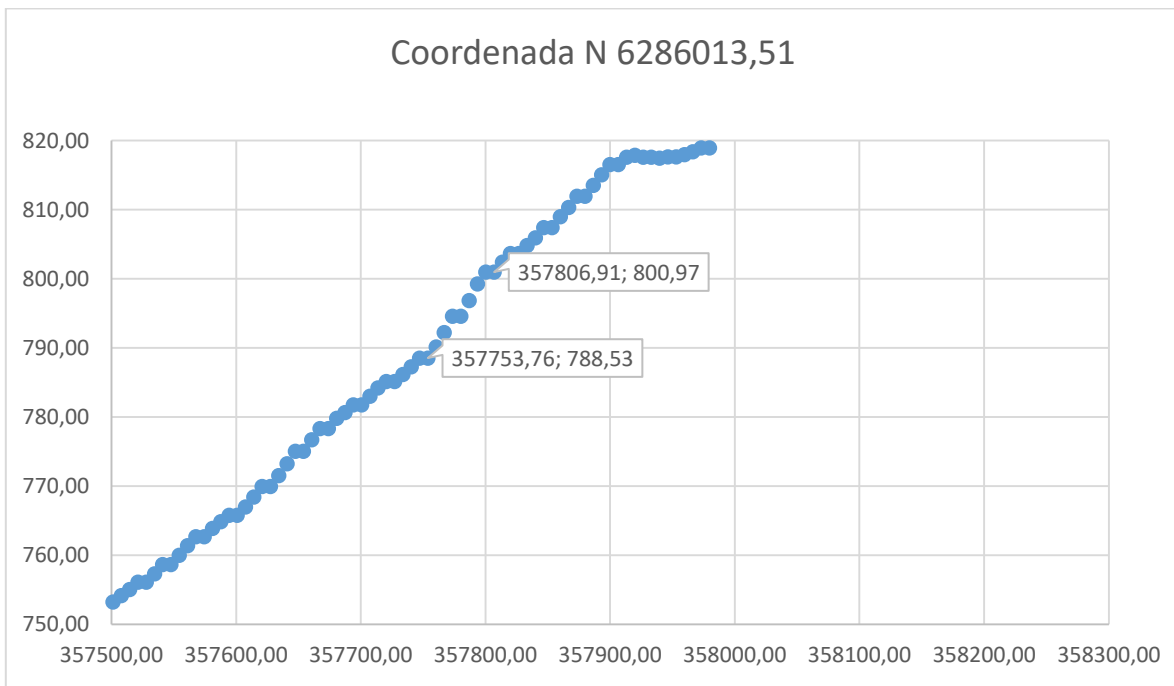
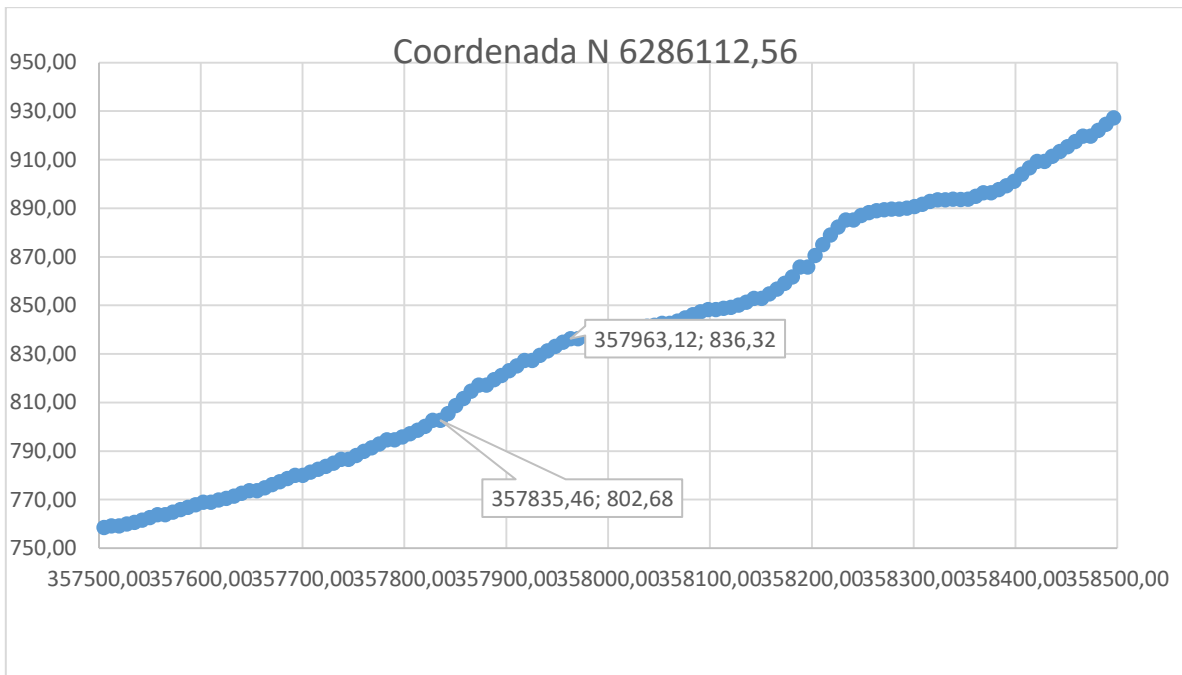


Coordenada N 6286310,66

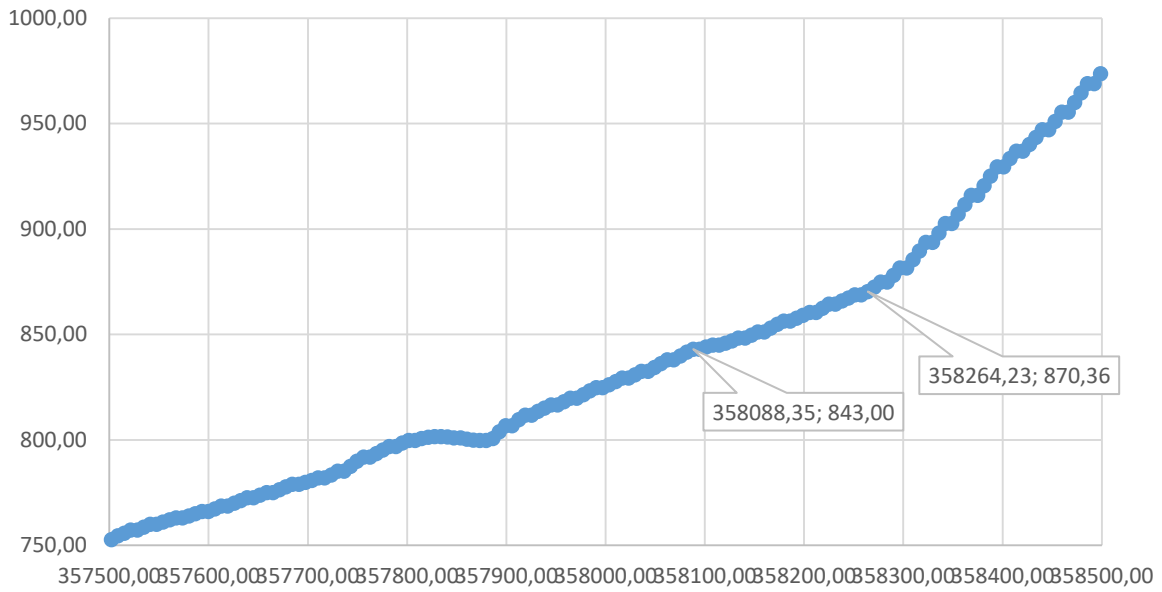


Coordenada N 6286211,61

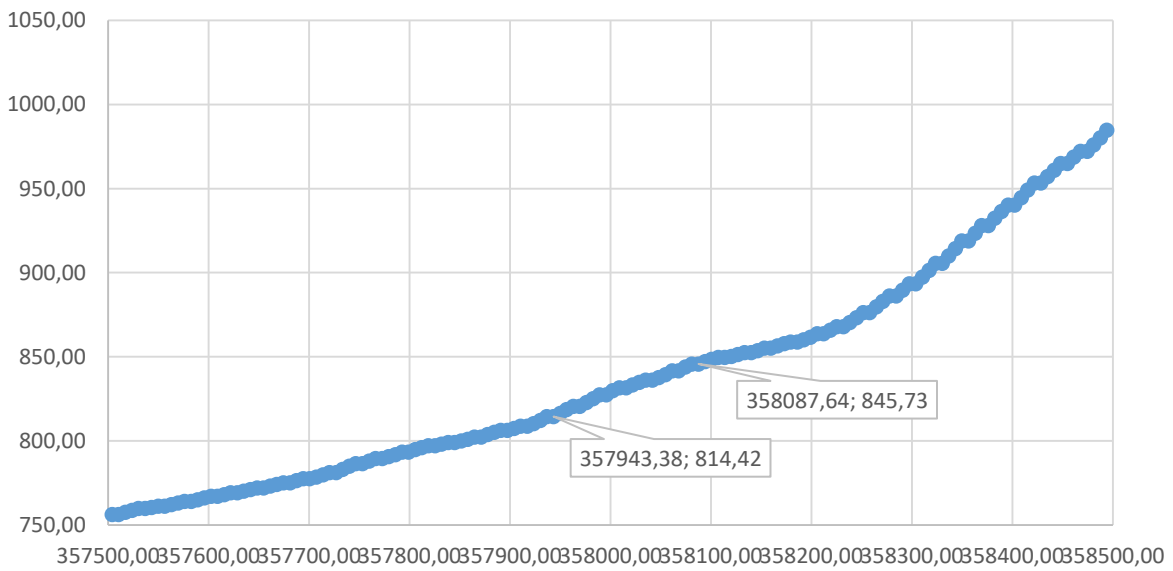




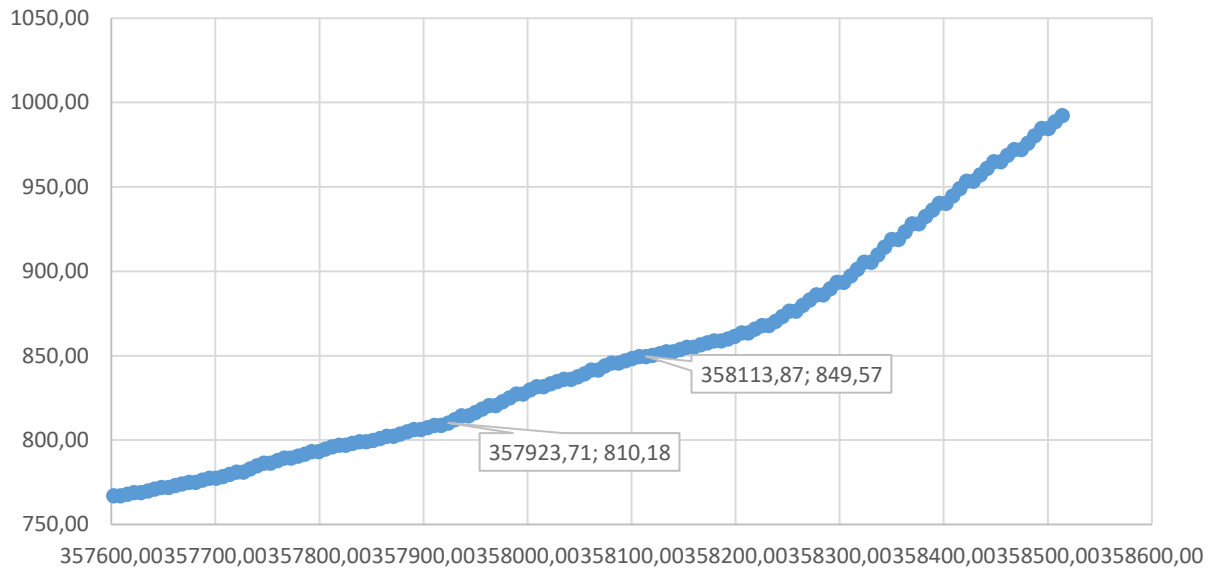
Coordenada N 628908,43



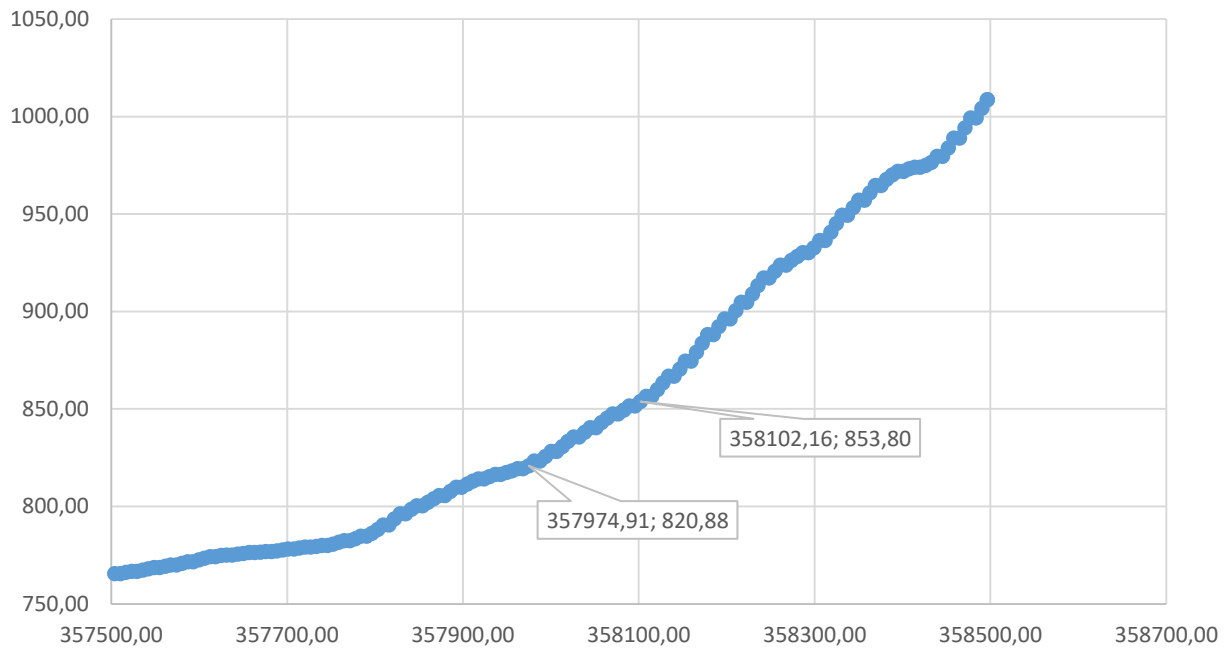
Coordenada N 6285813,85

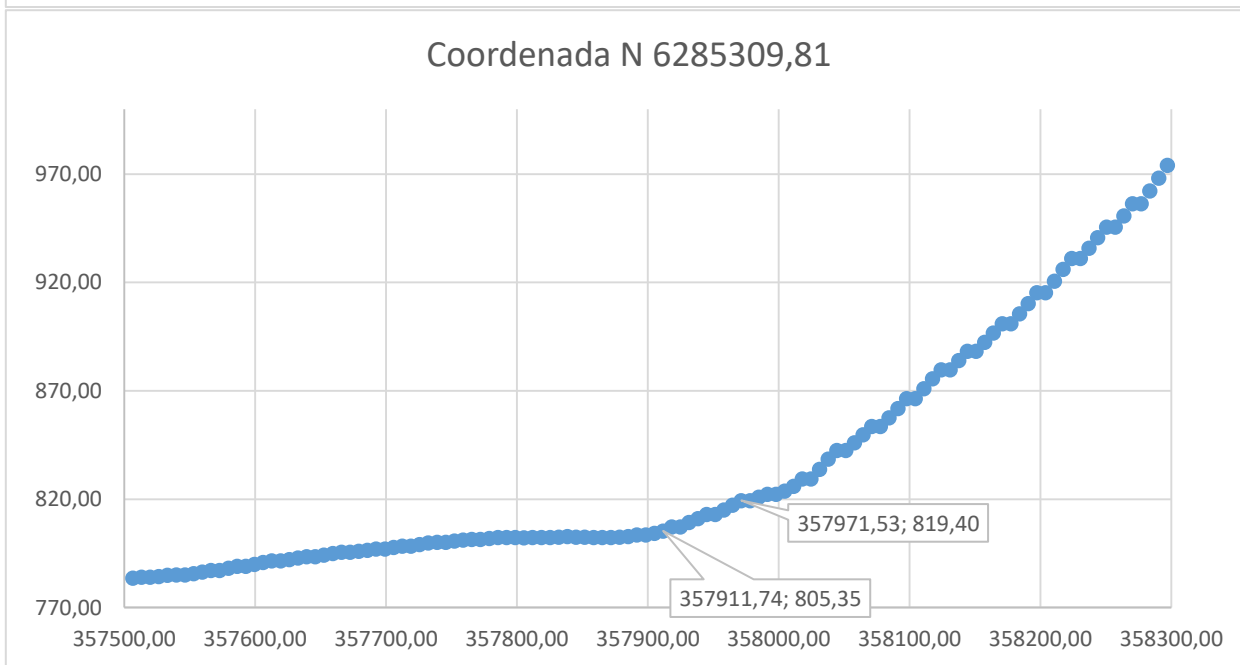
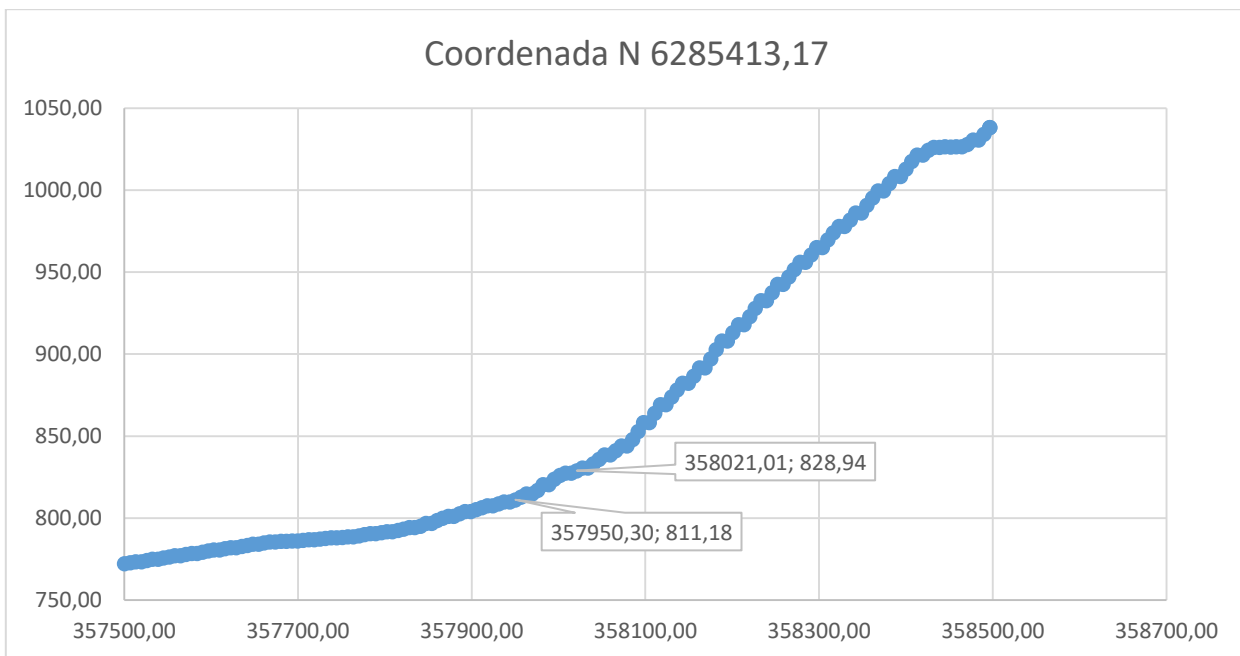


Coordenada N 6285813,68

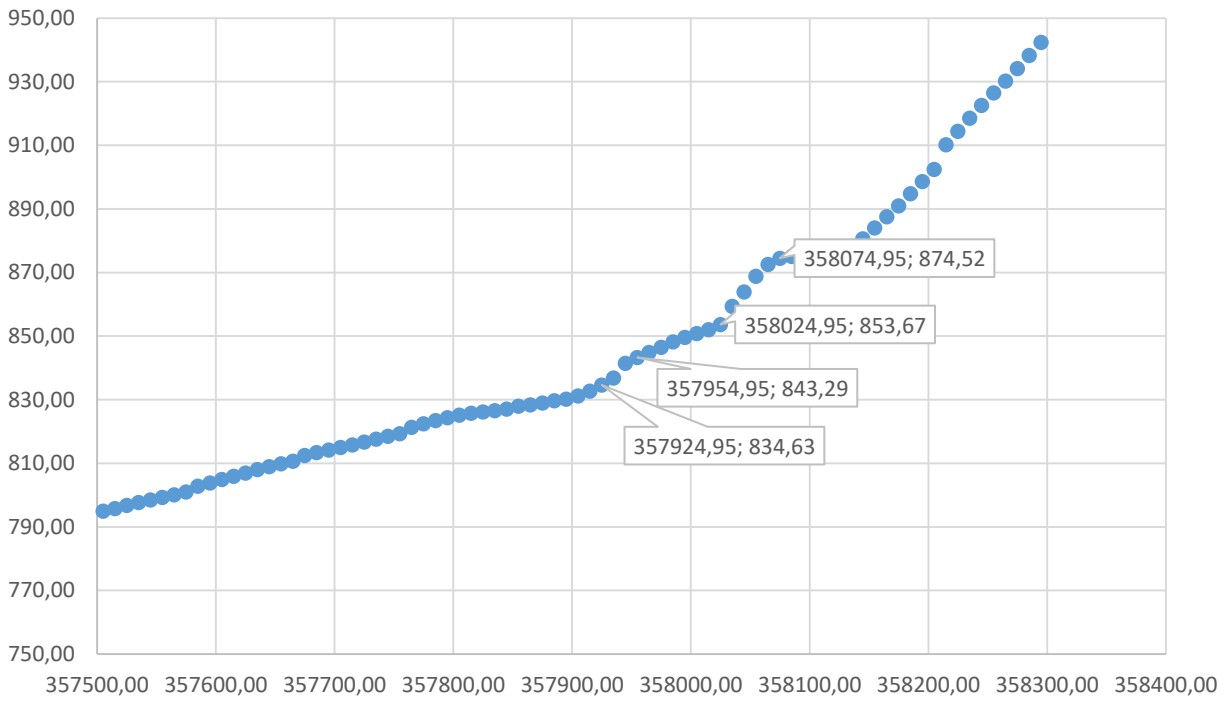


Coordenada N 6285507,92

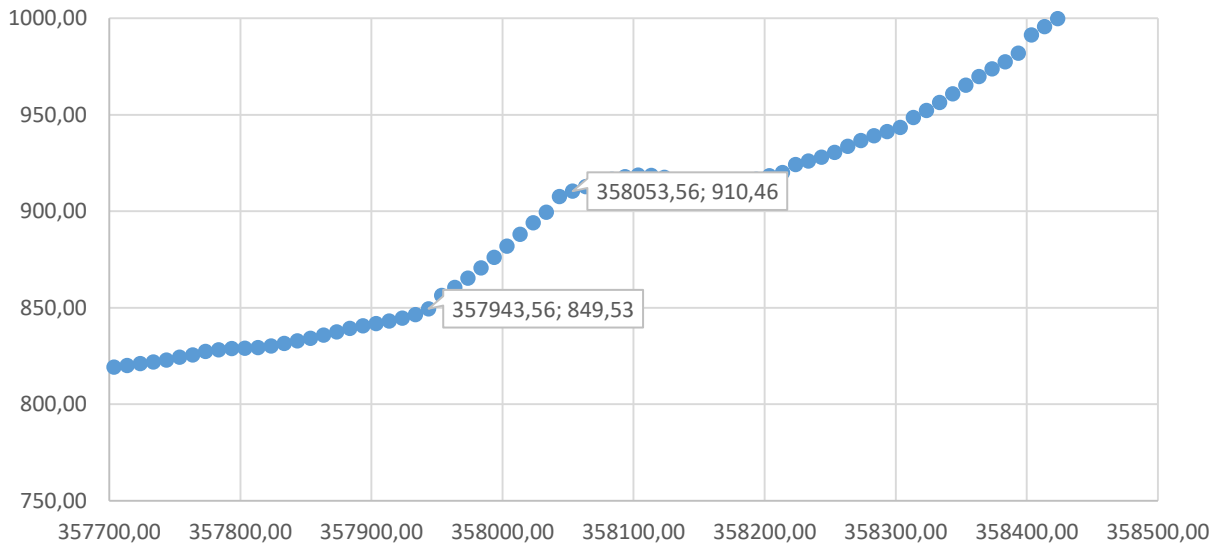




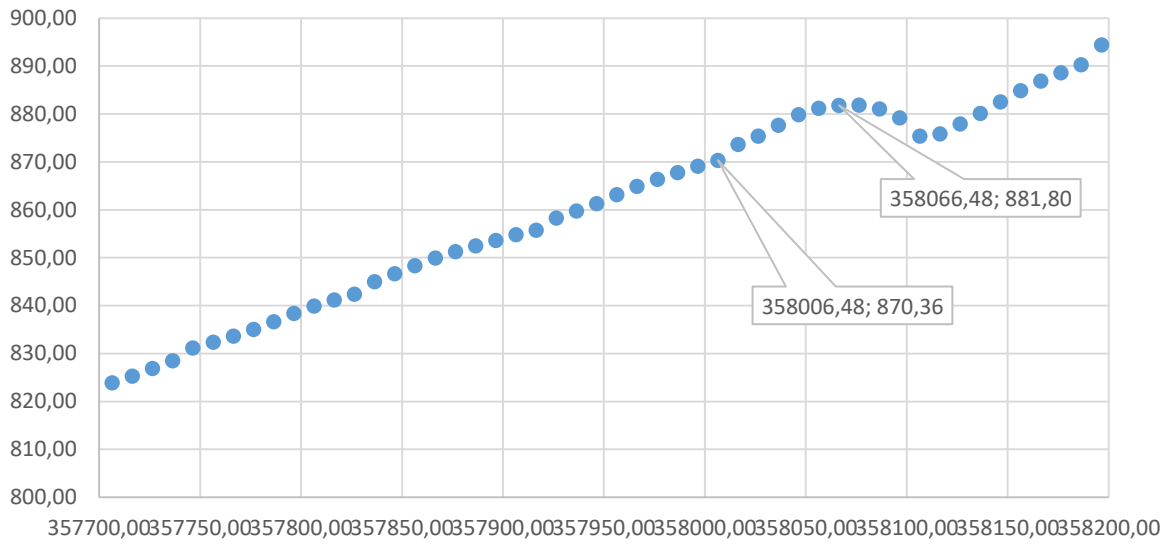
Coordenada N 6285124,63



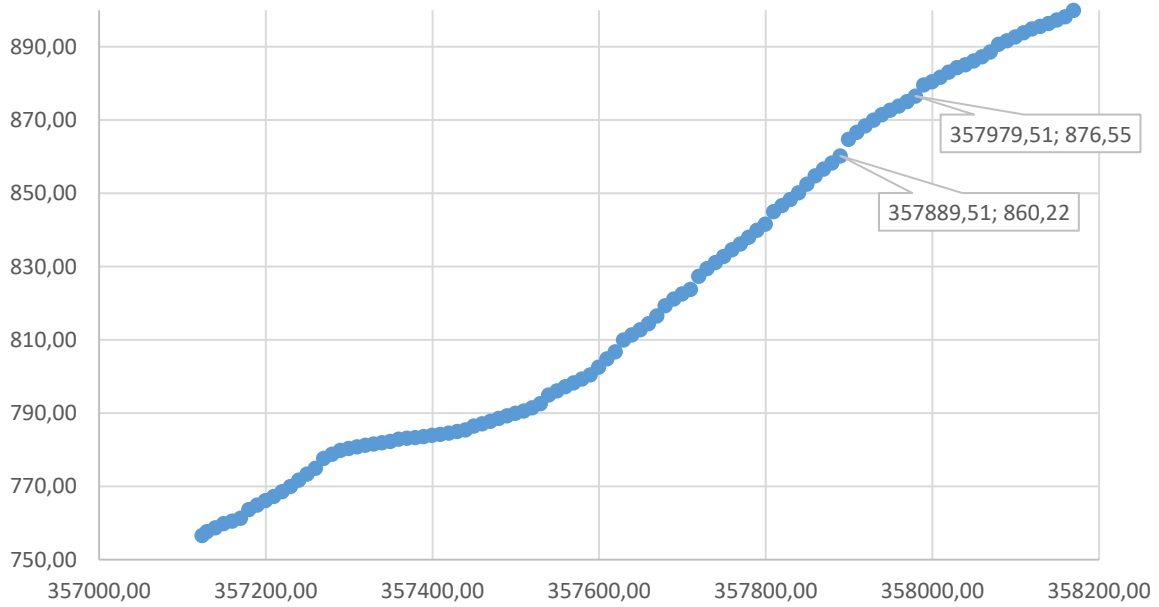
Coordenada N 6285016,97



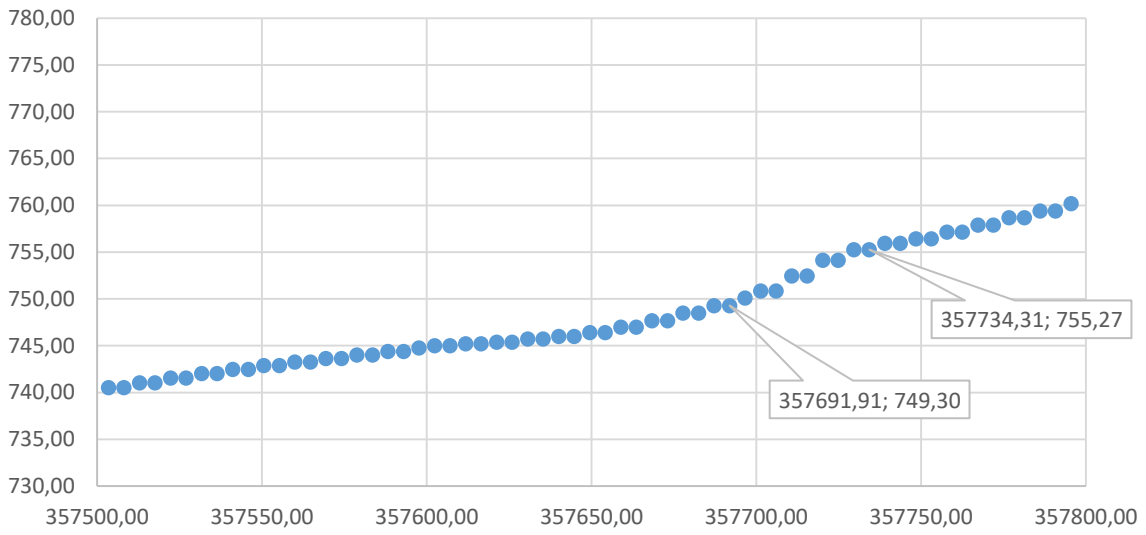
Coordenada N 6284817,14



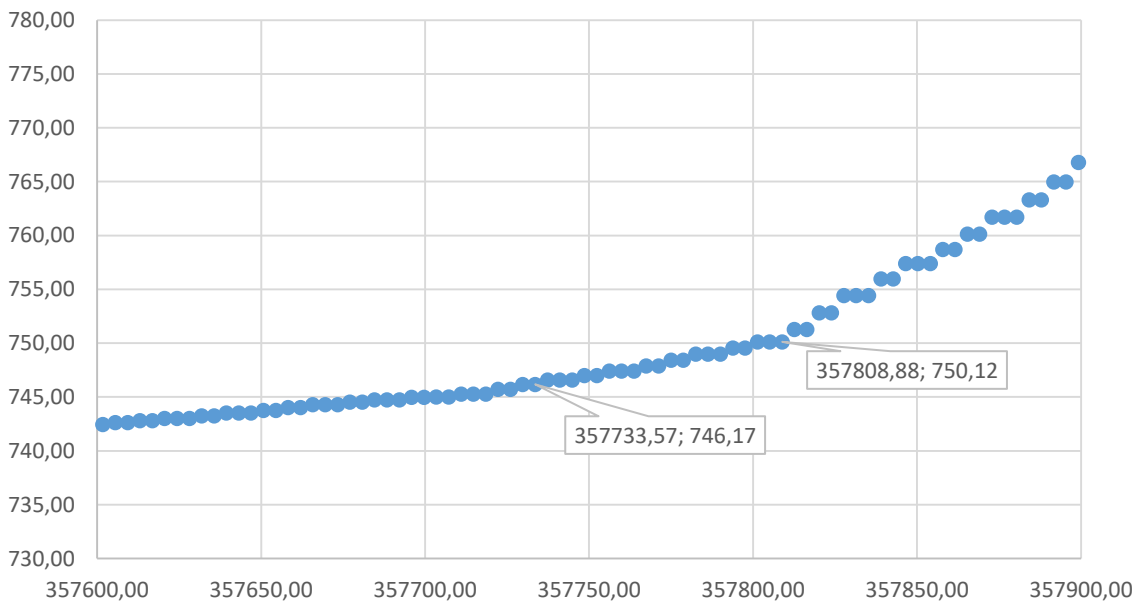
Coordenada N 6284594,74



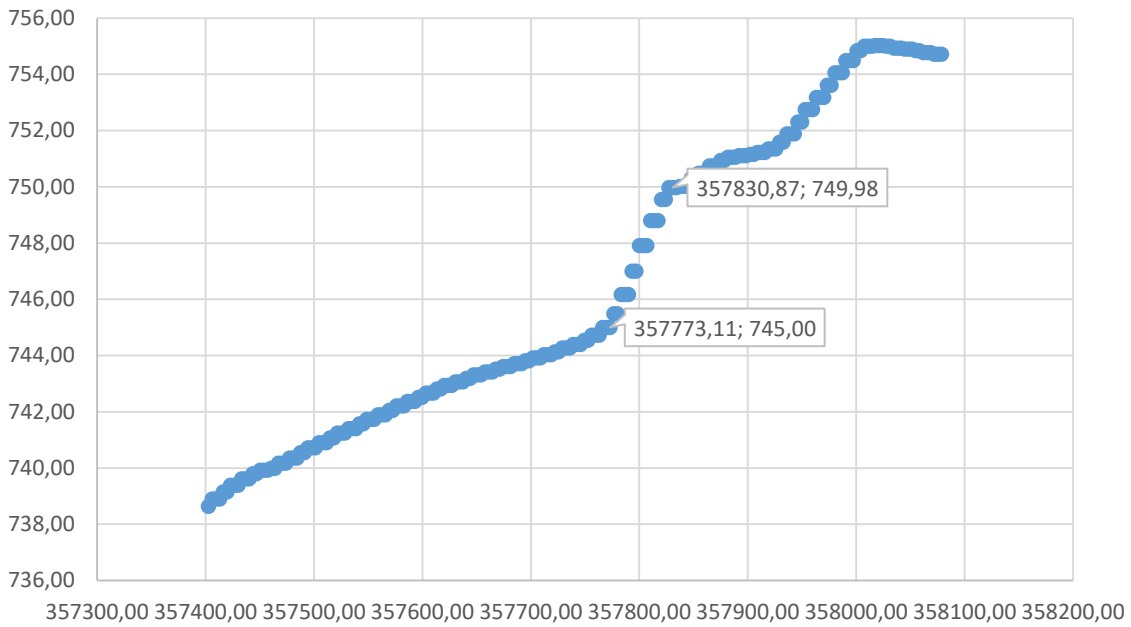
Coordenada N 6281608,33



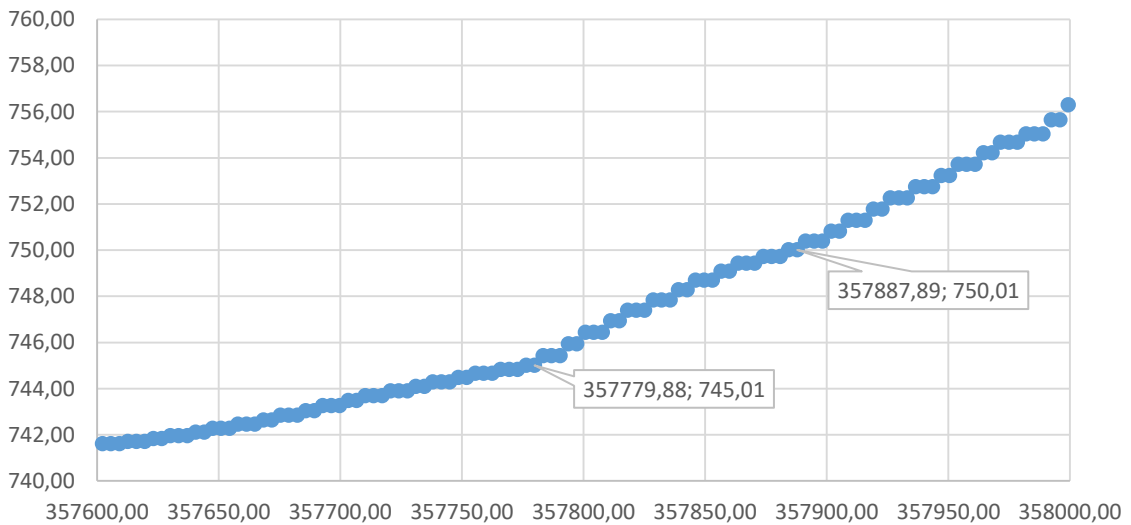
Coordenada N 6281461,90



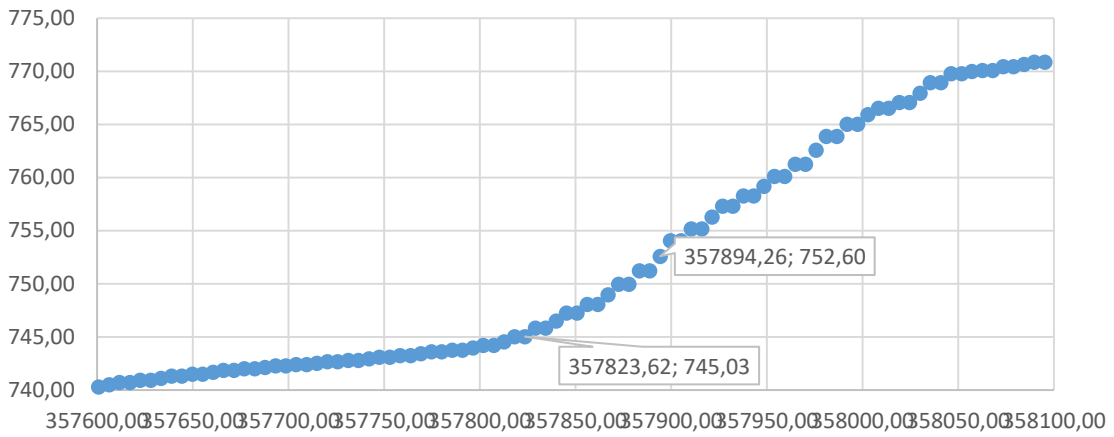
Coordenada N 6281332,71



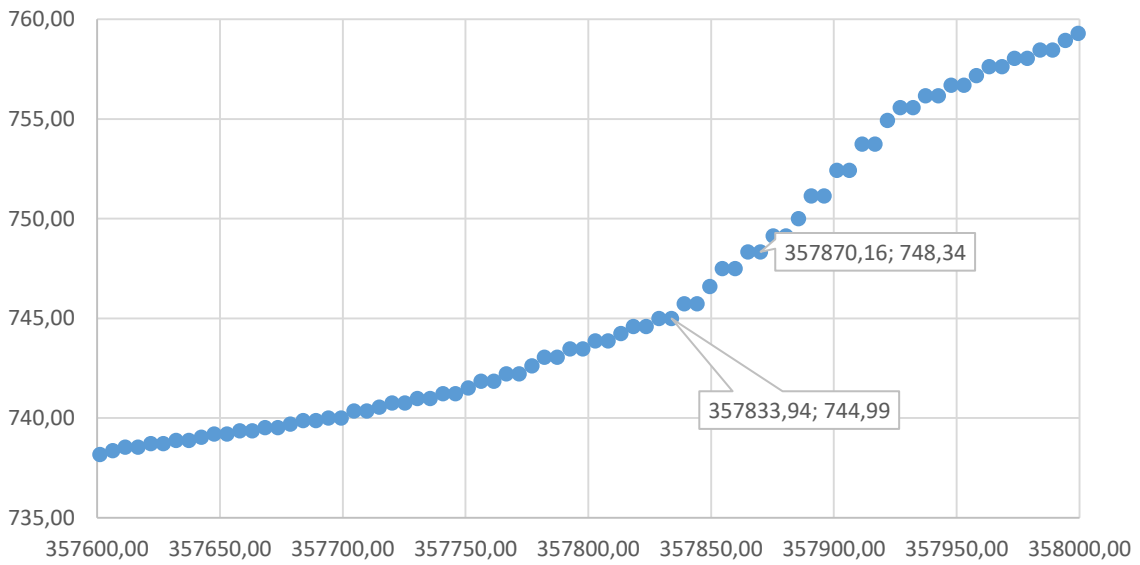
Coordenada N 6281228,06



Coordenada N 6281098,86



Coordenada N 6280961,05



Coordenada N 6280567,43

