



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Facultad de Arquitectura y Urbanismo**  
**Escuela de Geografía**

**PONDERACIÓN DE FACTORES ANTROPOGÉNICOS Y NATURALES  
QUE CAUSARÍAN LA SUBSIDENCIA DE TERRENO EN LA COMUNA DE  
TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.**

**Memoria para optar al título profesional de Geógrafo**

**LEONEL ENRIQUE SÁNCHEZ CURRIHUINCA**

**Profesor Guía: Sergio Fuentes C.**

**SANTIAGO – CHILE**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a mis padres y hermana por la paciencia en todos estos años de estudio.

A mis Profesores de la Carrera de Geografía en la Universidad de Chile por todo lo aprendido durante todos estos años.

Al profesor Sergio Fuentes por alentar y creer en este trabajo, a la profesora Diana Comte por todo el apoyo y aprendizaje que he adquirido de su parte en todos estos meses y al profesor Reinaldo Börgel por sus valiosos comentarios a este trabajo,

A los investigadores de Advanced Mining Technology Center (AMTC): Marcia Muñoz, Germán Aguilar, Daniel Carrizo y Marcelo García por sus valiosos comentarios.

A mis compañeros de Oficina: Claudia, Carmen, Katia, Fabián, Nico, Galle, Rodrigo, Pauli, Pancho, Sebastián, Mario y Romina por su buena onda y conversaciones.

A mis compañeros de carrera: Martín Macías, Francisca Gamboa, Vicente Lemunao, Pablo Farías y a todos que en algún momento compartimos algún trabajo o charla en los pasillos de la FAU.

Finalmente quiero agradecer a las personas que ya no se encuentran cercanas pero que de alguna u otra forma me ayudaron a sacar este trabajo adelante.

## RESUMEN

Esta investigación pondera los factores antropogénicos y naturales que causarían la subsidencia de terreno en la comuna de Tierra Amarilla la cual se encuentra localizada a 15 Km al Sur de la ciudad de Copiapó en la región de Atacama, Chile.

En el año 2013, el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla presentó tres subsidencias de terreno de distintos tamaños. Los factores naturales ponderados que incidirían en las subsidencias son: la posible disolución de la roca subterránea, disminución de los niveles subterráneos de agua (debido probablemente a oscilaciones climáticas), la intensa actividad sísmica y fallas geológicas. Los factores antrópicos ponderados que incidirían en las subsidencias son: la posible extracción de mineral por parte de faenas mineras subterráneas, tronaduras por parte de laboreos mineros, ejes y galerías subterráneas abandonadas por antiguas faenas mineras, y por último, disminución de los niveles subterráneos de aguas producto de la extracción de agua por parte de la industria minera y de la agricultura.

Luego de analizar cada factor, se logra ponderar de la siguiente manera:

- El agua subterránea en relación a su balance hídrico tienen una acumulación negativa en los últimos veinte años, donde lo más probable para esta disminución sea la sobreexplotación de acuíferos por parte de actividades agrícolas y mineras, con lo cual cabe la posibilidad que existan cavidades subterráneas con aire y/o vacíos en donde la superficie haya colapsado por acción de la gravedad sumado además que han existido periodos de bajas y nulas precipitaciones en los últimos años en el área de estudio.
- Las columnas estratigráficas del área de estudio presentan roca caliza la cual es susceptible de disolución por el agua superficial y subsuperficial. El agua superficial sería la de riego por parte de la agricultura que se infiltraría hacia zonas con presencia de roca con potencial de disolución y el agua subsuperficial correspondería a la circulación del acuífero del sector 4 que se encuentra en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla según la DGA. El agua circundante provocaría la disolución de la roca en donde, al igual que en el caso anterior, dejarían intersticios vacíos que podrían hacer colapsar la superficie.
- La posible extracción de mineral por parte de mineras actuales se debe comprobar a través de datos de localización de sus faenas subterráneas con su correlación vertical en superficie.
- La existencia de una falla inferida, y que seguiría una geometría paralela al río Copiapó, al tener posibles movimientos extensionales entre sus bloques, produciría la evacuación del agua de los acuíferos y del material fino, con lo cual quedarían espacios los cuales se rellenarían por el material que se encuentra en la parte superior de la cuenca que colapsarían producto de la gravedad produciendo las subsidencias en la superficie.
- La actividad sísmica y las tronaduras por parte de las faenas mineras pueden hacer colapsar en forma más rápida y repentina la superficie en zonas donde se encuentren cavidades subterráneas no detectadas.

Por último, la subsidencia de terreno puede ser una combinación de todos o algunos factores analizados en este trabajo. Para determinar si existen cavidades no detectadas, se recomienda aplicar métodos geofísicos como también imágenes de radar para ver posibles vacíos subterráneos y tasas de subsidencias respectivamente.

## **ABSTRACT**

This research ponders anthropogenic and natural factors that cause land subsidence in the town of Tierra Amarilla which is located 15 km south of the city of Copiapo in the Atacama region, Chile.

In 2013, the urban area of the municipality of Tierra Amarilla land subsidence presented three different sizes. The weighted natural factors that would affect subsidence are the possible dissolution of underground rock, decreasing underground water levels (probably due to climatic oscillations), intense seismic activity and geological faults. Anthropogenic weighted factors that would affect subsidence are the possible extraction of ore from underground mining operations, blasting by mining workings, shafts and underground galleries abandoned old mining sites, and finally, decreased groundwater levels product waters water extraction by the mining industry and agriculture.

After analyzing each factor, weighting is achieved as follows:

- Groundwater in relation to its water balance have a negative accumulation in the last twenty years, where the chances for this decline is the overexploitation of aquifers by agricultural and mining activities, which include the possibility that there are underground cavities with air and / or voids where the surface has collapsed by gravity also added that there have been periods of low and zero rainfall in recent years in the study area.
- The stratigraphic columns of the study area have limestone which is susceptible to dissolution by surface and subsurface water. Surface water would be irrigated by agriculture that infiltrate into areas with presence of rock dissolution potential and subsurface water correspond to the movement of the aquifer of sector 4 located in the urban area of the municipality of Tierra yellow according to the DGA. The surrounding water cause the dissolution of the rock where, as in the previous case, leave empty spaces that could bring down the surface.
- The possible mineral extraction by current mining should be checked by location data of its underground workings with its vertical correlation surface.
- The existence of an inferred fault, and follow a parallel geometry to Copiapo River, having possible extensional movements between their blocks, would produce the evacuation of water from aquifers and fine material, which would spaces which would be filled by the material found at the top of the basin collapse producing product of gravity on the surface subsidence.
- The seismic activity and blasting by mining operations can more quickly collapse and sudden surface in areas where underground cavities are not detected.

Finally, land subsidence may be a combination of some or all factors analyzed in this work. To determine if there are undetected cavities, it is recommended to apply geophysical methods as well as radar images for possible underground voids and subsidence rates respectively.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO</b>	<b>N° PÁGINA</b>
CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN.....	11
1.1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.3 ÁREA DE ESTUDIO.....	27
1.4 OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICOS.....	40
1.4.1 Objetivo general .....	40
1.4.2 Objetivos específicos.....	40
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	41
2.1 Metodología general aplicada a la problemática según etapas.....	41
2.1.2 Organización de la problemática de subsidencias en un modelo estructurado.....	43
2.2 Métodos y pasos metodológicos según objetivos específicos.....	45
2.2.1 Objetivo específico uno: Revisar la evolución del nivel del agua subterránea y su uso en el área de estudio.....	45
2.2.2 Objetivo específico dos: Analizar la incidencia de sismos naturales y tronaduras de las faenas mineras en las subsidencias.....	46
2.2.3 Objetivo específico tres: Analizar las fallas geológicas existentes en el área de estudio y su incidencia en las subsidencias.....	47
2.2.4 Objetivo específico cuatro: Analizar las columnas estratigráficas del área de las subsidencias y describir el tipo de suelo presente en el área de estudio .....	47
2.2.5 Objetivo específico cinco: Recopilación y análisis de información de incidencias de las labores mineras subterráneas en las subsidencias de terreno .....	48
2.2.6 Objetivo específico seis: Revisión de métodos de detección de cavidades subterráneas y tasas de subsidencias.....	49
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	50
3.1. Subsistencia.....	50
3.1.1 Causas Antropogenéticas de Subsistencia.....	52
3.1.2 Causas Naturales de Subsistencia.....	64
3.2 Métodos de detección de cavidades.....	78
3.2.1 Radar de Penetración Terrestre (GPR).....	79
3.2.2 Tomografía Resistividad Eléctrica.....	81
3.2.3 Análisis de tasas de subsidencias a través de imágenes satelitales .....	84
3.3 Marco Jurídico y Administrativo del Subsuelo en Chile.....	85

CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	88
4.1 Hidrogeología e Hidrología .....	88
4.1.1 Acuíferos .....	88
4.1.2 Nivel de precipitaciones.....	93
4.1.3 Balance hídrico.....	94
4.1.4 Estratigrafía y Sondajes Mecánicos.....	97
4.2 Tipo de suelo.....	100
4.3 Actividad sísmica en el área de estudio .....	102
4.4 Tronaduras Mineras.....	107
4.5 Sistema de fallas bajo la cuenca de río Copiapó .....	107
4.6 Procesos aluvionales y la inundación de Tierra Amarilla asociado a las lluvias torrenciales de marzo de 2015 y su incidencia en la cuenca del río Copiapó .....	109
4.7 Minería en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.....	112
4.8 Combinación de factores .....	115
4.9 Métodos de detección de cavidades .....	117
4.10 Mapa resumen de resultados obtenidos en la investigación .....	118
4.11 Resultado de ponderación de factores.....	119
4.11.1 Entrada área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.....	119
4.11.2 Patio de una casa.....	120
4.11.3 Caserón minero .....	121
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES.....	123
5.1 DISCUSIÓN.....	123
5.2 CONCLUSIONES .....	124
5.3 RECOMENDACIONES.....	125
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA .....	127
CAPÍTULO 7. ANEXOS .....	137
7.1 Anexo N° 1: Mapa de localización de áreas donde se han realizado perfiles estratigráficos .....	137
7.2 Anexo N° 2: Perfiles geomecánicos a la entrada del área urbana y en el patio de una vivienda .....	140
7.3 Anexo N° 3. Perfil geomecánico y estratigrafía del patio de una vivienda en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla .....	141
7.4 Anexo N° 4: Mapa de la geología del área de estudio localizando el perfil A – A' correspondiente al presentado en la Figura 65.....	142
7.5 Anexo N° 5: Propiedades Físicas, Químicas y Físico–Químicas del Suelo del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla .....	143
7.6 Anexo N° 6: Balance hídrico del acuífero del sector 4 .....	144
7.7 Anexo N° 7: Cartografía de localización de mineras donde se extrae roca caliza .....	145

7.8 Anexo N° 8: Mapa geológico de la cuenca del río Copiapó.....	146
7.9 Anexo N° 9: Estudio de la interrelación entre procesos aluvionales y la inundación de Tierra Amarilla asociado a las lluvias torrenciales de marzo de 2015 (Resumen extendido).....	147

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cartografía de ubicación de los puntos de subsidencia..	14
Figura 2. Localización de puntos de subsidencias y las distancias con cada punto. ....	15
Figura 3. Mapa de localización de puntos de subsidencia en la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. ....	17
Figura 4. Imágenes de subsidencias en la rotonda a la entrada de la comuna Tierra Amarilla .....	18
Figura 5. Imágenes de rotura de pavimento en vía C – 35 que podrían estar asociada a subsidencias localizadas en la entrada norte a la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla.....	18
Figura 6. Imágenes de la subsidencia en patio de una casa, calle Manuel Montt 445 b, comuna de Tierra Amarilla. ....	19
Figura 7. Cartografía de localización de subsidencia en patio de una casa en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla .....	20
Figura 8. Imágenes de la subsidencia de caserón minero en la quebrada de Meléndez..	21
Figura 9. Modelo de Elevación Digital (DEM) del área de la Quebrada de Meléndez en donde se encuentra la subsidencia de Caserón Minero.....	22
Figura 10. Viviendas catastradas por la municipalidad de Tierra Amarilla en cada sector del área urbana. ....	23
Figura 11. Sectores urbanos catastrados y localización de subsidencias .....	24
Figura 12. Gráfico en el cual se observa los daños más frecuentes en las viviendas del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. ....	25
Figura 13. Material de construcción predominante en las 82 casas catastradas. ....	26
Figura 14. Imágenes de grietas en casa ubicada en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.....	26
Figura 15. Cartografía de localización del área de estudio.....	28
Figura 16. Mapa de uso de suelos según Ministerio de Agricultura.....	29
Figura 17. Cartografía de localización para la distribución espacial de las principales actividades económicas.....	30
Figura 18. Imágenes de la comuna de Tierra Amarilla .....	32
Figura 19. Diagrama Climático Ombrotérmico, sector Embalse Lautaro en río Copiapó .	34
Figura 20. Mapa de ambiente geológico en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla .....	36
Figura 21. Mapa geológico del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. ....	38
Figura 22. Pasos metodológicos generales según etapas. ....	42
Figura 23 Diagrama para las variables ponderadas que incidirían en la problemática asociada a la subsidencia de terreno en la comuna de Tierra Amarilla.....	43

Figura 24. Subdivisión de los criterios y sub-criterios para la ponderación de los factores en el modelo AHP.....	45
Figura 25. Bloque diagrama y fotos de un típico evento de subsidencia .....	51
Figura 26. Cámara y pilares de faena minera subterránea.....	52
Figura 27. Fotografía minería subterránea.....	54
Figura 28. Borde N de la cavidad cilíndrica N° 1 con sección granular en el ex yacimiento de cobre La Africana.....	58
Figura 29. Cavidad cilíndrica N° 2 vista hacia el N en el ex yacimiento de cobre La Africana. ....	58
Figura 30. Detalle de depósitos granulares en sección superficial de la cavidad cilíndrica N° 2 en el ex yacimiento de cobre La Africana.....	59
Figura 31. Subsidencia en Av. Independencia asociado a la construcción de la línea 3 del Metro de Santiago. ....	60
Figura 32. Subsidencia en Av Providencia asociado a rotura de matriz de agua potable. 60	
Figura 33. Modelo morfogenético para el desarrollo del colapso de la superficie.....	62
Figura 34. Imágenes de los efectos de la subsidencia en la ciudad de México. ....	63
Figura 35. Imágenes de la subsidencia en la comuna de Chanco en el año 1982, Chile. 65	
Figura 36. Esquema que muestra la generación de una dolina producto de roca caliza y agua circundante subterránea .....	66
Figura 37. Imágenes de subsidencias (A y B) producidas la parte inferior de la terraza del río Ebro aguas abajo en la ciudad de Zaragoza.....	67
Figura 38. Imágenes de grietas prominentes en un edificio situado junto a la carretera N - 232 y hundimiento en una calle de Valdefierro en la ciudad de Zaragoza.....	68
Figura 39. Imagen de subsidencia en Hamedan, Irán .....	68
Figura 40. Imágenes de los socavones en casas en la comuna de Alto Hospicio, Norte de Chile. ....	69
Figura 41. Imágenes de las gravas de Alto Hospicio en vía que conecta Iquique con Alto Hospicio (Ruta 16) en el Norte de Chile. ....	70
Figura 42. Esquema de la interacción de placas de tipo Convergente. ....	71
Figura 43. Esquema de la situación inicial sin inducción sísmica con partículas de suelo separadas con agua .....	73
Figura 44. Esquema del fenómeno de licuefacción luego de sollicitación sísmica .....	73
Figura 45. Imágenes de cavidades encontradas en los perfiles de suelo en Kuwait .....	74
Figura 46. Imágenes de dos colapsos en la superficie producto de cavidades subterráneas .....	75
Figura 47. Procedimiento de mejoramiento del suelo en el área residencial a 20 Km de la ciudad de Kuwait. ....	75
Figura 48. Perfil de suelo después del tratamiento de compactación dinámica y compactación por vibroflotación.....	76
Figura 49. Esquema de falla de rumbo con espacios vacíos luego de movimiento sísmico que posteriormente se rellenan.....	77

Figura 50. Ubicación del GPR y ERI en perfiles que se llevan a cabo en la Sima de Madrona, España .....	80
Figura 51. Perfiles en la Sima de Madrona, España, en donde se muestra cómo el GPR da indicios de cavidades subterráneas. ....	81
Figura 52. Perfil de Tomografía Resistividad Eléctrica en donde se visualiza la presencia de una cueva circular u ovular .....	82
Figura 53. Modelos de resistividad eléctrica del terreno en Linares, España. ....	83
Figura 54. Cartografía donde se visualiza las tasas de subsidencias en 3 rectángulos....	84
Figura 55. Cartografía de localización de acuíferos según la DGA (2013). ....	89
Figura 56. Extracto del Perfil Geoeléctrico, desde Embalse Lautaro a Piedra Colgada, Valle del río Copiapó, Región de Atacama .....	90
Figura 57. Mapa basado en fotografía aérea del año 1962 realizado por la O.E.A. en Chile. ....	92
Figura 58. Gráfico para la correlación entre el total de precipitaciones del año y el máximo de precipitaciones caídas en un día para la Estación.....	93
Figura 59. Balance Hídrico sector 4 donde se localiza la comuna de Tierra Amarilla.....	95
Figura 60. Uso de caudal otorgados en el acuífero del río Copiapó.....	95
Figura 61. Niveles de agua subterránea en Sector 4 según nivel de cota piezométrica en pozos. ....	96
Figura 62. Perfil para el basamento rocoso v/s cota de superficie sobre el fondo de valle en la cuenca de río Copiapó según la DGA (2003).....	97
Figura 63. Fotografías de suelos de la serie Apacheta .....	100
Figura 64. Gráfico para la magnitud máxima y promedio de sismos para los últimos 40 años entre -26°S y -29°S y -68°O y -72°O.....	103
Figura 65. Mapa para las características principales estructurales de la región de Atacama .....	104
Figura 66. Mapa que muestra la distribución epicentral de los sismos con magnitudes superiores a 5.0 registrados en distancias telesísmicas según el Centro Sismológico Internacional (ISC) entre 1964 y 1995. ....	105
Figura 67. Mapa geológico de Copiapó y Tierra Amarilla.....	108
Figura 68. Falla que subyace a la cuenca del río Copiapó.....	109
Figura 69. A: Distribución espacial del flujo de detritos y barro en la confluencia del río Copiapó y la quebrada Carrizalillo. ....	111
Figura 70. Imagen de la subsidencia a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla post evento aluvional de marzo del 2015. ....	111
Figura 71. Cartografía de localización de concesiones mineras para exploración.....	113
Figura 72. Cartografía de localización de concesiones mineras para explotación.....	114
Figura 73. Mapa resumen que muestra los resultados de la investigación según los objetivos planteados.....	118
Figura 74. Resultados ponderación de la subsidencia en la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. ....	119
Figura 75. Resultados ponderación de la subsidencia en el patio de una casa.....	120

Figura 76. Resultados ponderación de la subsidencia en el Caserón Minero.....	121
Figura 77. Mapa con un buffer de influencia para indicar una zona alrededor del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla que debería estar libre de socavones. ....	126
Figura 78. Cartografía que localiza la distribución de la transición entre facies arco volcánico continental (derivación clástica) y sedimentación superficial marina carbonatada conocida como la formación abundancia .....	137
Figura 79. Columna estratigráfica en la posición N° 3 del Anexo N° 1 localizada en la quebrada de Meléndez. ....	138
Figura 80. Columna estratigráfica en la posición N° 5 del Anexo N° 1 localizada en la quebrada de Meléndez. ....	138
Figura 81. Columna Estratigráfica de la quebrada de Meléndez .....	139
Figura 82. Columna estratigráfica en la quebrada de Meléndez .....	139
Figura 83. Perfil Geomecánico.....	140
Figura 84. Perfil Geomecánico.....	141
Figura 85. Columna estratigráfica del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla cercana a la subsidencia del patio de una casa. ....	141
Figura 86. Mapa de la geología del área de estudio.....	142
Figura 87. Cartografía de localización de mineras donde se extrae roca caliza. ....	145
Figura 89. Mapa geológico de la cuenca del río Copiapó.....	146

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Localización de subsidencias. Datos tomados en terreno en Septiembre 2014. 15	
Tabla 2. Nivel de precipitaciones para el área de estudio .....	34
Tabla 3. Escala de importancia relativa (numérica y verbal) para el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) .....	44
Tabla 4. Características Físicas y Morfológicas del pedón y/o horizontes de suelos según su profundidad en cm .....	101
Tabla 5. Sismos históricos sobre magnitud 7,0 en la ciudad de Copiapó.....	103
Tabla 6. Propiedades Físicas, Químicas y Físico–Químicas del Suelo .....	143
Tabla 7. Balance hídrico del acuífero del sector 4.....	144

## **CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

La comuna de Tierra Amarilla localizada en el Norte de Chile, se ha visto afectada por subsidencias de terreno desde hace más de dos décadas. El primero descrito en esta investigación ocurrió en el año 1993 en la Minera Santos localizada muy cerca del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. En aquella ocasión sucedió un derrumbe de un caserón de extracción mineral creando un cráter de 32 m de diámetro y 18 m de profundidad (HAUSER, 1993). En los últimos años han sucedido nuevas subsidencias donde dos se han producido en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y la tercera en un caserón minero a 500 m de la población Luis Uribe en terrenos de minera Pucobre (CARVAJAL, 2013). Tales hundimientos del terreno han mantenido en incertidumbre a los habitantes de la comuna de Tierra Amarilla ya que piensan que existiría la posibilidad de que existan cavidades subterráneas, las cuales podrían hacer colapsar la superficie (CARVAJAL, 2013). En ese sentido, las consecuencias de las subsidencias de terreno aparte del peligro a la integridad física de las personas son: el daño físico a los edificios, las carreteras, pavimento, redes, costes económicos de las reparaciones físicas y compensaciones, el costo económico de los negocios y la interrupción laboral, los impactos sociales y psicológicos para los afectados y otras personas de la zona además sufrir en ocasiones la falta de apoyo público (DECK *et al.*, 2009).

Las subsidencias son comúnmente provocadas en la tierra por: a) descensos del nivel subterráneo del agua los cuales son causados por bombeo o por la desviación de la escorrentía superficial, b) por el flujo de agua subterránea a través de rocas susceptibles de disolución tales como roca caliza y yeso (HEIDARI *et al.*, 2011) y c) el colapso de galerías subterráneas de las cuales se ha extraído mineral. El colapso de la superficie terrestre, por lo tanto, pueden ser inducidos a través de causas naturales o por el hombre (LANGER, 2001).

Esta investigación se enfocará a investigar los factores que estarían desencadenando los eventos de subsidencias. En ese sentido, la ponderación de factores antrópicos como son: las faenas mineras, la extracción de agua por las mismas además de los viñedos presentes en la cuenca del río Copiapó, y por otra parte los factores naturales como por ejemplo: el tipo de suelo, sistemas de fallas y la estratigrafía de la roca podrían ser agentes que participen en la génesis de las subsidencias. Con estos factores identificados y evaluados se podría indicar si ellos incidirían en la subsidencia producto además de un posible proceso Kárstico.

En definitiva, la importancia de este estudio es entregar antecedentes sobre las razones por las cuales se están produciendo subsidencias de terreno en la comuna de Tierra Amarilla y así aportar a uno de los grandes problemas para los encargados de la Planificación Territorial.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El colapso repentino e inesperado de la superficie de la tierra por cavidades del subsuelo es uno de los tipos de peligros geológicos más peligroso que existe. Este tipo de procesos de remoción en masa, adquieren particular relevancia cuando se sitúan y/o comprometen sectores poblacionales o aledaños a ellos (HAUSER, 2008). En ese sentido, la comuna de Tierra Amarilla ha presentado colapsos en la superficie que mantienen en alerta a las autoridades y habitantes de esta comuna (CARVAJAL, 2013), además, los vecinos de la comuna de Tierra Amarilla han denunciado que es habitual que haya hundimiento de terreno (WOO, 2013). En el reportaje de CARVAJAL (2013) se entrevista a habitantes del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla los cuales piensan que en el subsuelo existen cavidades y que el terreno se puede hundir con la consecuencia de que se derrumben las viviendas, detonado por gravedad, un sismo de gran magnitud o tronaduras por parte de las mineras existentes en la zona. Además, existirían otras problemáticas presentes en esta área según GUTIERREZ (2014) las cuales serían:

- Polvo en suspensión
- Posible contaminación de aguas subterráneas.

Las subsidencias de terreno actuales fueron detectadas a mediados del año 2013 y a finales de ese mismo año. En el año 1993 también sucedió un hundimiento de terreno en cercanías del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla asociado a labores mineras (HAUSER, 1993). Se han realizado estudios por parte de mineras que trabajan en el área además de la Universidad de Atacama, incluyendo la Municipalidad de Tierra Amarilla, para descartar que existan cavidades subterráneas bajo el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla (ROMO, 2014), en donde estos estudios no han otorgado una explicación concluyente en relación a los factores que ocasionarían las subsidencias y si existen o no cavidades subterráneas.

Las obras civiles, como edificios, casas, calles, y/o puentes, son afectadas con grietas y deformaciones cuando se encuentran cercanas a subsidencias según HERNÁNDEZ, (2013) & GALVE (2009) como ha sucedido en el D.F. de Ciudad de México (Figura 34) y en la ciudad de Zaragoza en España (Figura 38).

Además, el abogado de Tierra Amarilla menciona una posible línea de conexión de labores mineras subterráneas cruzando de O a E al área urbana de la comuna de Tierra Amarilla (CARVAJAL, 2013).

Con la problemática de subsidencias mencionada en los párrafos anteriores, existiría riesgo para los habitantes de la comuna de Tierra Amarilla, en donde riesgo según LAVELL (2002) se entiende como la probabilidad de pérdidas futuras como resultado de la existencia de un peligro latente, asociado con la posibilidad de que se presenten fenómenos peligrosos que predisponen a la sociedad a sufrir daños en diversos grados.



Tomando el concepto de riesgo de LAVELL (2002), el peligro latente serían las posibles cavidades subterráneas no detectadas bajo el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, donde estas cavidades podrían rellenarse con el material que se encuentre en la parte superior, donde luego caerían detonadas producto de la gravedad, sismos o tronaduras mineras, y así provocando subsidencias en la superficie con la consecuencia según PACHECO (2007) & DECK (2009) de:

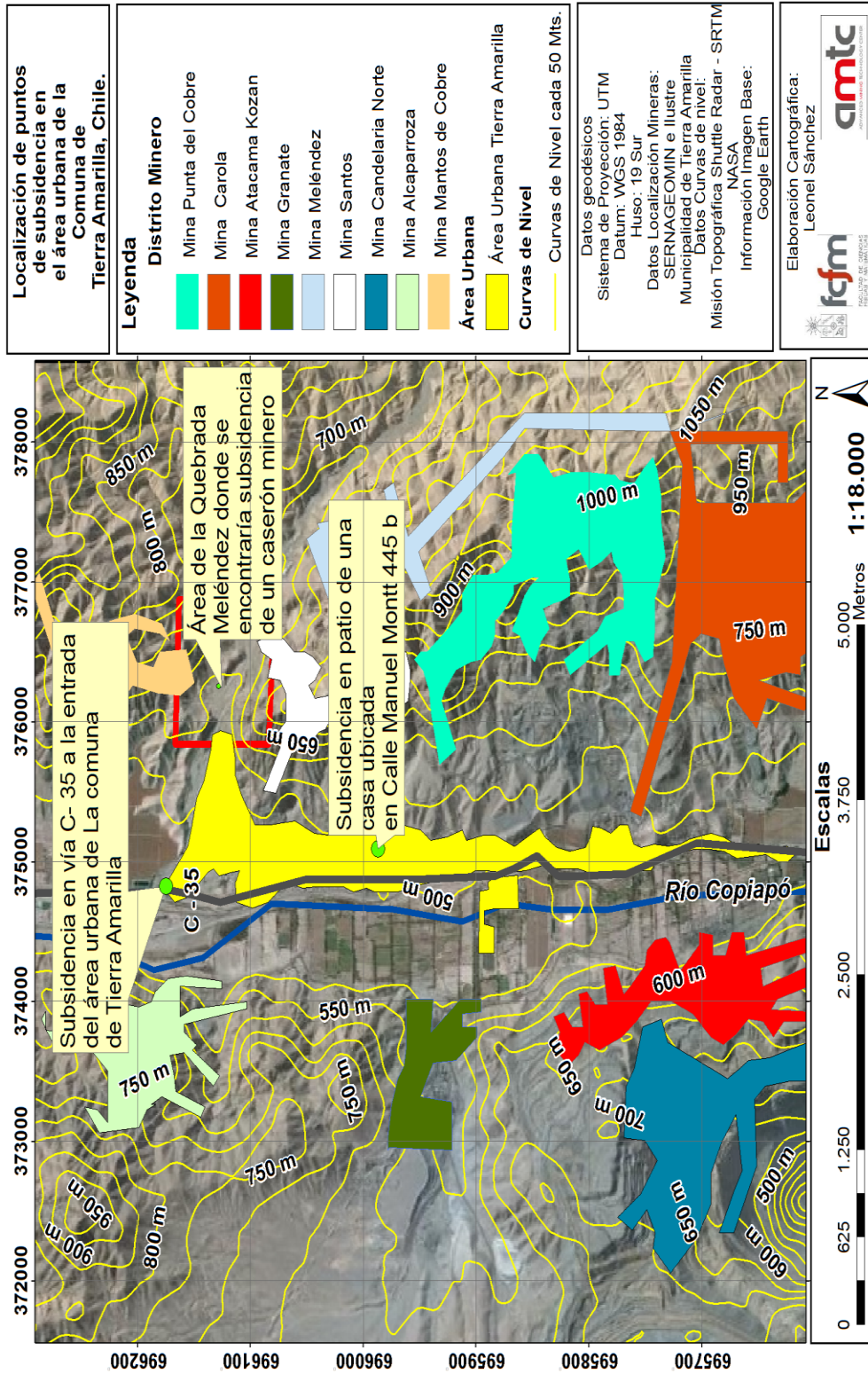
- Daños en la infraestructura civil (casas, caminos, puentes, etc.)
- Pérdidas económicas por la afectación de esta infraestructura urbana que se ha edificado sobre la zona de hundimientos
- Daños a las personas producto de caídas sobre ella de infraestructuras de gran tamaño, como paredes de casas, producto del hundimiento y de la deformación del suelo
- Coste económico de las reparaciones físicas y compensaciones
- La interrupción laboral
- Impactos sociales y psicológicos para los afectados

En ese sentido, el riesgo constituye una restricción para el desarrollo sustentable de las sociedades (LAVELL, 1997), ya que las personas que viven en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se encuentran residiendo en posibles zonas de riesgos

Con estos antecedentes, es atinente señalar que estamos frente a una constante respecto de la forma en que como país hemos afrontado desde el punto de vista cultural, social y económico el uso de nuestro espacio geográfico; muchas veces de espaldas a su dinámica natural y más bien cercana a la simple ocupación y explotación, lo que nos conduce a una frecuente minimización del riesgo y la amenaza y, en definitiva, a la catástrofe (ARENAS *et al.*, 2010).

La escasa consideración de la dinámica y recurrencia de procesos naturales extremos, y su relación con el emplazamiento de asentamientos humanos puede tener consecuencias no deseadas, induciendo el riesgo de desastre (LAGOS *et al.*, 2008). En esta investigación se revisan procesos naturales como también procesos antrópicos que incidirían en las subsidencias en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.

Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.



**Figura 1.** Cartografía de ubicación de los puntos de subsistencia. El primero se encuentra a la entrada de la comuna de Tierra Amarilla, el segundo en el patio de una casa en la zona urbana de esta comuna y el tercero corresponde a la subsistencia de un caserón minero el cual se ubica en el rectángulo rojo de la Figura 1.

Localización de subsidencias	Fecha de hundimiento	Altitud (m.s.n.m)	UTM (WGS 84)	
			Este	Norte
Entrada al área urbana	2013	480	374.876	6.961.826
Patio de una casa	2013	498	375.092	6.959.871
Caserón minero	2013	584	376.181	6.961.569

Tabla 1. Localización de subsidencias. Datos tomados en terreno en Septiembre 2014.

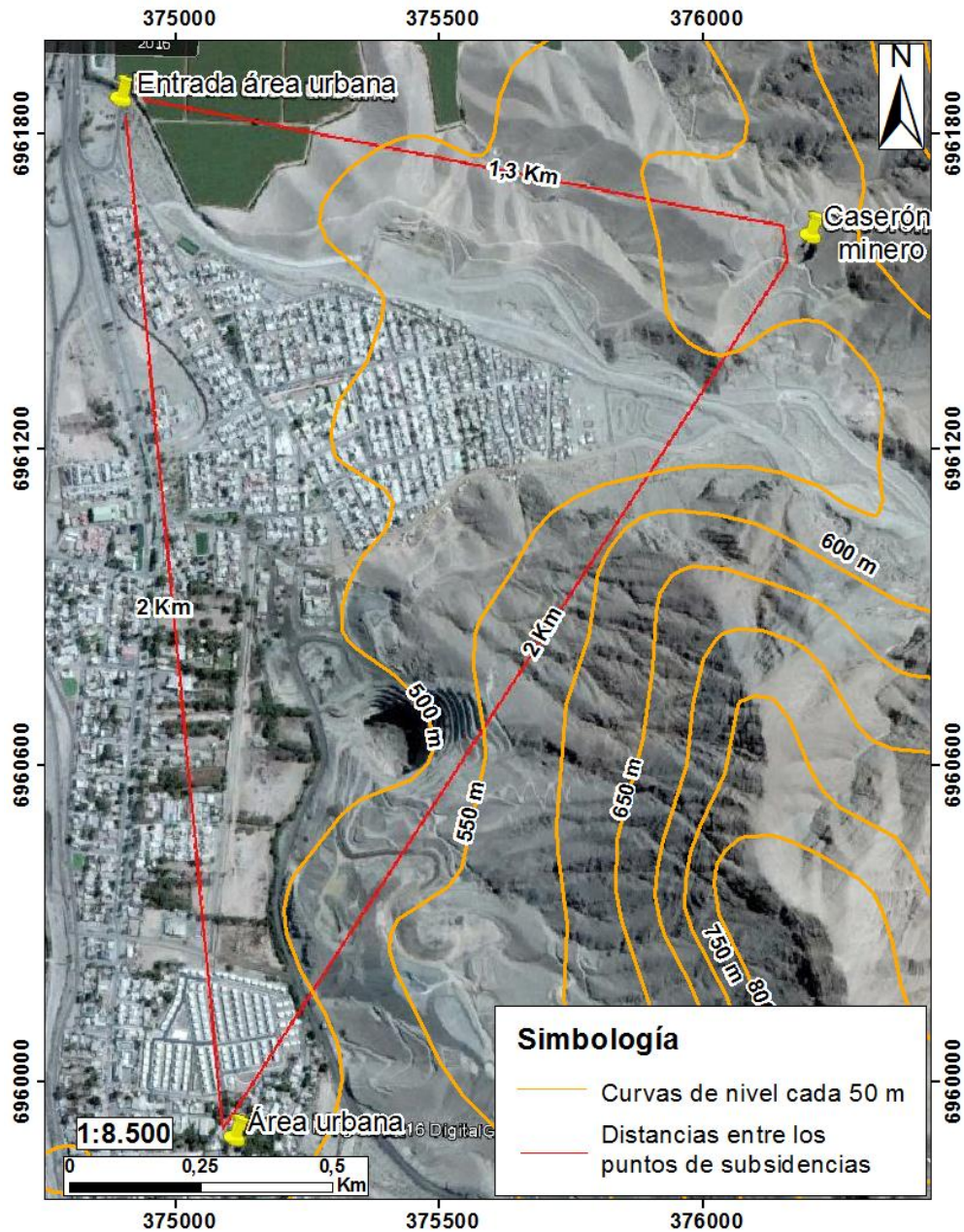


Figura 2. Localización de puntos de subsidencias y las distancias con cada punto.

Los tres puntos de subsidencia se muestran y localizan en la Figura 1 y 2. El primero se encuentra a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, el segundo en el patio de una vivienda en el área urbana, y el tercero en la quebrada de Meléndez destacada en un rectángulo rojo en la Figura 1. Cabe destacar que estos tres puntos de subsidencias son los que han ocurrido en el año 2013 en la comuna de Tierra Amarilla.

A continuación se describe cada punto de subsidencia:

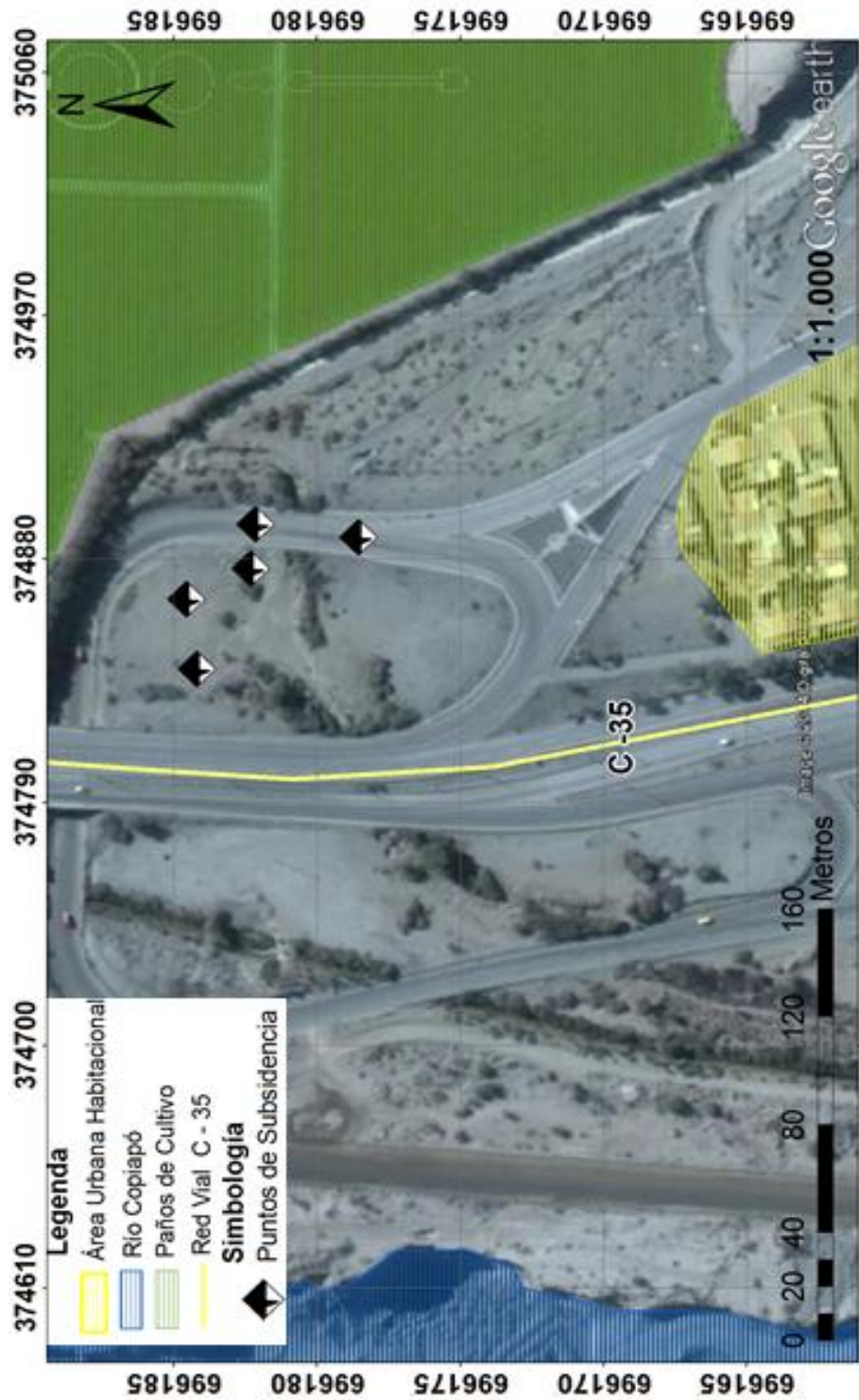
➤ **Subsidencias a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla**

En la Figura 3 se observa la localización, a través de la simbología, el área afectada por subsidencias y en la Figura 4 se visualiza las subsidencias en esta área, donde todas ellas se encuentran separadas a pocos metros de distancia. Las subsidencias en este sector se distribuyen en una área de depósitos antrópicos producto de la construcción de la carretera C – 35, correspondiente a una rotonda en esta zona, donde debajo de esta construcción vial se encuentran depósitos fluviales no consolidados (ver Figura 20).

En el área inferior de la Figura 3, en color amarillo, se localizan viviendas a una distancia de 120 m de los hundimientos de terreno. A la derecha, en color verde, se localizan paños de cultivo, las cuales se encuentran a 40 m de las subsidencias. El río Copiapó se observa en color azul a la derecha a una distancia de 200 metros de las subsidencias. El río Copiapó a la fecha de Septiembre del 2014 se encontraba sin agua en la parte superficial, esto verificado en terreno.

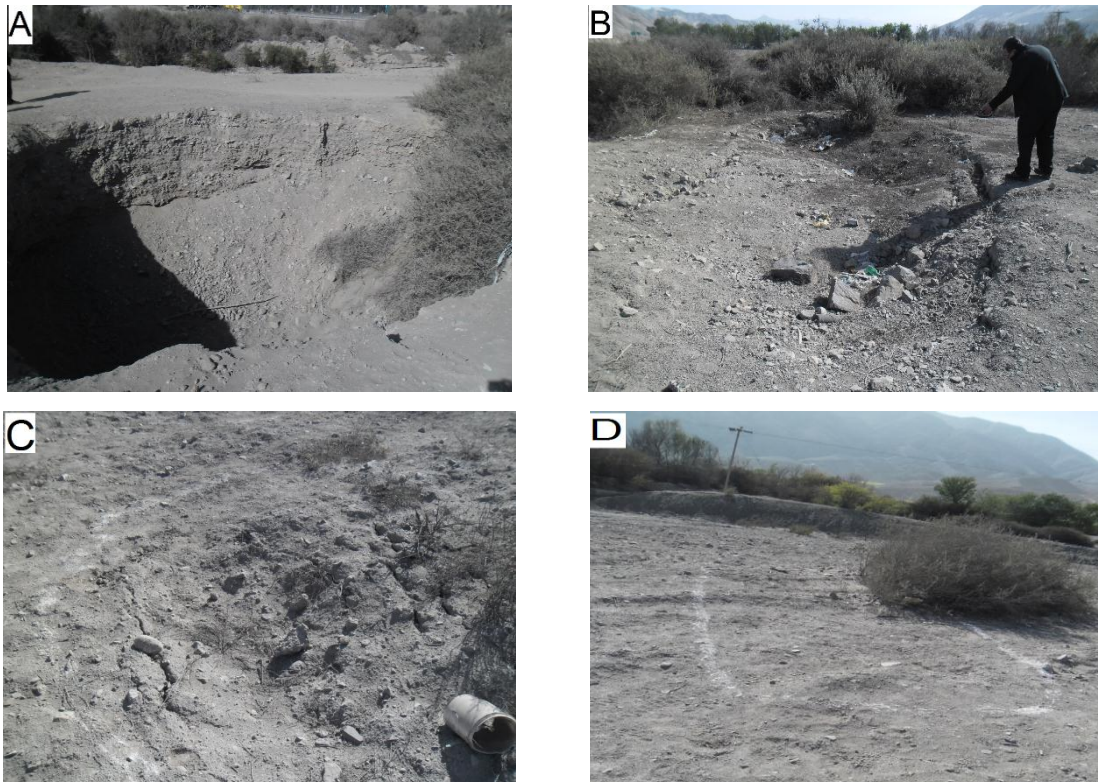
Las subsidencias localizadas en la Figura 3 tienen distintas dimensiones y se observan en las Figuras 4 y 5. La de mayor tamaño corresponde a un hundimiento de 10 m de diámetro y 6 m de profundidad (Figura 4A). Otra subsidencia tiene una génesis más reciente que la anterior presentando una forma ovalada con 8 m de longitud y 5 m de ancho y profundidad de 50 cm (Figura 4B). Las siguientes subsidencias presentan dimensiones menores, las cuales lo más probable tienen un origen más reciente que las de mayores tamaños.



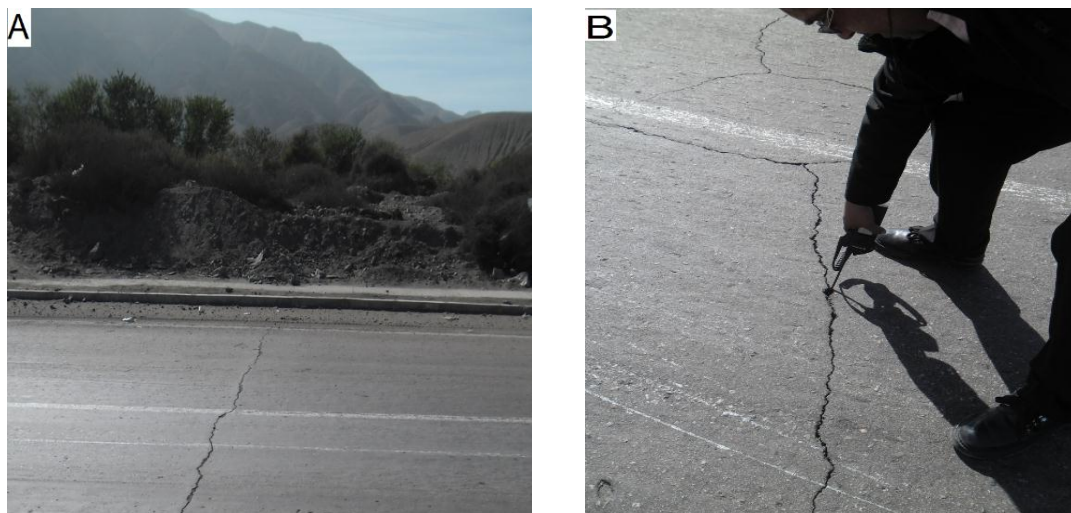


**Figura 3.** Mapa de localización de puntos de subsistencia en la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Se ubican las subsistencias en la rotonda y en la vía.

Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsidencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.



**Figura 4.** Imágenes de subsidencias en la rotonda a la entrada de la comuna Tierra Amarilla localizadas en la Figura 3



**Figura 5.** Imágenes de rotura de pavimento en vía C – 35 que podrían estar asociada a subsidencias localizadas en la entrada norte a la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla localizadas en la Figura 3.



➤ **Subsistencia en el patio de una casa en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla**

La subsistencia localizada en el patio de una vivienda corresponde a un área de depósitos fluviales no consolidados (ver Figura 20) y se localiza en la Figura 7. Se observa esta subsistencia en la Figura 6, la cual posee formación de suelo en la superficie. El hundimiento presenta dimensiones de 1,5 m de diámetro que ha ido aumentando en el transcurso del tiempo producto de caída de material desde sus paredes. La profundidad alcanza a 4 m.

La subsistencia en este lugar ocurrió en el año 2013 causando gran preocupación a los habitantes de la casa y las autoridades de la comuna de Tierra Amarilla, en donde el alcalde Osvaldo Delgado visitó la residencia afectada (Figura 6D) (CENTRAL REGIONAL DE ATACAMA, 2013).



**Figura 6.** Imágenes de la subsistencia en patio de una casa, calle Manuel Montt 445 b, comuna de Tierra Amarilla. Posee un diámetro de 1,5 m y con 4 m de profundidad.

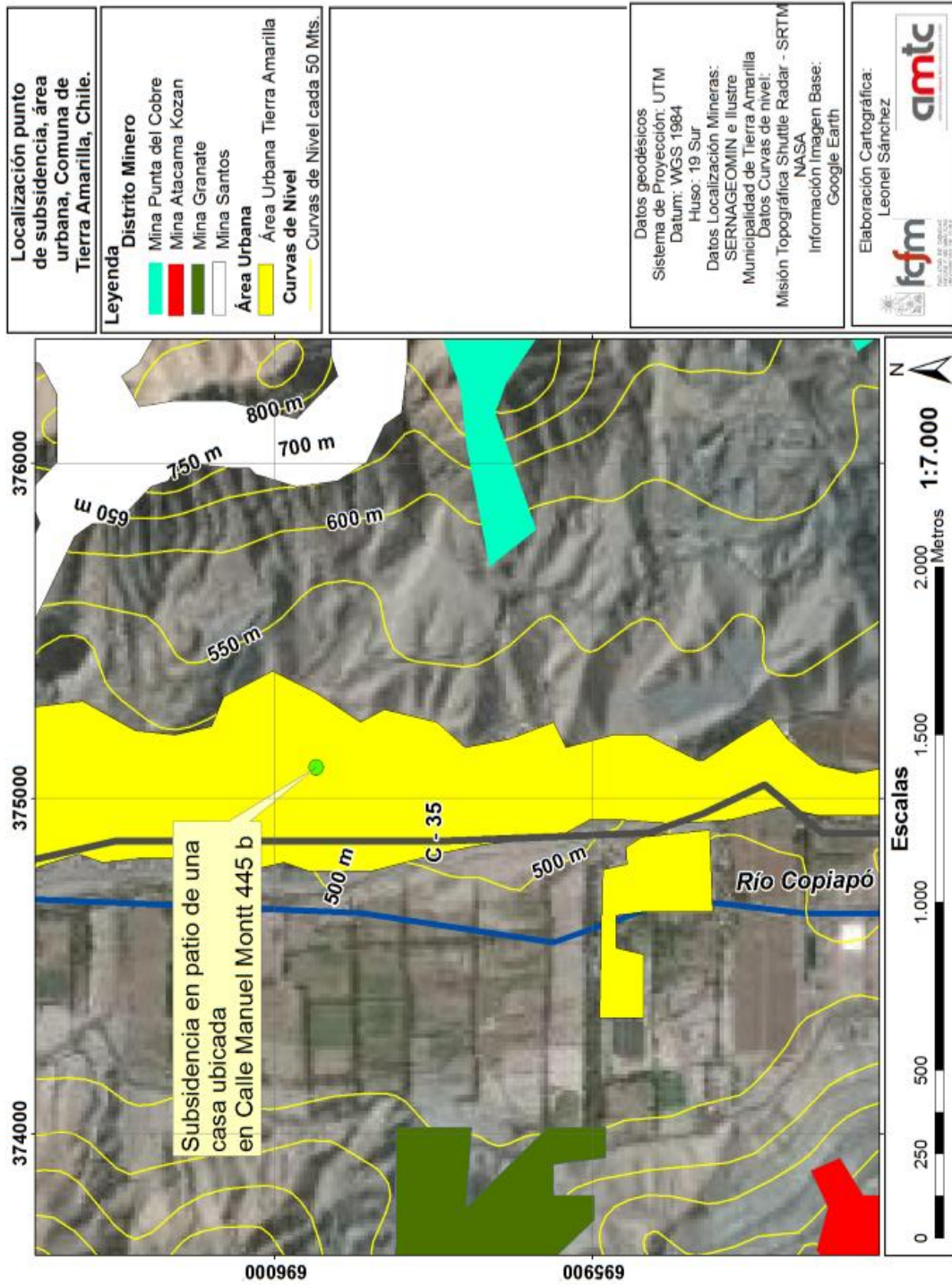


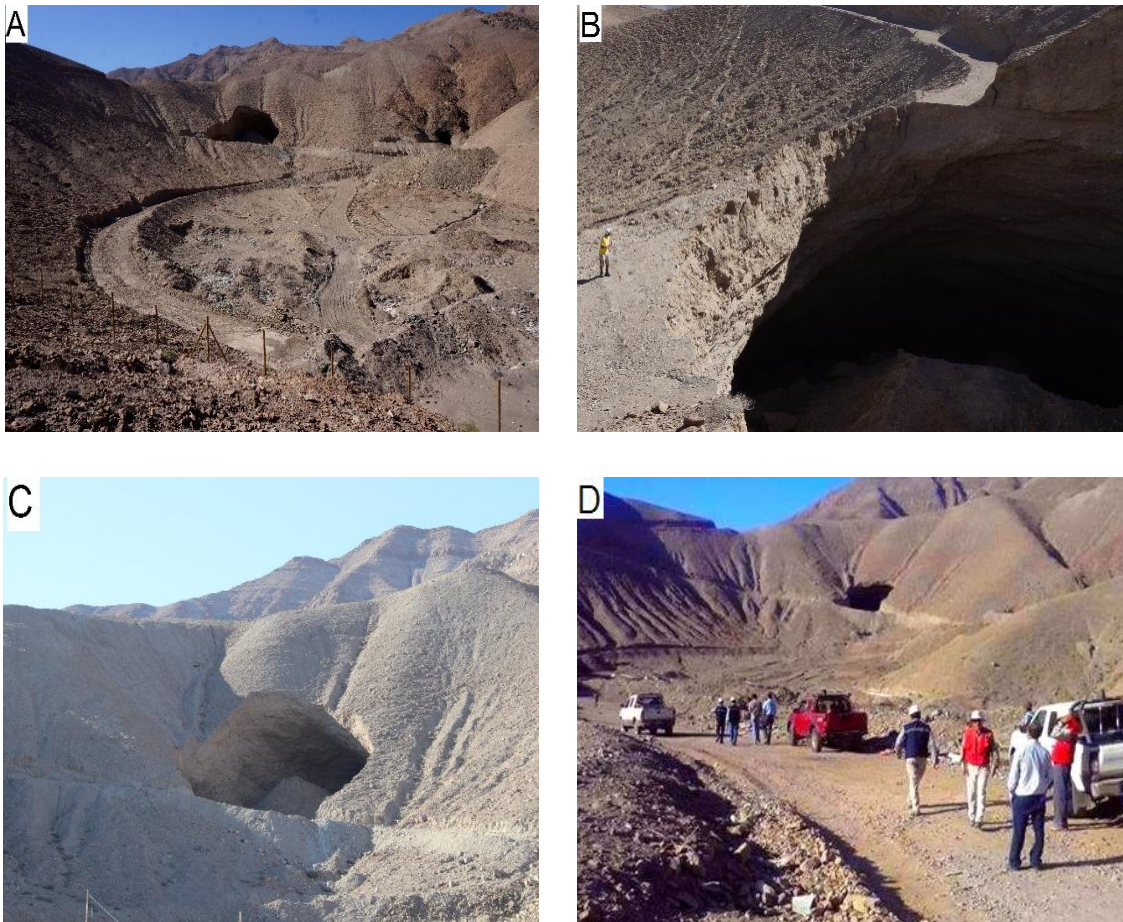
Figura 7. Cartografía de localización de subsistencia en patio de una casa en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla



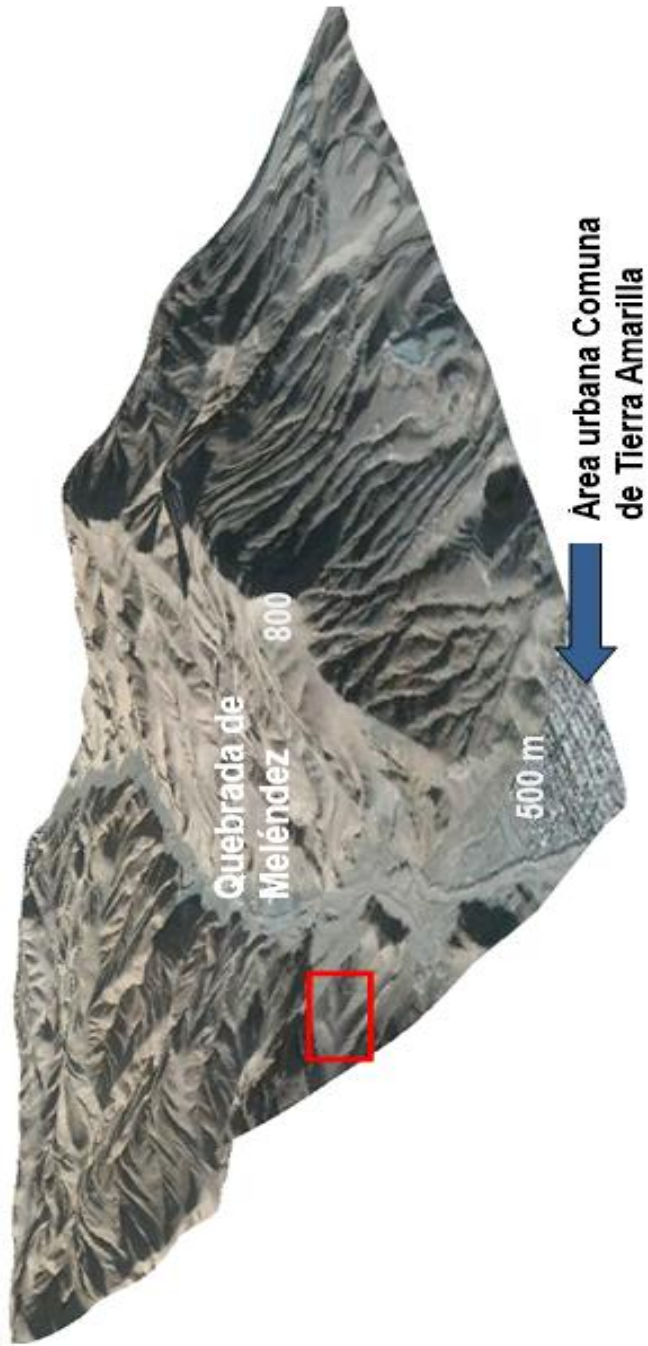
La superficie de esta subsidencia presenta un horizonte de suelo orgánico, ya que presenta algunas raíces mezcladas con las arenas, arcillas y gravas fluviales de la cuenca del río Copiapó. A mayor profundidad los horizontes de suelos presentan mayores niveles de gravas y ripios en las paredes, los cuales han caído hacia el fondo rellenando la subsidencia (Figura 6B).

➤ **Subsidencia en la quebrada de Meléndez**

El tercer punto de subsidencia corresponde a una subsidencia en terrenos de Minera Pucobre en uno de sus caserones localizado en la quebrada de Meléndez. Esta subsidencia es la de mayor tamaño de las tres y su génesis corresponde al colapso vertical del caserón producto de la mala calidad de la roca según técnicos de Minera Pucobre (CENTRAL REGIONAL DE ATACAMA, 2013).



**Figura 8.** Imágenes de la subsidencia de caserón minero en la quebrada de Meléndez de 30 m de profundidad, 30 m de ancho y 20 m de largo en terrenos de Minera PUCOBRE (CENTRAL REGIONAL DE ATACAMA, 2013).

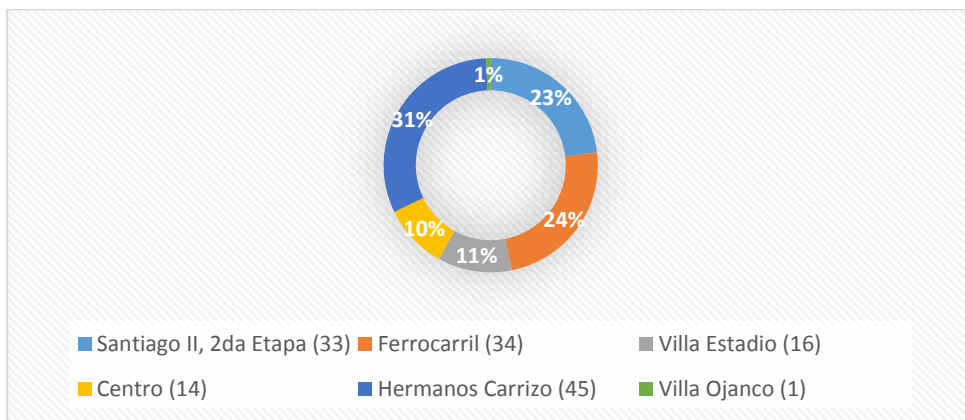


**Figura 9.** Modelo de Elevación Digital (DEM) del área de la Quebrada de Meléndez en donde se encuentra la subsidencia de Caserón Minero. Rectángulo rojo en Figura 1.

La subsidencia producida en la Quebrada de Meléndez se encuentra muy cercana al área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y tiene una profundidad de 100 m. Es una faena subterránea de la cual se obtiene principalmente cobre.

### **Daños en viviendas en la Comuna de Tierra Amarilla**

La municipalidad de Tierra Amarilla elaboró un catastro de viviendas dañadas (Figura 10) realizado por el Director de Obras (S) Municipalidad de Tierra Amarilla en el año 2014. La localización de los sectores catastrados se puede visualizar en la Figura 11.



**Figura 10.** Viviendas catastradas por la municipalidad de Tierra Amarilla en cada sector del área urbana.

Los sectores catastrados para los daños presentados fueron población Hermanos Carrizo, Sector Centro, Población Santiago II, Villa Estadio y Sector Ferrocarril con un total de 82 casas catastradas.

En la Figura 11 se localizan los sectores catastrados y los puntos de subsidencias. En ese sentido, la subsidencia en el patio de una vivienda se localiza en el sector centro. La subsidencia a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se localiza en cercanías a las poblaciones Hermanos Carrizo y Santiago II. Por último, la subsidencia localizada en el Caserón Minero de Minera Pucobre se encuentra a pocos metros de la población Santiago II.

En la Figura 12 se observa los daños más frecuentes que han presentado las viviendas en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. El daño más común es falla en muros con pérdida de integridad estructural del elemento con 43 viviendas afectadas. El segundo tipo de daño más frecuente es fallas en estructuras de techumbres con 28 casas afectadas. Le siguen los daños en fallas en vigas con pérdida de integridad estructural del elemento y daños en revestimientos (pisos, muros y cielos) con 15 y 16 casas afectadas respectivamente. Otro daño recurrente es el daño en fallas en radieres, losas o envigados y daños en cierres perimetrales con 13 viviendas en cada caso. Existen viviendas con peligro de desplomes de elementos estructurales con 8 viviendas y 6 viviendas con fallas en pilares con pérdidas de integridad estructural del elemento. Las viviendas que presentan



fallas en fundaciones son 4 y daños en elementos no estructurales (tabiques) también 4 viviendas. Los daños para el Sector Centro corresponden a viviendas con grietas profundas y una con eventual derrumbe. En la población Hermanos Carrizo existe una casa nueva con asentamiento de piso y otra presenta grieta en muros. En la población Santiago II presenta grietas en muros en la mayoría de las viviendas catastradas.

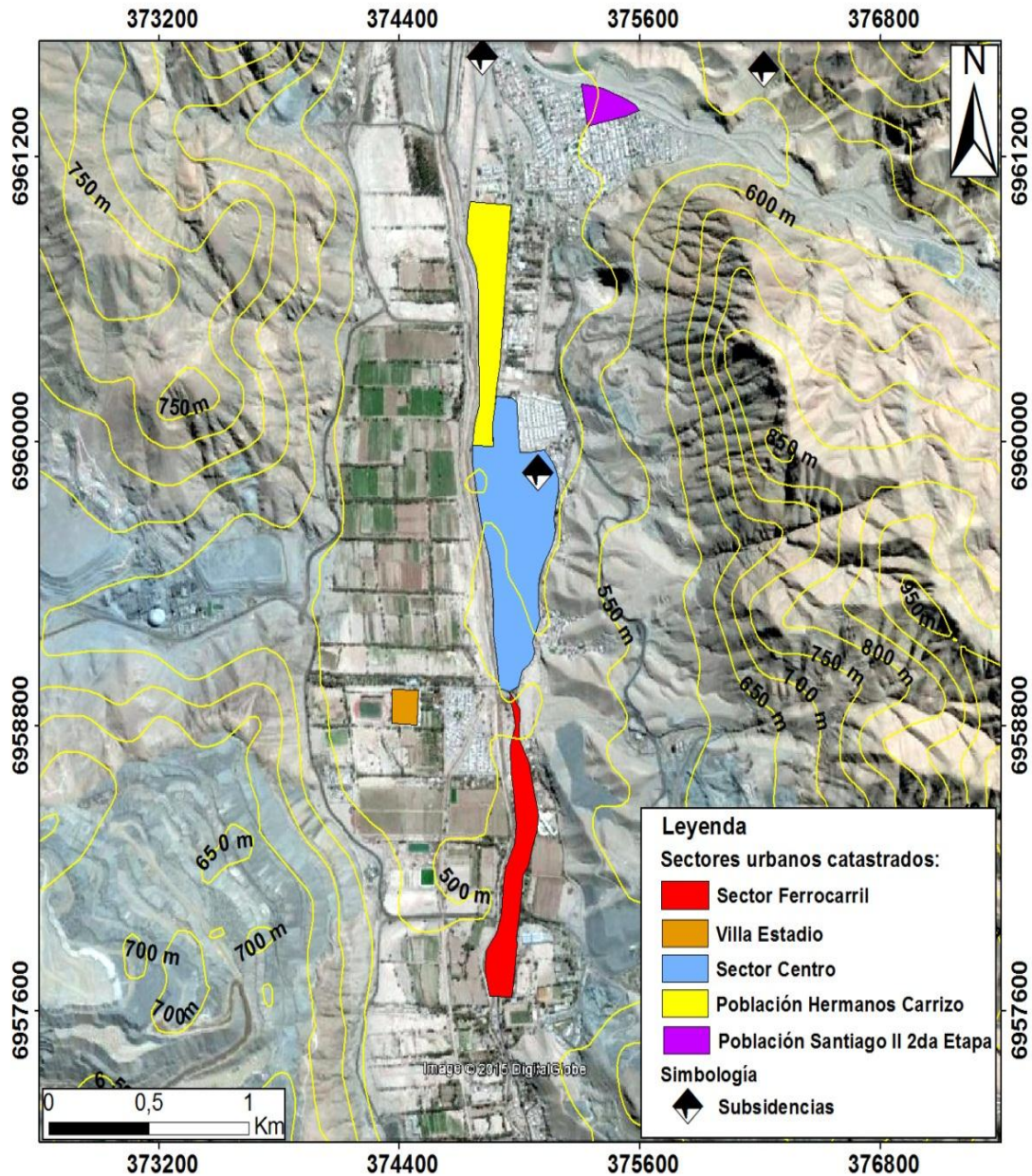
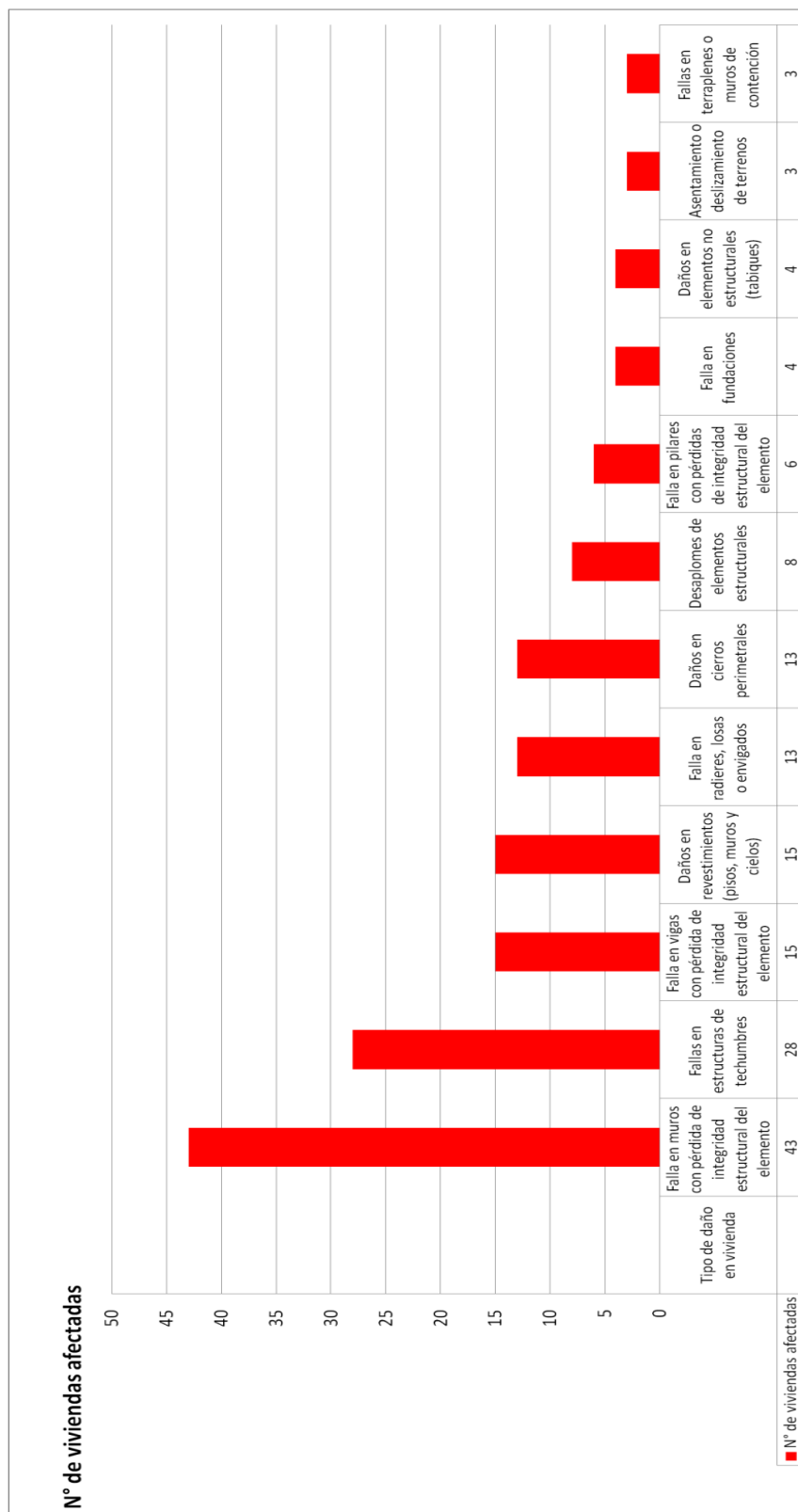


Figura 11. Sectores urbanos catastrados y localización de subsidencias

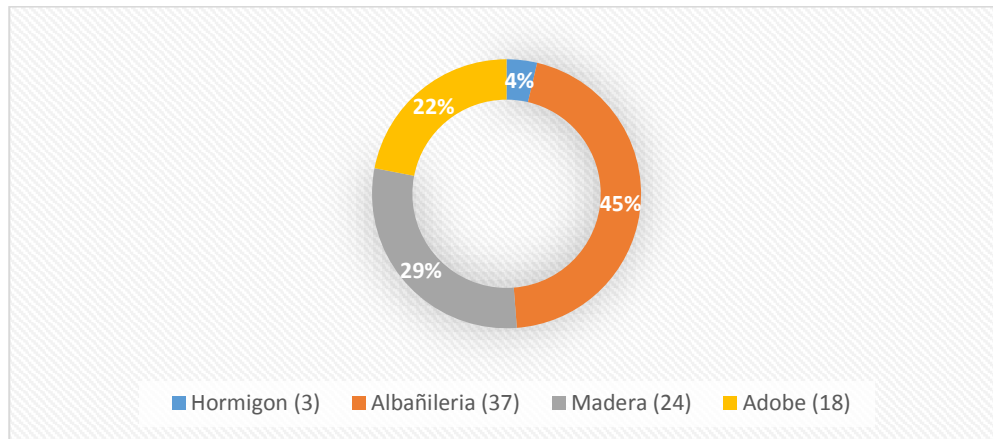
### NÚMERO DE VIVIENDAS AFECTADAS SEGÚN EL TIPO DE DAÑO



**Figura 12.** Gráfico en el cual se observa los daños más frecuentes en las viviendas del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Catastro realizado por Francisco Sánchez Sagardía, Arquitecto, Director de Obras (S) Municipalidad de Tierra Amarilla (2014).

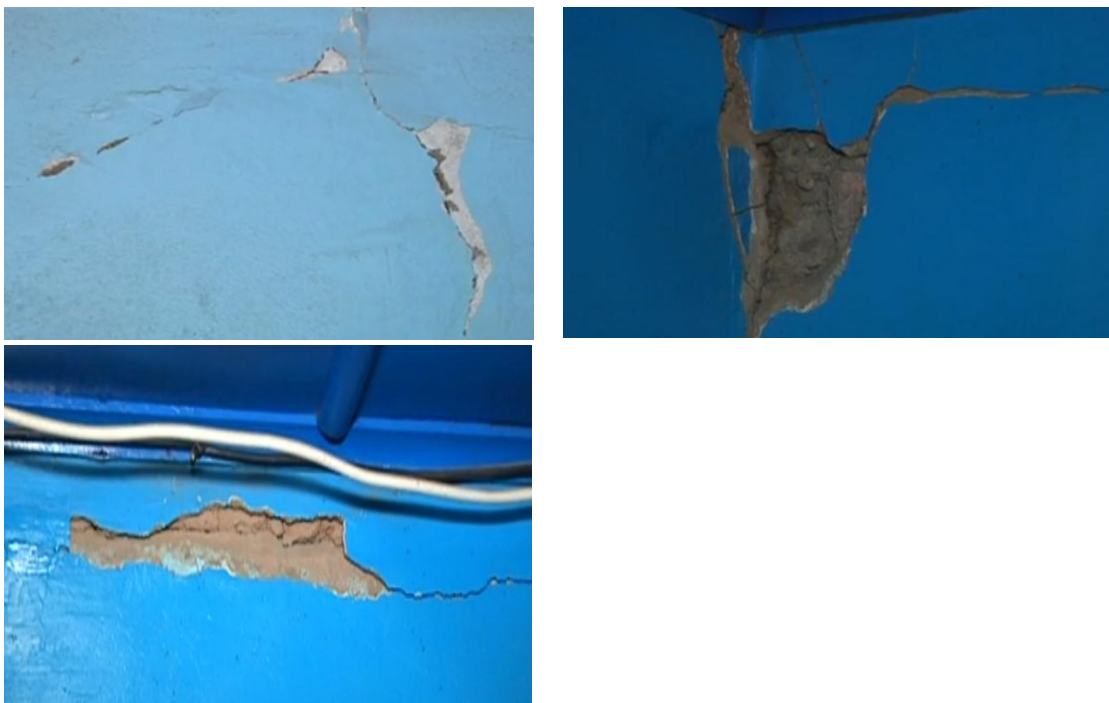
### Materialidades predominantes

Según el catastro realizado por la Municipalidad de Tierra Amarilla, de las 82 casas catastradas, 37 corresponden a albañilería, 24 a madera, 18 de adobe y 3 corresponden a hormigón (Figura 13).



**Figura 13.** Material de construcción predominante en las 82 casas catastradas.

En la Figura 14 se observan algunas grietas las cuales los dueños de estas casas asocian a las tronaduras mineras (CARVAJAL, 2013).



**Figura 14.** Imágenes de grietas en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.

### **1.3 ÁREA DE ESTUDIO**

Tierra Amarilla es una comuna de la región de Atacama la cual se encuentra a 15 Km al Sur de la ciudad de Copiapó (Figura 15). Posee 13.507 habitantes según el Censo 2012, donde dentro del área de estudio se encuentran 8.320 habitantes que corresponden a los habitantes del área urbana (INE, 2012). Los sectores que componen el área urbana son:

- Villa Ojanco
- Villa Estadio
- Villa Santiago I
- Villa Santiago II
- Villa Hermanos Carrizo
- Villa Ferrocarril
- Sector Centro

La vía principal en la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla es la C – 35 que conecta con la ciudad de Copiapó hacia el Norte y hacia aguas arriba del río Copiapó los asentamientos más cercanos a la Cordillera de los Andes. El área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se encuentra a una altura promedio de 500 m.s.n.m. y los cerros que la rodean alcanzan altura de 700 a 1.050 m.s.n.m.

La geología (la cual se describe más detalladamente en Geología del Área de Estudio) del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se encuentra sobre una estructura tectónica del Cretácico Inferior Volcánico y Rocas Sedimentarias (MARSCHIK, 2001). Geomorfológicamente el terreno corresponde a una llanura aluvial, con predominio de sedimentos fluvio – aluviales conformados durante el Cuaternario por la acción del río Copiapó (AGUIRRE. 1999). En ese sentido, el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla es atravesada por el río Copiapó de Sur a Norte, lo cual es una particularidad para los ríos chilenos donde generalmente la dirección de sus cauces es Este a Oeste o Cordillera a Mar.

Las principales actividades económicas son la minería y la agricultura en especial la uva de mesa. A esto se puede agregar las actividades de turismo y servicios asociados a las rutas de transporte, ya que la ubicación estratégica de la comuna de Tierra Amarilla como punto de detención para largos recorridos longitudinales, genera un relevante volumen de pasajeros en tránsito. Más información sobre la Economía del Área de Estudio se encuentra en el apartado de Economía.



Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.

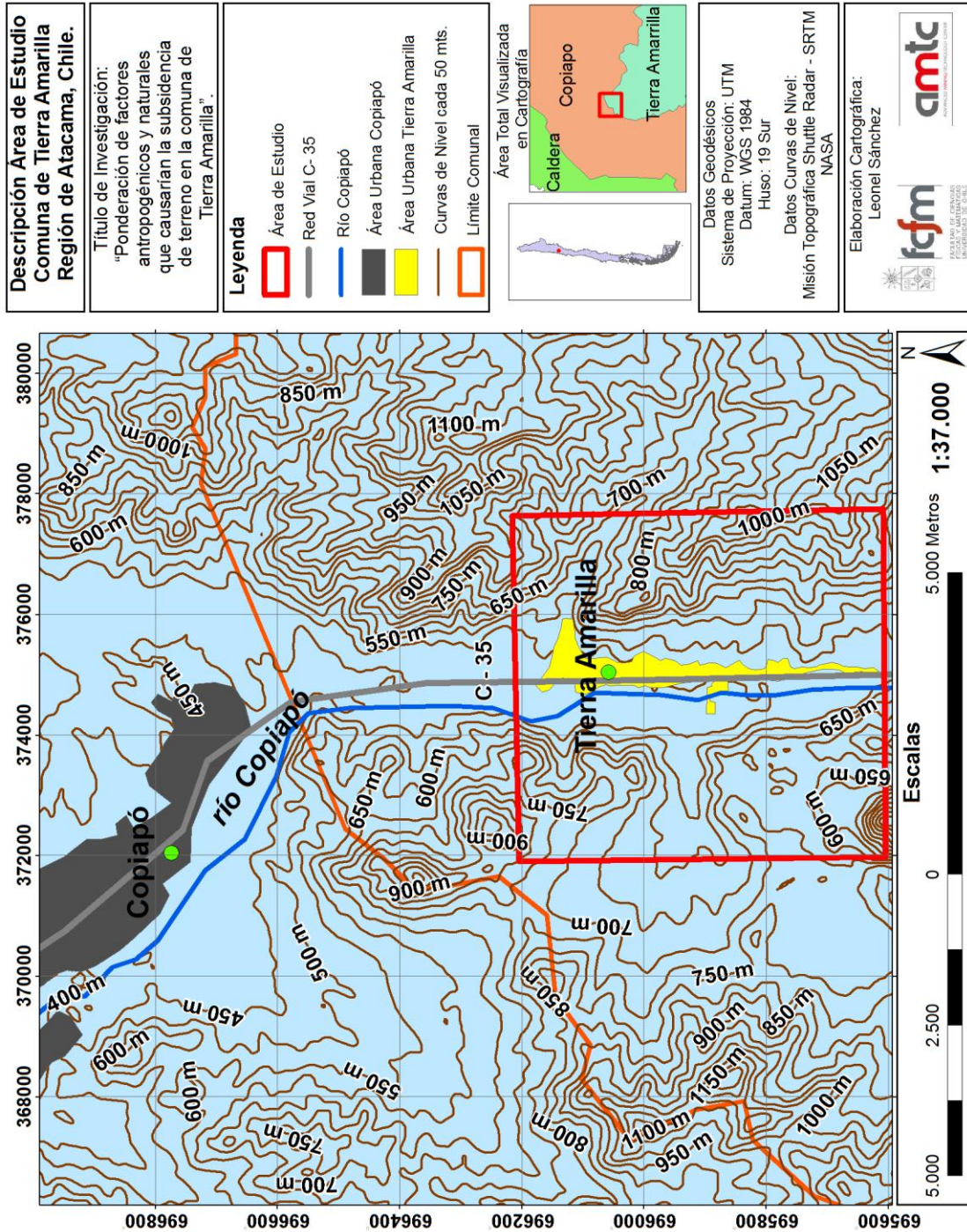


Figura 15. Cartografía de localización del área de estudio.



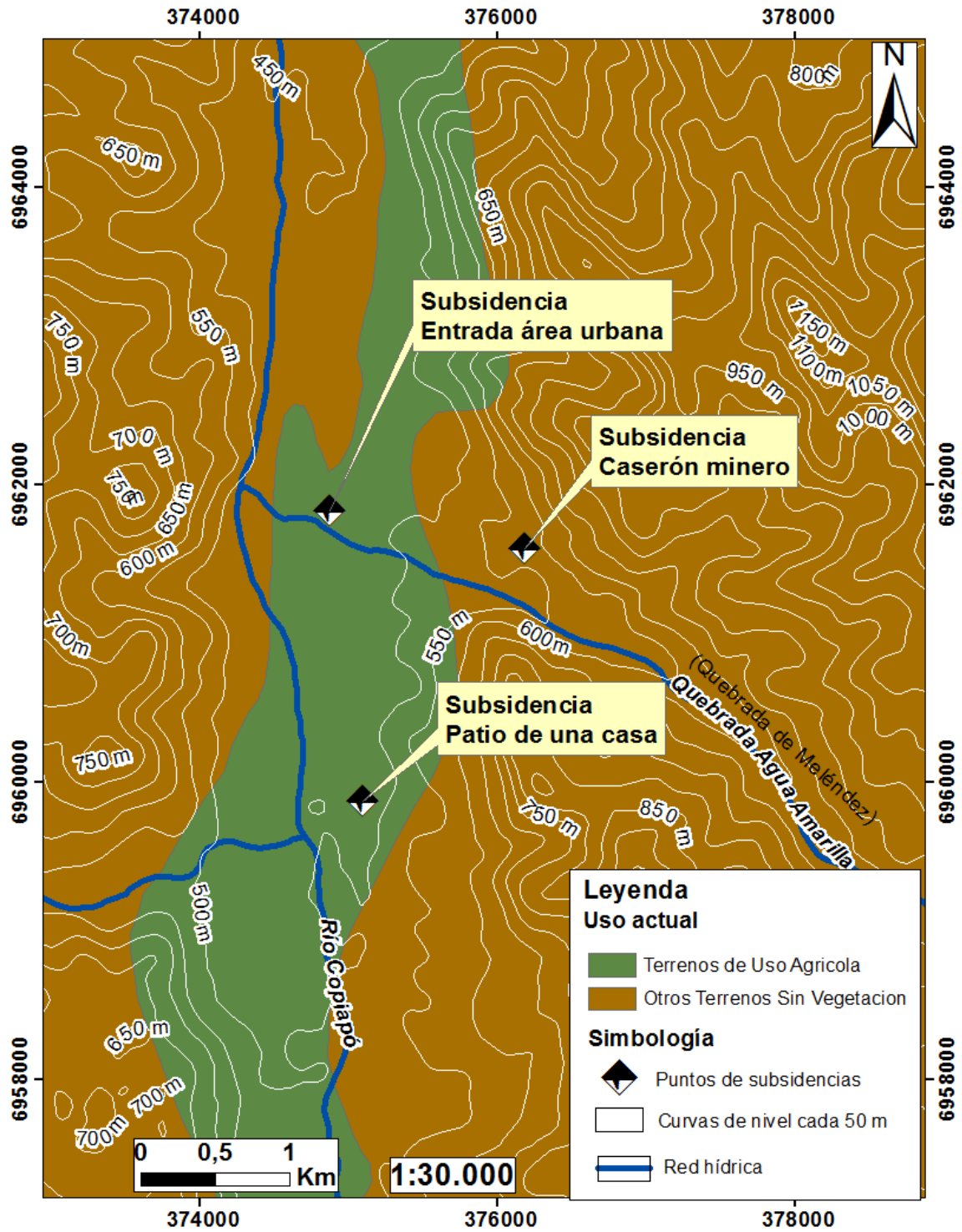


Figura 16. Mapa de uso de suelos según Ministerio de Agricultura.



Figura 17. Cartografía de localización para la distribución espacial de las principales actividades económicas que se encuentran en las cercanías del centro de Tierra Amarilla y del área de estudio (rectángulo rojo). Se aprecia viñedos al sur y distintas faenas mineras alrededor donde destacan Mina Candelaria, Mina Punta de Cobre y relaves mineros.

## **Economía**

Es necesario revisar las actividades económicas presentes en el área de estudio las cuales podrían tener incidencia en las subsidencias. En ese sentido, en la actualidad tanto la minería como la agricultura son centrales y constantes en la base económica del valle de Copiapó (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, 2005). Estas actividades económicas podrían estar causando los hundimientos, ya sea por la extracción de agua, como también la minería subterránea presente en la zona, en donde el proceso o génesis de las subsidencias es explicado en el Marco Teórico.

En los siguientes párrafos se hace una descripción de las actividades económicas presentes en el área de estudio:

Según el Atlas de Faenas Mineras del SERNAGEOMIN (2011), la comuna de Tierra Amarilla en toda su área posee 262 faenas de las cuales se extrae cobre, oro, hierro y caliza. La mayoría de estas faenas se encuentra en las cercanías de la cuenca del río Copiapó y en la quebrada Carrizalillo. Según este Atlas, existen en la comuna faenas subterráneas, a rajo abierto y exploraciones. Además, cabe destacar que existen una gran cantidad de faenas irregulares que corresponden a pequeña minería. La cuenca del río Copiapó, a la altura del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, presenta en su alrededor un distrito de nueve mineras entre las cuales se encuentran Mina Candelaria, Mina Punta del Cobre, Mina Atacama Kozan, entre otras. En ese sentido, según el MOP (2005), la principal faena minera de la región de Atacama corresponde a Minera Candelaria, emplazado a un costado del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, cuya producción anual es de 210.000 toneladas de cobre en concentrados, la que es embarcada en el puerto mecanizado de Punta Padrones en Caldera mediante camiones que utilizan parte de la vialidad urbana de la comuna de Tierra Amarilla (se estima entre 50 y 60 camiones diarios). Además, el yacimiento a rajo abierto de Minera Candelaria es propiedad del consorcio estadounidense Phelps Dodge (80%) y la empresa japonesa Sumitomo (20%) y fue inaugurado en 1995 (MOP, 2005). Sus reservas de 363 millones de toneladas de mineral, con una ley de 1,1%, indican que Minera Candelaria puede operar más de 50 años al ritmo de producción actual. Otras mineras de pequeño y mediano tamaño que extraen concentrado de cobre, ubicadas en el área de la comuna de Tierra Amarilla, son las compañías mineras Atacama KOZAM, San Andrés, Ojos del Salado, San José, San Esteban y Santa Rosa. En relación a la fundición, tanto las compañías Punta del Cobre y Biocobre funden material en ENAMI, que se encuentra a 3 Km al Norte del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.

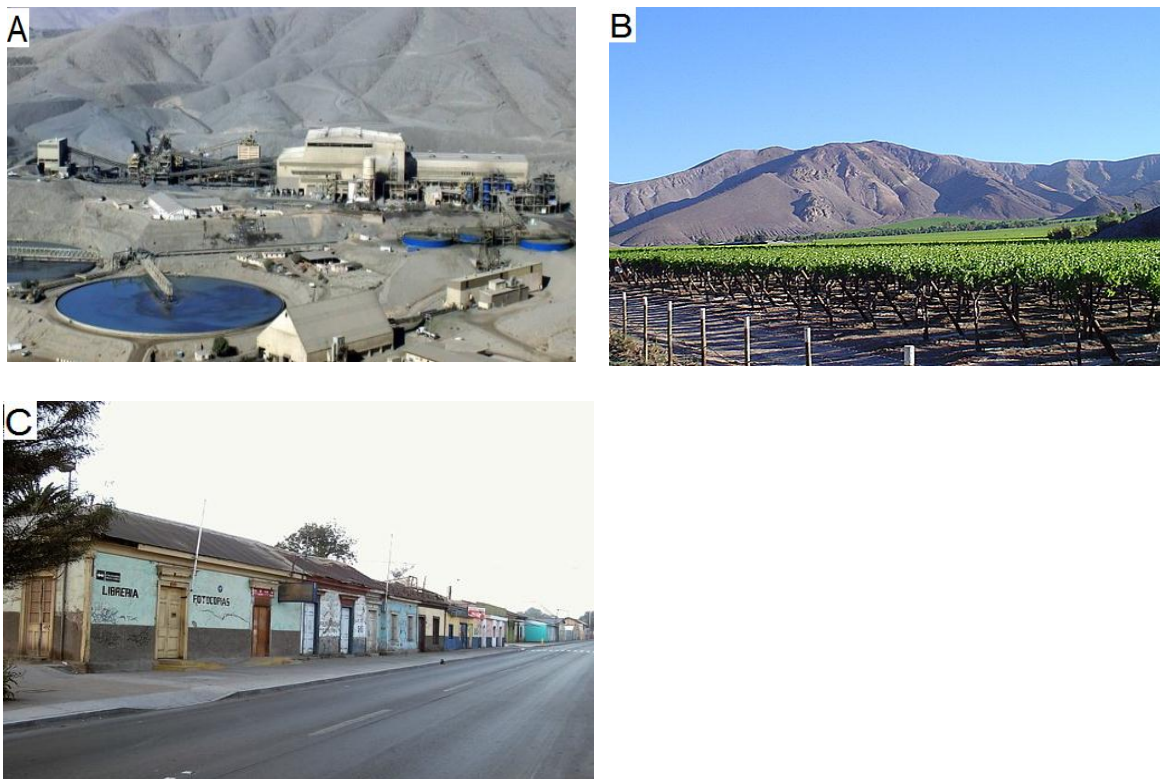
Simultáneamente a la minería, el valle de Copiapó exhibe a lo largo del tiempo una permanente actividad agrícola, la cual registra un auge relevante a partir de 1986 con la consolidación de empresas agroexportadoras de uva de mesa que introducen nuevas tecnologías, tales como el riego por goteo y el uso de nuevos fertilizantes y aditivos (ICR CONSULTORES LIMITADA, 1999). Aun cuando la superficie explotable para agricultura es muy limitada, confinada al estrecho valle, las características climáticas facilitan el

Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.

desarrollo de una producción de alta calidad y con una temprana maduración, con lo cual aumenta su valorización en el mercado. En este contexto destaca la comuna de Tierra Amarilla como la tercera comuna más productiva en el rubro frutícola a nivel nacional solo superada por las comunas de Curicó y Rengo en el valle Central de Chile (INE, 2007).

Los productores del valle exportan uva de mesa a los mercados de EE.UU y la Unión Europea, con cerca del 60% de la producción embarcada desde el puerto Amarcal de Caldera y el resto por el puerto de Coquimbo (GOBIERNO REGIONAL DE ATACAMA, 2004).

A medida que existen mayores facilidades de transporte interurbano, la ciudad de Copiapó y la comuna de Tierra Amarilla se interrelacionan progresivamente con Caldera y Bahía Inglesa y con el resto de atractivos, servicios y actividades localizadas en esta zona costera. Lo anterior se fundamenta principalmente en el auge turístico de la zona de Caldera y Bahía Inglesa a partir de la década de 1990 y en la creciente utilización del puerto de Caldera para embarque de productos provenientes del valle de la cuenca del río Copiapó. En ese sentido, la ciudad de Caldera actúa como parte de un sistema urbano integrado con el valle de Copiapó, fundamentado en que posee roles complementarios en cuanto a la proyección turística y portuaria del valle de la cuenca del río Copiapó (MOP, 2005).



**Figura 18.** Imágenes de la comuna de Tierra Amarilla (A) Faenas de Mina Candelaria (B) Cultivo de viñas (C) Vía C -35 que atraviesa el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.



## **Clima**

Es importante revisar el Clima del área de estudio debido a que por los periodos húmedos y secos inciden en las recargas de los acuíferos y sus niveles freáticos, además de ser el agua un factor muy importante en la disolución de la roca subterránea lo cual podría tener incidencia en las subsidencias. Estos procesos en relación a su génesis se explican en el Marco Teórico. Se describe a continuación el Clima de la región de Atacama y los niveles de precipitaciones para el área de estudio:

La Dirección General de Aguas (DGA) caracteriza a la región de Atacama en un clima semiárido y por la presencia de desiertos. Debido al aumento paulatino hacia el Sur de las precipitaciones invernales, desde Copiapó hasta el límite Norte regional, el clima es muy árido, similar al de la segunda región de Antofagasta. Al Sur de la ciudad de Copiapó, el clima se transforma en desierto marginal para dar paso paulatinamente al clima de estepa cálido (DGA, 2004). En ese sentido, el área de estudio se localiza en una zona de transición física que pasa de un paisaje extremadamente árido a un paisaje propio del Norte Chico de Chile. La DGA (2004) caracteriza al área de estudio en:

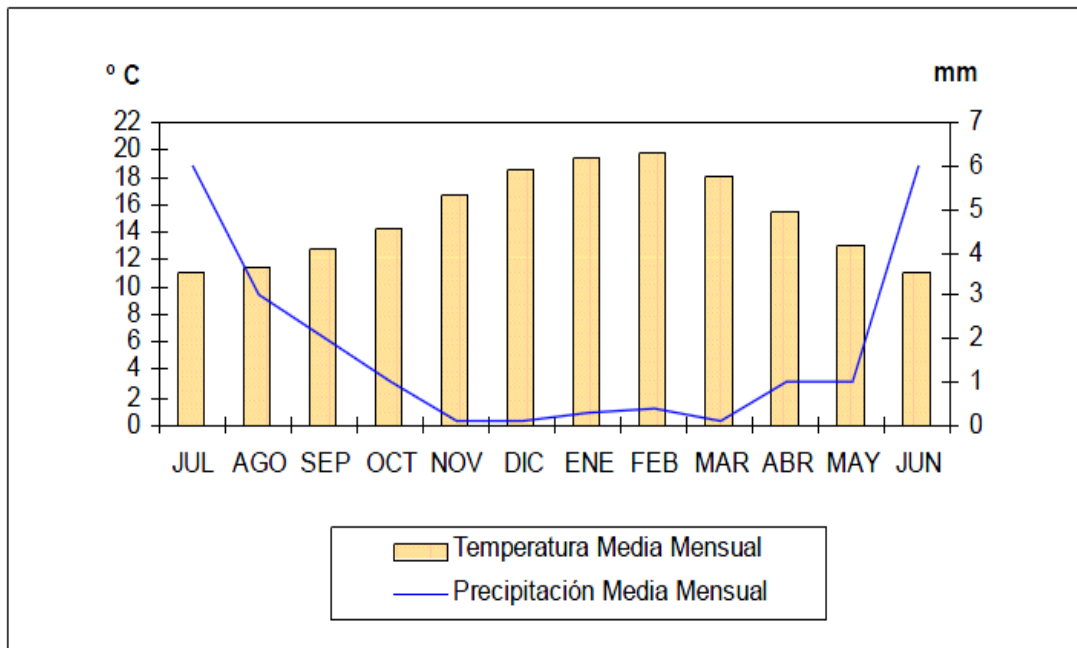
- Clima desértico de interior: se localiza en la franja intermedia de la cuenca del río Copiapó. Sus principales características son las elevadas temperaturas durante el día, ausencia de nubosidad y de precipitaciones. Este medio árido se debe al influjo de la inversión de la temperatura producida por la subsidencia de aire del Anticiclón del Pacífico.
- Clima desértico marginal de altura: se localiza en la zona Andina por sobre los 2.000 m de altitud. Las precipitaciones son más abundantes, sobre los 250 mm anuales, y en las cumbres más altas predominan las precipitaciones sólidas.

Además, en la región de Atacama las precipitaciones son escasas y se concentran principalmente en los meses de invierno donde la distribución de estas depende en gran medida de la altitud y distancia a la costa (JULIÁ *et al.*, 2008). La aridez de la zona se debe a la influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS) que bloquea la llegada de frentes climáticos a la zona, acentuándose por la presencia de la Cordillera de los Andes, la corriente fría de Humboldt y el efecto de sombra de lluvias que impide una mayor penetración de las lluvias convectivas provenientes del Amazonas a la región, disminuyendo la capacidad de evaporación de aguas del océano Pacífico a la atmosfera, todas éstas determinando la hiper – aridez del desierto de Atacama (FUENZALIDA 1965, GARREAUD *et al.*, 2003, HOUSTON & HARLEY 2003).

La temporalidad para las precipitaciones en la región de Atacama se encuentra en invierno en respuesta a la precipitación líquida a baja altura, mientras que el segundo evento de precipitaciones está relacionado con la nieve y/o deshielos glaciares en primavera y principio de verano (FAVIER *et al.*, 2009).

ID	Cuenca	Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm a <sup>-1</sup> )	Latitud	Longitud	Periodo
P1	Copiapó	Jorquera En La Guardia	1800	50	27° 45'S	69° 40'W	1971 - 2005
P2	Copiapó	Hacienda Manflas	1410	47	28° 07'S	69° 58'W	1971 - 2005
P3	Copiapó	Embalse Lautaro	1110	41	27° 59'S	70° 00'W	1971 - 2005
P4	Copiapó	Los Loros	940	37	27° 50'S	70° 07'W	1971 - 2005
P5	Copiapó	Copiapó	385	19	27° 21'S	70 ° 21'W	1971 - 2005

**Tabla 2.** Nivel de precipitaciones para el área de estudio (FAVIER *et al.*, 2009).



**Figura 19.** Diagrama Climático Ombrotérmico, sector Embalse Lautaro en río Copiapó a 5 Km del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla (DGA, 2004).

En la Figura 19, se identifican claramente las estaciones secas y húmedas. El período seco, se manifiesta en los meses de Agosto a Mayo con precipitaciones medias mensuales que varían entre 0,1 a 3 mm y temperaturas de 16,6 a 21,4 °C (Febrero). El período húmedo, se presenta únicamente en los meses de Junio y Julio con precipitaciones medias mensuales de 6 mm (en ambos meses) y temperaturas de 15 y 15,7 °C respectivamente.

## Geología

La intensa actividad sísmica del país por el contacto de interplacas (COMTE, 2002) puede activar fallas. En ese sentido, el área estudio presenta fallas según las Figuras 65 y 67. En relación a las subsidencias, la actividad sísmica puede ser un detonante de subsidencias si existen cavidades subterráneas no detectadas y además las fallas que sufren movimiento y luego acomodación causarían el vacío en el subsuelo con lo cual

subsistencias. Se profundiza en este tema en el Marco Teórico. En los siguientes párrafos se describe la geología de la región de Atacama.

La geología entre los 27° y 28° Latitud Sur se caracteriza por la presencia de franjas de afloramientos elongados en dirección predominantemente NNE- SSW, conformadas por rocas de edad Paleozoico superior (300 Ma) al reciente. Los elementos estructurales mayores, están caracterizados por Los Sistemas de Fallas Atacama y La Ternera (AGUIRRE, 1999).

La zona costera de la región de Atacama, está conformada por un batolito jurásico – cretácico que representa, probablemente, la raíces del arco magmático andino mesozoico, y que intruye a un basamento constituido por sedimentarias marinas y continentales levemente plegadas y metamorizadas junto a intrusivos Pérmicos (FARRAR *et al.*, 1979). La Falla de Atacama es una zona de discontinuidad estructural que, activa desde el Jurásico superior, atraviesa el batolito costero a lo largo de su eje (SCHEUBER & ADRIESSEN, 1990). Al este del batolito, en la zona central de la región de Atacama, aflora una gruesa cubierta de rocas volcánicas cretácicas y calizas neocomianas a las cuales se superponen, en discordancia, lavas e ignimbritas asociadas a intrusivos y calderas del Paleoceno – Eoceno (SEGERSTROM, 1968; MORTIMER, 1973, ZENTELLI, 1974; RIVERA y MPODOZIS, 1991 en AGUIRRE, 1999).

El área estudio se encuentra rodeada por siete ambientes geológicos (Figura 20). En primer lugar la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla se localiza sobre un ambiente sedimentario continental. Luego, en los alrededores inmediatos se encuentran ambientes volcanosedimentarios y domos volcánicos. La población Luis Uribe se encuentra localizada sobre el cono aluvial en un ambiente sedimentario perteneciente a la quebrada de Meléndez. Más alejado de la zona urbana, hacia E y O, se encuentran ambientes sedimentarios marinos con algunos invertebrados marinos encontrados en el área E, próximos a la quebrada de Meléndez. Cercanos a la cota 1000, a 1,5 km al O de la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla se localizan ambientes plutónicos y plutónicos hipabasal. Principalmente las rocas volcánicas se localizan en la Formación Punta de Cobre (SERGERSTROM, K., RUIZ, C., 1962) en color rojo y naranja en Figura 20. La Formación Punta del Cobre (JKpc), está constituida por lavas andesíticas a basálticas brechizadas; variedad de fangolitas y areniscas, junto a un complejo de domos y lavas de composición dacítica. Esta rocas se asocian a depósitos volcanogénicos del tipo sulfuro masivo (CAMUS, 1980) representados por minas Abundancia y Santos, entre otras. Presentan principalmente calcopirita, especularita y pirita (ARÉVALO, 1995). La Formación Abundancia (Kia) se localiza en un ambiente sedimentario en una zona de facies de transición derivados de escombros y sedimentación de carbonato (MARCHIK, R., FONTBOTÉ, L. 2001) en color gris al S de la quebrada de Meléndez en Figura 20. Está constituida por variedades de fangolita y grauwacas con intercalaciones de volcarenitas (ARÉVALO, 1994 y 1995)

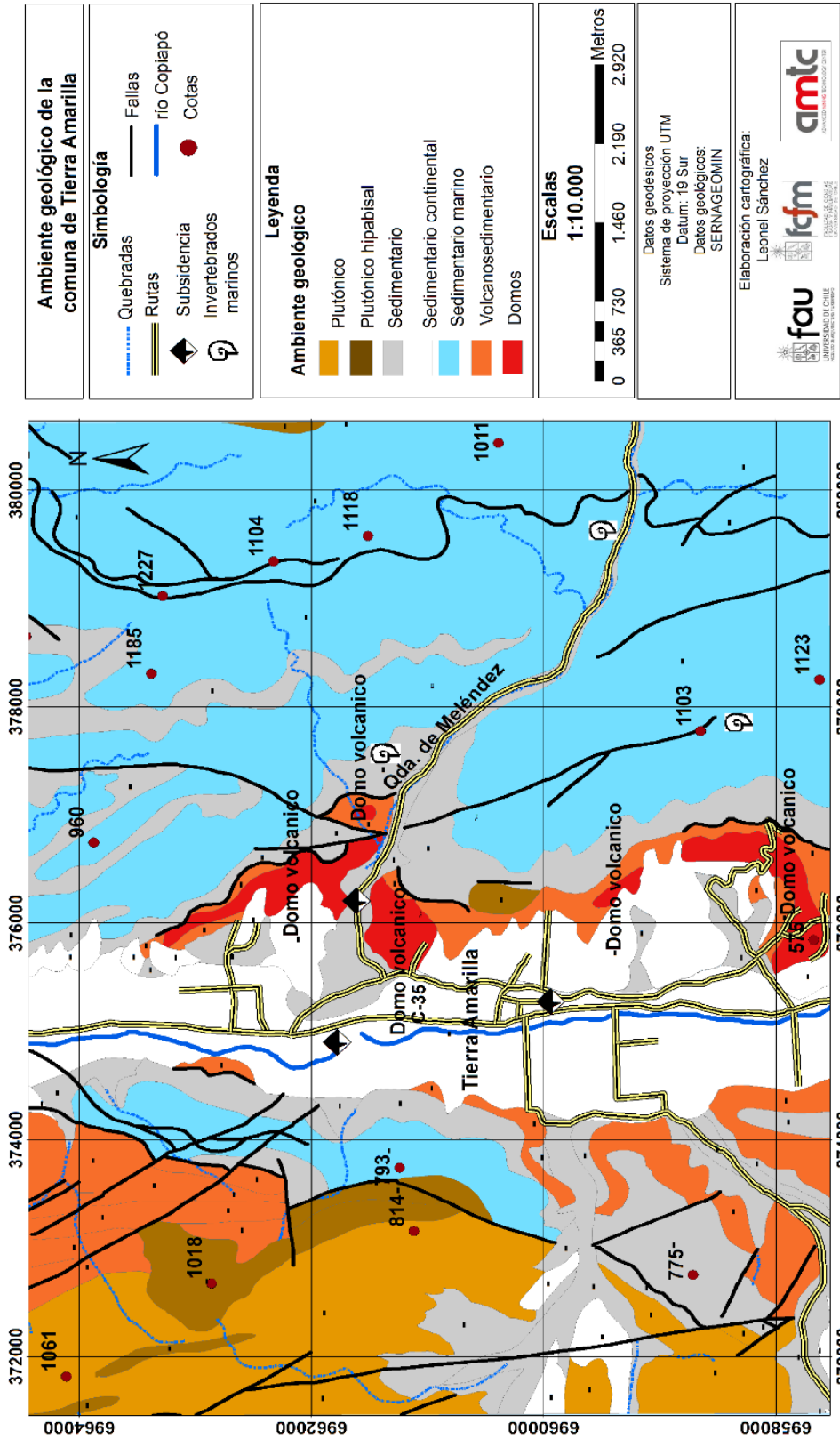


Figura 20. Mapa de ambiente geológico en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Fuente: SERNAGEOMIN.



El relleno sedimentario de esta cuenca, ocurrió esencialmente al comienzo del cretácico superior (112 – 84 Ma.) y está representado por la Formación Cerrillos, secuencia sedimentaria volcánica, que en el segmento Hornitos – Jotabeche, se constituye de areniscas, brechas, conglomerados y lavas andesíticas a basálticas (ARÉVALO, 1995). El cierre de esta cuenca se asocia a un importante evento de deformación compresiva, ocurrido en el Cretácico superior temprano. Este evento, es indicado por una serie de cabalgamientos (ARÉVALO & MPODOZIS, 1991 & ARÉVALO, 1994), los que en torno al sector de Jotabeche se reconocen a través de una delgada franja NS de calizas deformadas y brechas calcáreas asociadas al Cabalgamiento Cerrillos desarrollado (ARÉVALO, 1994 Y 1995). Este episodio coincide con el cierre de las cuencas detrás arco a lo largo del margen andino, relacionado con el cambio de régimen de subducción tipo “Marianas”, hacia un régimen de subducción tipo “Chileno” (UYEDA Y KANAMORI, 1979; UYEDA 1982), correlacionado con el inicio de la deriva hacia el Oeste de la Placa Sudamericana y la apertura del Atlántico Sur (DALZIEL, 1981; MPODOZIS y RAMOS, 1990). El área de estudio presenta varias fallas geológicas en las cercanías del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Existen fallas normales de bajo ángulos en la Formación Abundancia y más hacia el Este en el ambiente sedimentario marino existen fallas inversas observadas según la Figura 20.

#### ➤ **Depósitos no consolidados y semi – consolidados**

Según la Figura 21, el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se localiza sobre depósitos no consolidados y semi – consolidados correspondientes a depósitos fluviales en su mayoría gravas PIHf(a). La población Luis Uribe se localiza sobre depósitos aluviales activos en el cono aluvial de la quebrada de Meléndez y el material presente corresponde a ripios, gravas, arenas y limos (PIHa2). Al norte del cono aluvial de la quebrada de Meléndez existe un depósito aluvial inactivo (PIHa1). Los depósitos aluviales y coluviales antiguos se presentan al Oeste del área urbana y su material corresponde a ripios a gravillas, arenas, limos y arcillas (MsPliac). Las Gravas de Atacama corresponden a gravas polimícticas (Mga).

#### ➤ **Rocas**

En referencia a la Figura 21, la Formación Totoralillo (Kit) presenta calcilutitas y calcilutitas arenosas y fosilíferas. La Formación Pabellón (Kip) presenta fosilíferas, calcilutitas, calcarenitas, calciduritas con intercalaciones de fangolitas. La Formación Nantoco (Kin1a) presenta areniscas y conglomerados, mientras La Formación Nantoco miembro 2 (Kin2) presenta fosilíferas, calcilutitas y calcarenitas. Monzodiorita San Gregorio corresponde a la roca Kimdsg y presenta monzodioritas de hornblenda, biotita y piroxeno. La roca Kihd corresponde a intrusivos hipabisales dioríticos y porfíricos de clinopiroxeno y olivino (indiferenciado). La roca Kigrpc corresponde a Microgranitos y Aplitas del Portezuelo Cucharas. La roca Kidlb corresponde a dioritas de clinopiroxeno y hornblenda.

Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.

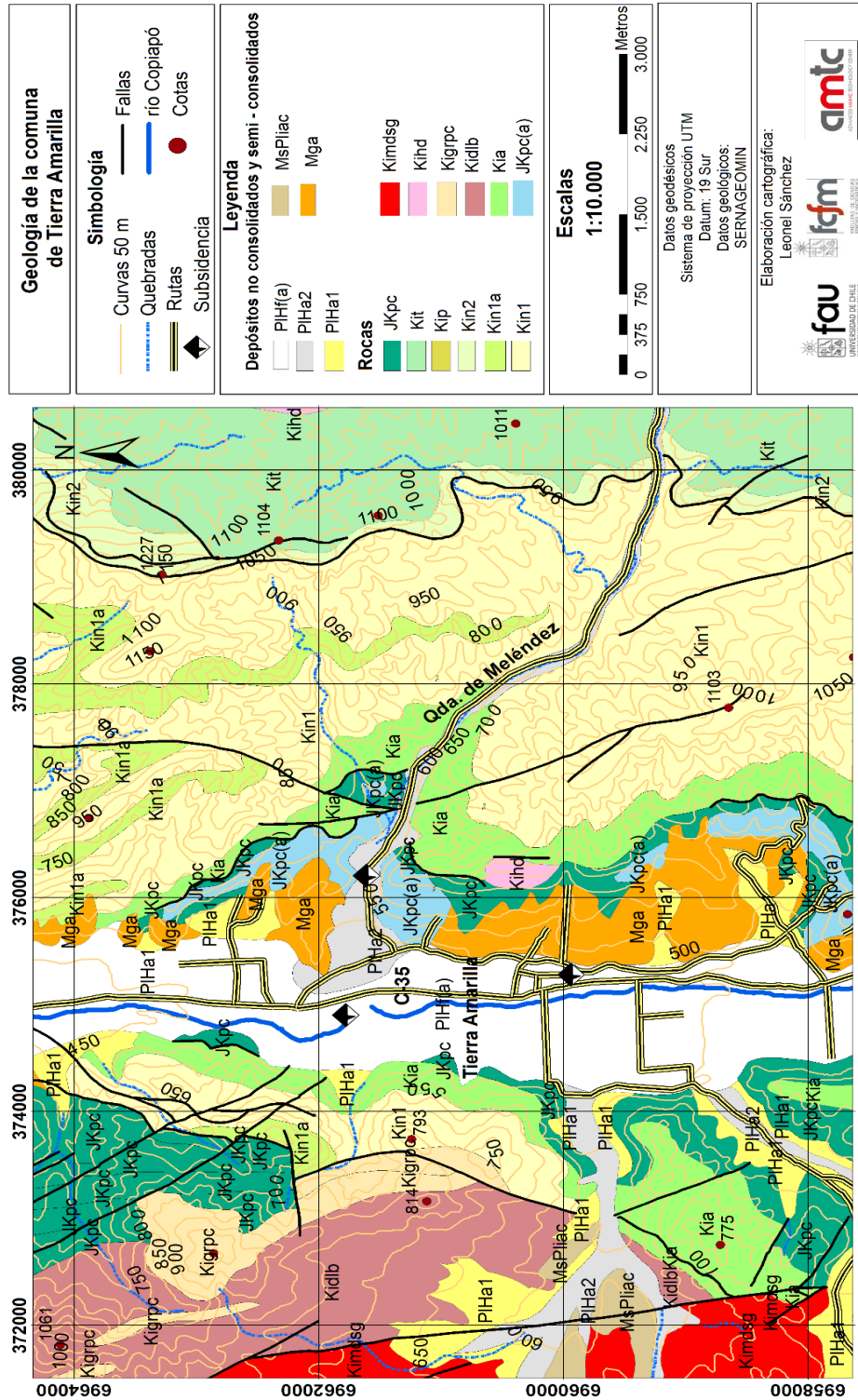


Figura 21. Mapa geológico del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Fuente: SERNAGEOMIN.

## **Hidrogeología**

Un tema importante de estudiar es lo relacionada con la hidrogeología, debido a la circulación del agua subterránea en los acuíferos de la cuenca del río Copiapó y su posible incidencia en las subsidencias a través de roca susceptible a disolución. En ese sentido, la siguiente descripción hidrogeológica corresponde a la Hidrogeología del Valle del río Copiapó en el trabajo de AGUIRRE (1999). Los depósitos no consolidados constituyen el relleno sedimentario del valle del río Copiapó. Están conformados por secuencias mayoritariamente permeables a semipermeables con porosidad intergranular. Desarrollan potentes, continuos y extensos niveles estratificados, multiacuíferos (libres a semiconfinados), radicados muy especialmente, en depósitos granulares modernos: ripios, gravas, gravas arenosas y arenas fluviales a fluvioaluviales (AGUIRRE, 1999). Porosidades y permeabilidades menores se registran en depósitos macizos de flujos de barro y/o detritos y en secuencias fluviales a fluvioaluviales antiguas. Concentran el mayor atractivo o potencial hidrogeológico, considerando que de acuerdo a sus características granulométricas y constante hidráulicas, estos depósitos cuaternarios están en condiciones de experimentar o favorecer la recarga, de transmitir y almacenar importantes volúmenes de agua subterránea, provista en general, de adecuada calidad fisicoquímica, con restringida alta vulnerabilidad a agentes contaminantes y efectiva capacidad de renovación (AGUIRRE, 1999).

El Basamento rocoso indiferenciado está conformado por las rocas que constituyen los flancos y el basamento rocoso del valle del río Copiapó. Estos materiales, prácticamente impermeables, con permeabilidad secundaria local vinculada a la alteración y/o fracturamiento superficial los cuales poseen baja a nula capacidad para almacenar y/o transmitir el agua subterránea.

En la cuenca del río Copiapó existen espesores que alcanzan 180 m según perforaciones de sondajes mecánicos, los que interpretados como resultado de determinaciones geofísicas, comprenden valores del orden de 100 a 200 m y en determinadas zonas pueden alcanzar hasta más de 250 – 300 m y en la de más de 300 m correspondería a eventuales “cubetas tectónicas” situadas en el valle del río Copiapó en torno a grandes zonas de falla o sectores relacionados con la presencia de acuíferos en roca (AGUIRRE, 1999). Según los niveles de descenso y los espesores de los acuíferos, las aguas subterráneas podrían alcanzar tiempos de residencia que posiblemente fluctúen entre 30 y 200 años. Tiempos de residencia predominantemente entre 80 y 160 años podrían presentar las aguas subterráneas aguas debajo de la cuenca. En los niveles más profundos de las “cubetas geológicas” y especialmente en la parte baja del valle, podrían llegar a ser incluso fósiles (mil o miles de años) (AGUIRRE, 1999). Las unidades geológicas con importancia hidrogeológica relativa alta a media corresponden a fluviales de cauces actuales, fluviales, fluvioaluviales, lacustres y fluvioalacustres, las cuales se ubican a lo largo y ancho del valle del río Copiapó y en la confluencia de éste con las quebradas que lo tributan.

## **1.4 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

- Ponderar los factores antropogénicos y naturales que podrían causar la subsidencia de terreno en la comuna de Tierra Amarilla.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Analizar las columnas estratigráficas del área de las subsidencias y describir el tipo de suelo presente en el área de estudio.
- Revisar la evolución del nivel del agua subterránea en relación a su balance hídrico y su uso en el área de estudio.
- Analizar la incidencia de sismos naturales y tronaduras de las faenas mineras en las subsidencias.
- Analizar las fallas geológicas existentes en el área de estudio y su incidencia en las subsidencias.
- Determinar la incidencia de las labores mineras subterráneas en las subsidencias de terreno.
- Revisión de métodos de detección de cavidades subterráneas y tasas de subsidencias.

## **CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

### **2.1 Metodología general aplicada a la problemática según etapas**

Se definen cinco grandes etapas en el proceso de este trabajo (Figura 22). En la Primera Etapa, se realiza una etapa de observación y estudio sobre la problemática de subsidencias que ha ocurrido en la comuna de Tierra Amarilla a través de un estudio bibliográfico que se basa principalmente en lecturas sobre antecedentes sobre subsidencias en el área de estudio, en Chile y en diferentes partes del mundo. Se recopiló informes técnicos de subsidencias que hayan sucedido en la comuna de Tierra Amarilla desde el Servicio Nacional de Geología y Minería. Para el Marco Teórico y la conceptualización se utilizó la biblioteca online de la Universidad de Chile a través del buscador integrado de revistas especializadas y tesis de la misma casa de estudios. La observación de la problemática de subsidencias se basó además en tres visitas a terreno y la aplicación de softwares en ambiente GIS para la creación de cartografías de localización de subsidencias y uso de suelo del área de estudio. La primera visita a terreno correspondió principalmente a entrevistas realizadas al encargado de Seguridad y Obras de la Municipalidad de Tierra Amarilla y al abogado de la Municipalidad de Tierra Amarilla además de visitar los puntos de subsidencia. Se visitó nuevamente los puntos de subsidencias en un segundo terreno realizado en abril del año 2015 post aluvión de marzo de ese año. El último terreno correspondió al realizado en febrero del 2016 en el cual se hicieron consultas a los habitantes de la casa afectada por subsidencias en donde se preguntó por posibles filtraciones en cañerías de la red hídrica que pudieran humedecer el suelo. Además, en este tercer terreno se visitó la Municipalidad de Tierra Amarilla para saber si existen nuevos antecedentes de subsidencias en la comuna.

En la Etapa 2, se hace el planteamiento de factores que podrían causar las subsidencias (Figura 23) a través de los antecedentes analizados la Primera Etapa según la Bibliografía del Marco Teórico, Terrenos y los antecedentes aportados en el Planteamiento del Problema. Luego de estas dos etapas se plantea el diseño de los objetivos de esta investigación y métodos aplicados para lograrlos que corresponde a la Etapa 3.

La Etapa 4 corresponde a los Resultados logrados en esta investigación a través de los Métodos y Pasos Metodológicos según los objetivos planteados. Además en esta etapa, se realiza el análisis de datos encontrados en el capítulo de Resultado, en donde se aplica el Modelo Jerárquico AHP para la ponderación y jerarquización de los factores estudiados que causarían las subsidencias (Figura 24).

Por último, en la Etapa 5 corresponde a la Discusión y Conclusión de esta Memoria. En la Discusión se hace una crítica a los Resultados y en la Conclusión se plantea posibles explicaciones a las subsidencias. Además, en esta última etapa se hacen algunas combinaciones de factores tal como lo propone CARBONEL (2013), en donde en la práctica según este autor, en las subsidencias de terreno operan distintos mecanismos (factores) de forma simultánea.

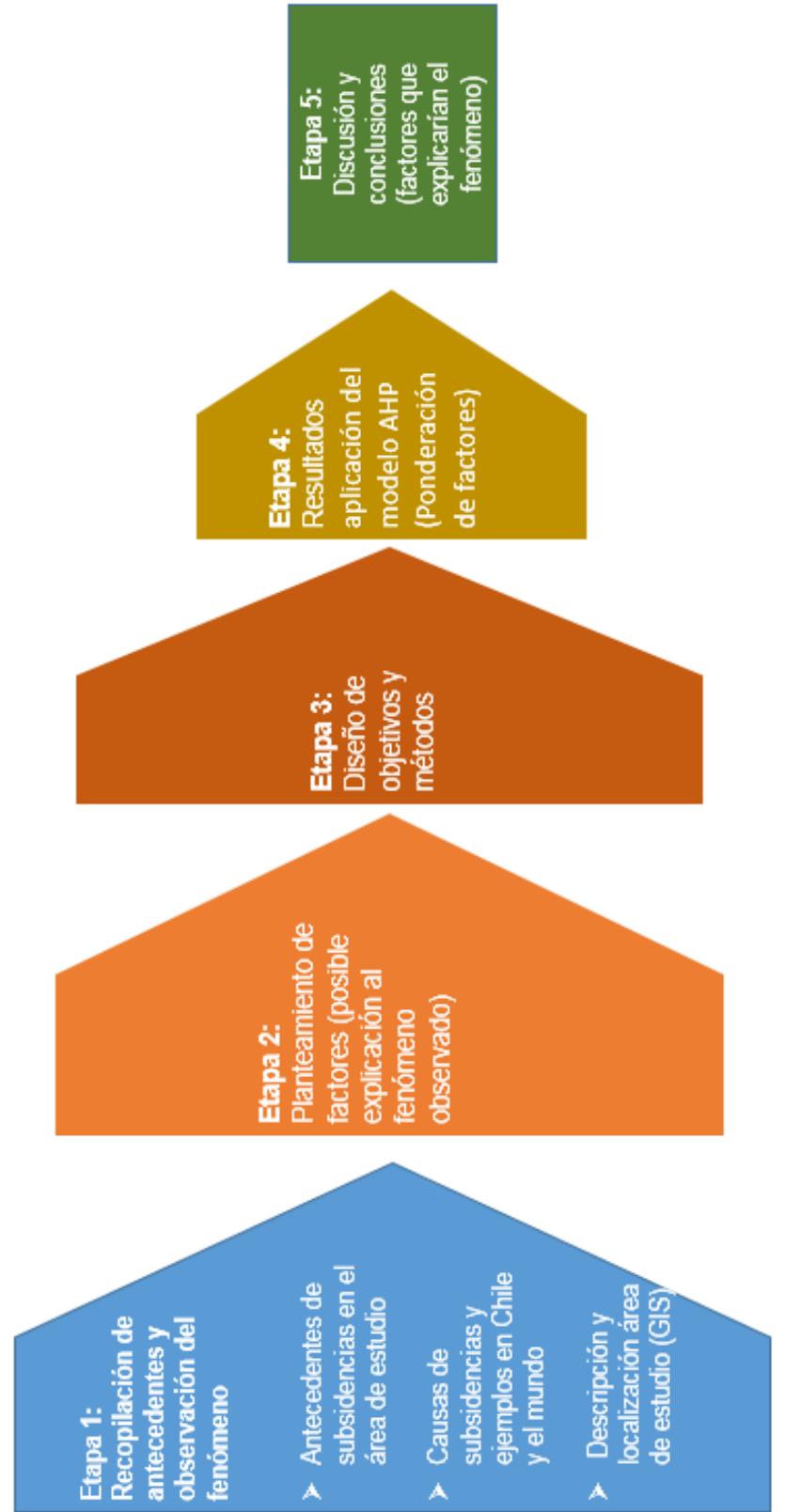
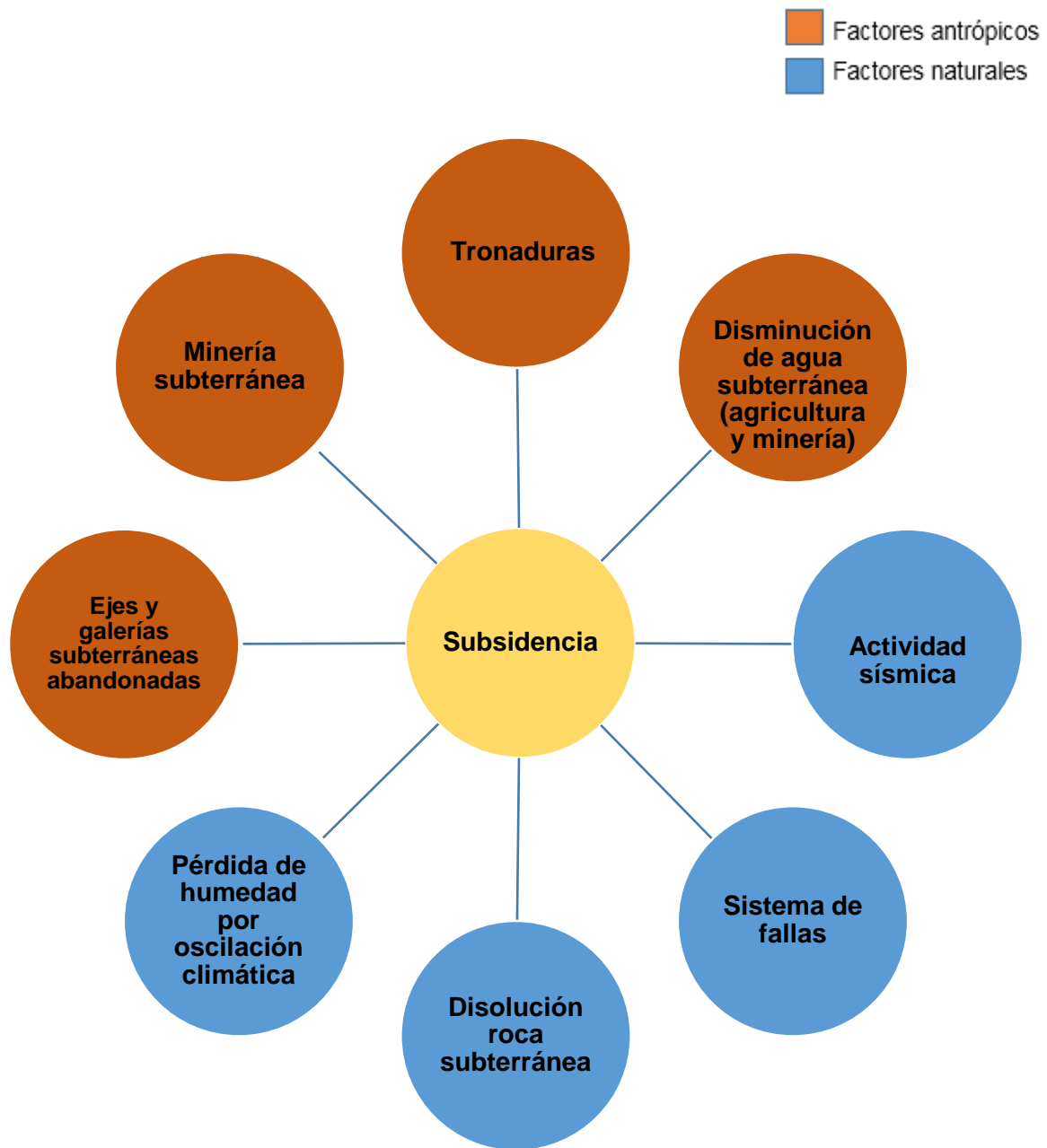


Figura 22. Pasos metodológicos generales según etapas.



**Figura 23** Diagrama para las variables ponderadas que incidirían en la problemática asociada a la subsidencia de terreno en la comuna de Tierra Amarilla.

### 2.1.2 Organización de la problemática de subsidencias en un modelo estructurado

Para obtener una ponderación numérica en relación a los factores que podrían estar incidiendo en las subsidencias se aplica un modelo estructurado mediante el Proceso Analítico Jerárquico (Analytical Hierarchy Process, AHP), que según SAATY *et al.*, (1991), es un procedimiento sistemático utilizado para representar jerárquicamente un problema

dividiéndolo en sus partes más pequeñas. Es una forma racional, eficiente y gráfica de organizar sistemas, expresando claramente el objetivo que se persigue, como también las variables y los criterios de decisión considerados.

Es así que una vez construido el modelo jerárquico a través del modelo AHP es necesario ponderar los elementos que lo componen, determinando la importancia relativa que cada uno posee sobre el valor total de la problemática. Esto se obtiene a través de la comparación de importancias entre pares de elementos del mismo nivel jerárquico. La priorización se reduce a la Matriz de Comparación por Pares de Elementos.

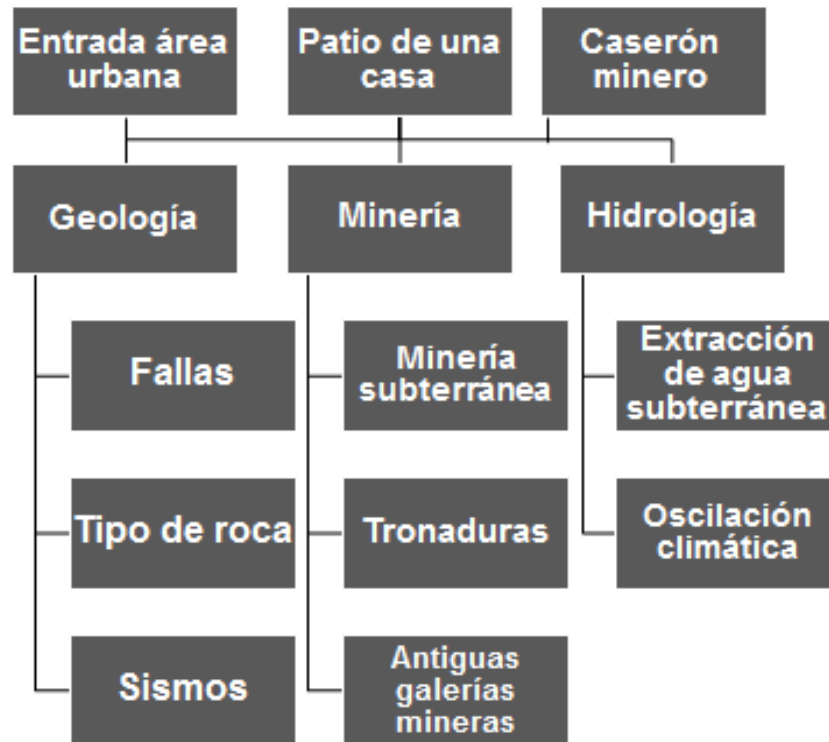
El peso es asignado según la Escala de Importancia Relativa de SAATY *et al.*, (1991), el cual emplea criterios cuantitativos y cualitativos, pues se atribuyen valores numéricos a los juicios subjetivos respecto a la importancia de cada elemento (Tabla 3).

Importancia Relativa (Escala Numérica)	Definición (escala verbal)	Explicación
1	Ambos Elementos tienen igual importancia.	Ambos elementos contribuyen igualmente sobre la problemática.
3	Moderada importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es ligeramente más importante sobre la problemática.
5	Fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es fuertemente más importante sobre la problemática.
7	Muy fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es muy fuertemente más importante sobre la problemática.
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es absolutamente más importante sobre la problemática.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Valores de consenso entre dos juicios.
Recíprocos (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8 y 1/9)	Si un elemento tiene un valor de la escala numérica (ejemplo: 3), el segundo elemento posee, entonces, un valor recíproco (es decir 1/3), cuando es comparado con el primero.	Un elemento es menos importante sobre la problemática. Ejemplo: Si el valor es de 1/3, un elemento es ligeramente menos importante sobre la problemática.

**Tabla 3.** Escala de importancia relativa (numérica y verbal) para el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) SAATY *et al.*, (1991).

Finalmente, los pesos fueron obtenidos con el apoyo del software Expert Choice, el cual se aplicó a cada punto de subsidencia por separado ya que lo probable es que cada factor detonante sea distinto en cada uno de estos puntos (Entrada Área Urbana, Patio de una Casa y Caserón Minero) en donde todos los factores se agruparon en tres grupos que envuelven a factores relacionados. Los factores componentes de cada grupo se observan en la Figura 24 según la metodología AHP.





**Figura 24.** Subdivisión de los criterios y sub-criterios para la ponderación de los factores en el modelo AHP.

## 2.2 Métodos y pasos metodológicos según objetivos específicos

### 2.2.1 Objetivo específico uno: Revisar la evolución del nivel del agua subterránea y su uso en el área de estudio

Las disminución del nivel subterráneo del agua en una cuenca se ha asociado con la subsidencia del terreno producto de la sobreexplotación de acuíferos (ZERMENO *et al.*, 2004). En ese sentido, la cuenca del río Copiapó se divide en seis sectores desde aguas arriba hacia la desembocadura en el mar según la DGA. El área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se ubica en el subsector 4 que corresponde desde Mal Paso hasta la ciudad de Copiapó. Para la realización de este primer objetivo se realizó:

- Un gráfico del Balance Hídrico del acuífero del sector 4 donde se compara las entradas y salidas desde el año 1993 al año 2010 en donde se ocuparon los datos de la DGA en VARGAS (2013).
- Un gráfico con la correlación entre el total de precipitaciones del año y el máximo de precipitaciones caídas en un día para la Estación Copiapó entre los años 1980 y 2015. Se ocuparon los datos de La Dirección Meteorológica de Chile y Dirección General de Aguas para la creación de este gráfico.

- Para observar el Potencial Hidrogeológico del área de estudio se revisó el Perfil Geoeléctrico de AGUIRRE (1999). El Potencial Hidrogeológico muestra las zonas con buen potencial como acuífero y las zonas con nulo o bajo potencial acompañado con el tipo de granulometría presente en el espesor de esta zona.
- Para mostrar el uso de los recursos hídricos en el área de estudio se ocupó el gráfico de VARGAS (2013), el cual muestra los usos de agua otorgados en porcentaje en relación a los sectores de minería, agricultura, residencial y otros.

### **2.2.2 Objetivo específico dos: Analizar la incidencia de sismos naturales y tronaduras de las faenas mineras en las subsidencias**

Según COMTE (2012) un terremoto es un evento natural que ocurre en el interior de la Tierra, en el cual se libera energía en forma de ondas sísmicas, lo que causa el movimiento que sentimos. Es así que el terremoto no es el movimiento, sino el evento que causa las ondas que sentimos. Existen distintos tipos de terremotos:

- Tectónicos
- Volcánicos
- Explosión

Estos tres tipos de sismos o terremotos dependen de la región donde ocurren y de la geología del lugar. Los sismos tectónicos son los más comunes y ocurren en sitios donde la corteza se rompe debido a las fuerzas provocadas por el movimiento de las placas. Los sismos volcánicos ocurren en conjunto con actividades volcánicas o previas a ellas. Los sismos de colapso son pequeños sismos que ocurren dentro de cavernas subterráneas y minas (tronaduras); y los sismos de explosión son causados por explosiones nucleares y/o químicas (COMTE, 2012).

En ese sentido, los sismos pueden ser detonadores de subsidencias si existen cavidades subterráneas no detectadas y al combinarse cavidades y sismos pueden generar más daño según OVANDO-SHELLEY (2013). Los sismos pueden provocar el fenómeno de licuefacción que puede ocasionar también el asentamiento de la superficie (HENRIQUEZ, 2007).

Para realizar este objetivo se hace una revisión a la zona norte de Chile en relación al comportamiento sísmico de la zona, la cual es influenciada por neotectonismo, representado por fallas activas reconocidas como el Sistema de Falla de Atacama (THOMAS, 1980).

En relación a sismos provocados por erupciones volcánicas, Chile entre los 27°S y 33°S no presenta volcanismo activo desde hace 10 millones de años (KAY *et al.*, 2005) debido a

que el bajo ángulo de subducción de la placa de Nazca (comparado con la zona al norte y sur de esta región), no permitiría que se den actualmente las condiciones adecuadas para la generación y/o ascenso de magma, necesarios para el desarrollo de volcanes (JARA, 2015). Para realizar este objetivo se revisan:

- Los sismos históricos sobre magnitud 7,0 en la ciudad de Copiapó (a 15 Km de la comuna de Tierra Amarilla) en el periodo comprendido entre los años 1796 a 1946
- A través de una cartografía de COMTE *et al.*, (2002) la distribución epicentral de los sismos entre los años 1964 y 1995 para localizar dónde ocurren los sismos durante este periodo y dar una visión general de los epicentros.
- A través de un gráfico, se revisa la magnitud máxima y promedio de los sismos para los años comprendidos entre 1973 y 2013
- Con entrevistas en terreno a los habitantes del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se verifica si se percibe o no las tronaduras mineras, ya que no se obtuvieron datos de estaciones sismológicas que captan este tipo de movimiento provocado por la industria minera.

### **2.2.3 Objetivo específico tres: Analizar las fallas geológicas existentes en el área de estudio y su incidencia en las subsidencias**

Los descensos de la superficie terrestre producidos por fallas geológicas producen un efecto conocido como subsidencia tectónica. Este tipo de subsidencia es, en general, muy lenta y de pequeña magnitud (de pocos mm o décimas de mm al año) frente a otros tipos de subsidencia (TOMAS *et al.*, 2009). En ese sentido, para lograr este tercer objetivo se realizó:

- Una revisión a las cartas geológicas actuales del SERNAGEOMIN e históricas para localizar las fallas más cercanas a las subsidencias
- Una cartografía en base al trabajo de SERGESTROM (1967) en la cual localiza una falla geológica rectilínea paralela bajo la cuenca del río Copiapó
- La incorporación de un perfil correspondiente al trabajo de MARSCHIK (2001), donde este autor localiza una falla que subyace a la cuenca del río Copiapó.

### **2.2.4 Objetivo específico cuatro: Analizar las columnas estratigráficas del área de las subsidencias y describir el tipo de suelo presente en el área de estudio**

En este objetivo se investiga la incidencia del tipo roca, la profundidad del basamento, y el tipo de relleno y su espesor, todo esto en relación a las subsidencias. La importancia de saber la profundidad del basamento rocoso radica en la hipótesis de que podrían existir

labores mineras a ese nivel y por lo tanto las subsidencias estarían asociadas a esta actividad. Además, es importante revisar el tipo de roca, ya que existen rocas susceptibles a disolución, como el yeso y la caliza, producto del agua circundante en el subsuelo. El tipo de granulometría presente en el relleno sedimentario del área de estudio es importante tenerlo claro porque los acuíferos se encuentran en esta zona del subsuelo. En ese sentido, en relación a al tipo de granulometría, se aportan antecedentes sobre la hipótesis de subsidencias en relación a la disminución de niveles subterráneos de agua. Además, cabe destacar la posibilidad de que existan fracturas en el basamento en donde podría circular el agua también. Para lograr este objetivo se integran en los resultados:

- Un perfil del área de estudio que muestra las cotas de superficie y del basamento en relación a la altura sobre el nivel del mar según la DGA (2003), con esta información se puede medir el espesor del relleno sedimentario del área de estudio.
- Los perfiles de sondaje mecánico realizado por AGUIRRE (1999) para las subsidencias localizadas a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y para la subsidencia producida en el patio de una casa. Con estos perfiles se observa la medida de los componentes del espesor, mostrando a cuántos metros o centímetros de profundidad existe la presencia de bolones, ripios, gravas, arenas, limos y/o arcillas (granulometría). Con esta información se aprecia el componente sedimentario que rodea al acuífero del área de estudio. Además, con cada perfil de sondaje mecánico, se ve la medida de profundidad del basamento.
- Las columnas estratigráficas del trabajo realizado por MARSCHIK (2001). Una columna se localiza en la quebrada de Meléndez muy cerca de la subsidencia del caserón minero. La otra columna estratigráfica presentada es la localizada en el área urbana, la cual se encuentra muy cercana a la subsidencia del patio de una casa. Con estas columnas estratigráficas se puede verificar el tipo de roca presente en estas dos subsidencias y su posible incidencia en la disolución de ella. En el trabajo de MARSCHIK (2001) no existen columnas estratigráficas localizadas a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla cercanas a las subsidencias.
- Para determinar el tipo de suelo se hizo una revisión del Estudio Agrológico de la cuenca del río Copiapó proporcionada por el Ministerio de Agricultura a través del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Con esta información se observa la capa más superficial del terreno y así su posible salinidad, en donde el factor salinidad podría afectar esta parte por su posible disolución y su posterior asentamiento del terreno.

### **2.2.5 Objetivo específico cinco: Recopilación y análisis de información de incidencias de las labores mineras subterráneas en las subsidencias de terreno**

En los trabajos de BAUER (1993) y HAUSER (1988) describen hundimientos de terreno en Estados Unidos y Chile respectivamente, los cuales se han creado producto de

faenas mineras subterráneas. La industria minera en la comuna de Tierra Amarilla es intensa, posee 262 labores según el SERNAGEOMÍN (2011) y el área urbana se encuentra rodeada por mineras subterráneas y de rajo abierto. Para la realización de este objetivo se efectúa la confección de:

- Una cartografía en donde se localizan las faenas mineras que se encuentran activas en las cercanías de las subsidencias y en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Esta cartografía se elaboró gracias a documentación entregada por parte de la Municipalidad de Tierra Amarilla en donde se localiza la distribución espacial del distrito minero de la comuna.
- Una cartografía en donde se sitúa a los titulares de las Concesiones de Exploración en el área de las subsidencias. Esta cartografía se elaboró con información de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE). Los datos de localización de concesiones de exploración fue a través de los registros del SERNAGEOMIN.
- Una cartografía en donde se observa la localización de Concesiones Mineras de Explotación (pertenencia) y las Subsistencia. Esta cartografía se elaboró, al igual que la cartografía de los Titulares de Concesiones de Exploración, con información de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE) y los datos de localización de concesiones de exploración fue a través de los registros del SERNAGEOMIN.

Con la distribución espacial de las mineras cercanas a las subsidencias se posee información para determinar qué minera actualmente podría estar incidiendo en los hundimientos de terreno en la comuna de Tierra Amarilla.

### **2.2.6 Objetivo específico seis: Revisión de métodos de detección de cavidades subterráneas y tasas de subsidencias**

Para llegar a tener una certeza de dónde podrían existir cavidades subterráneas no detectadas y además de visualizar áreas de hundimientos en la superficie, se describen en el capítulo de Resultados dos métodos de detección de cavidades y uno en relación a deformaciones de la superficie terrestre respectivamente. Los métodos de detección de cavidades son:

- Radar de Penetración Terrestre (GPR)
- Tomografía Resistividad Eléctrica

Para el análisis geoespacial de subsidencias o deformación de la superficie en un área determinada se describe el siguiente método:

- Análisis de tasas de subsidencias a través de imágenes satelitales con la aplicación de la técnica de Radar de Apertura Sintética Interferométrica (InSAR).



### **CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

En este capítulo se realiza en primer lugar un estudio del concepto de subsidencia a través de distintos autores, donde luego de la revisión de este concepto, se estudia el proceso desde la génesis natural y antrópica, con ejemplos del mundo, en Chile y específicamente en la comuna de Tierra Amarilla. En la parte final de este capítulo, se incorpora el Marco Regulatorio en relación al uso del subsuelo por parte del Estado de Chile y Particulares.

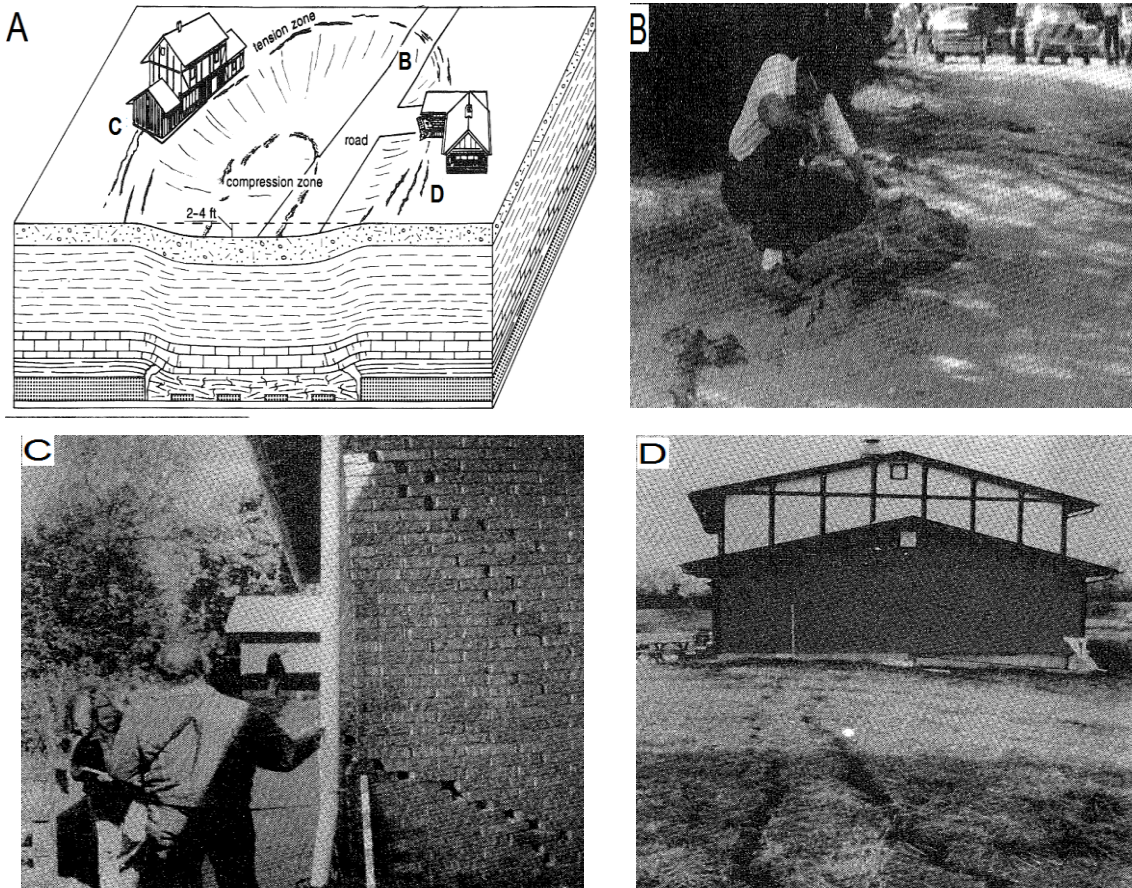
#### **3.1. Subsistencia**

La subsidencia de terreno es un fenómeno geológico que es considerado un riesgo natural (HAUSER, 2008). El colapso de la superficie terrestre pueden ser también inducidos a través de causas antrópicas (LANGER, 2001). Es así que la Enciclopedia Británica precisa que la subsidencia es “el hundimiento de la superficie de la Tierra en respuesta a causas geológicas o inducidas por el hombre”. El Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua declara que subsidencia es “el hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras”. GALVE (2009) afirma después de la revisión de los siguientes autores: CARAMANNA, CIOTOLI, Y NISIO (2008); COKER, MARSHALL, Y THOMSON (1969); LAMOREAUX & NEWTON (1986) y NEWTON, COPELAND & SCARBROUGH (1973), que el término genérico de subsidencia hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre continental o submarina, y en donde se corrobora también a través de estos autores, que la creación vertical de cavidades tanto naturales como antropogénicos son capaces de causar un colapso repentino de la superficie terrestre

El glosario de Geología publicado por el American Geological Institute (PROKOPOVICH, 1979) describe al fenómeno de subsidencia como un movimiento de masa local que implica principalmente el asentamiento o hundimiento gradualmente descendente de la superficie sólida de la Tierra, con pequeña o inexistente componente horizontal y que no ocurre a lo largo de una superficie libre. El movimiento no es restringido en velocidad, magnitud, o área implicada. Además también afirma que la subsidencia de terreno puede deberse a procesos geológicos naturales o actividades del hombre, tales como el traslado de sólidos, líquidos o gases bajo la superficie y el humedecimiento de algunos tipos de depósitos porosos o sueltos poco húmedos. Finalmente, subsidencia según este Institute es el hundimiento de una gran parte de la corteza terrestre debido a movimientos tectónicos.

POLAND *et al.*, (1972) definieron la subsidencia como el hundimiento o asentamiento de la superficie terrestre, que pueden ser debidos a alguno de varios procesos. El término, como es usado normalmente, se refiere a los movimientos verticales descendentes de las superficies naturales, aunque pueden presentarse componentes horizontales de pequeña escala. No se incluye a los desprendimientos de tierra, que conllevan desplazamientos horizontales de gran magnitud, ni a los asentamientos de rellenos artificiales.

La subsidencia terrestre, en la cual se centra este trabajo, es un proceso que implica el asentamiento de la superficie terrestre posiblemente debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas tal como lo señala CORAPCIOGLU (1984). En ese sentido, según PACHECO (2007), el fenómeno de subsidencia en general tiene lugar debido a la extracción de sólidos (minerales) o fluidos (gas, petróleo, vapor y agua) del subsuelo, que se manifiesta en hundimientos paulatinos o súbitos de la superficie y en la generación de agrietamientos en la masa del relleno granular.



**Figura 25.** Bloque diagrama y fotos de un típico evento de subsidencia (A) Camino con compresión y asfalto afectado. (B) Casa de madera en la zona de tensión con línea de hundimiento en el suelo (C) Casa de ladrillo en la zona de tensión. Las paredes, los techos y los pisos presentan grietas (BAUER, 1993).

En el caso de la zonas afectas en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, la geometría que presentas las subsidencias de tipo cerradas simples circulares o elípticas que en la literatura tienen el nombre de dolinas, y en general estas formas del relieve (dolinas) se relacionan a hundimientos producidos en roca caliza producto de su disolución química y física con el contacto del agua (FRELIH, 2003; FORD & WILLIAMS, 2007). En cuanto al mecanismo que conduce a la generación y propagación de grietas, en la literatura se reportan varios modelos conceptuales para tratar de explicarlo, sin embargo debido a la complejidad del problema en la actualidad según PACHECO (2007), no existe la

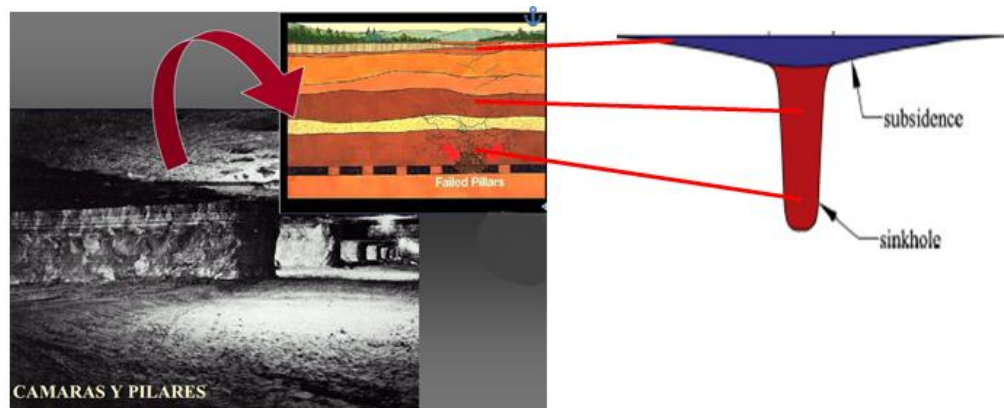
metodología con la cual sea posible predecir con la exactitud requerida para aplicaciones prácticas, el lugar donde va a aparecer una grieta y hacia donde se propagará. Consecuentemente esta es la línea principal de investigación en subsidencia caracterizándose por la existencia de un desacuerdo entre los diferentes grupos que trabajan el tema, sobre cuales variables juegan un papel primordial en el fenómeno y cuales variables pueden ser omitidas en los modelos por su poca influencia en el desarrollo de las grietas (PACHECO, 2007). En ese sentido, en esta investigación al no tener una certeza de qué factor o factores produciría las subsidencias, no se adoptará ninguna definición de los autores mencionados anteriormente, solo siendo estas definiciones como antecedentes de la investigación.

### 3.1.1 Causas Antropogénicas de Subsistencia

A continuación se revisan las causas antropogénicas y naturales que se asocian a subsidencias:

#### 3.1.1.1 Faenas Mineras

La subsidencia en faenas mineras o por construcción de obras subterráneas consiste en el hundimiento de la superficie del terreno con motivo de la deformación y/o colapso de galerías generadas para la extracción de minerales o la construcción de túneles respectivamente (TOMÁS *et al.*, 2009). En ese sentido, sucede que en ocasiones las mineras cesan bruscamente sus faenas quedando los ejes y las galerías subterráneas las cuales se rellenan y luego quedan abandonadas, pero posiblemente dejando cavidades (HAUSER, 1988). Cuando la sobrecarga en la superficie es suficiente, se producen deslizamientos horizontales y verticales del terreno, y por consiguiente la deformación y daños en los edificios que se encuentran en áreas urbanas producto del socavamiento del suelo (Figura 26).



**Figura 26.** Cámara y pilares de faena minera subterránea. Se denota en esta figura la falla de un pilar y la correspondiente subsidencia en la superficie (CARVAJAL, 2008). En la derecha de la Figura

26 se denota un dibujo esquemático de hundimiento del suelo (morado) y sumidero (rojo). Adaptado de CHANG (2014).

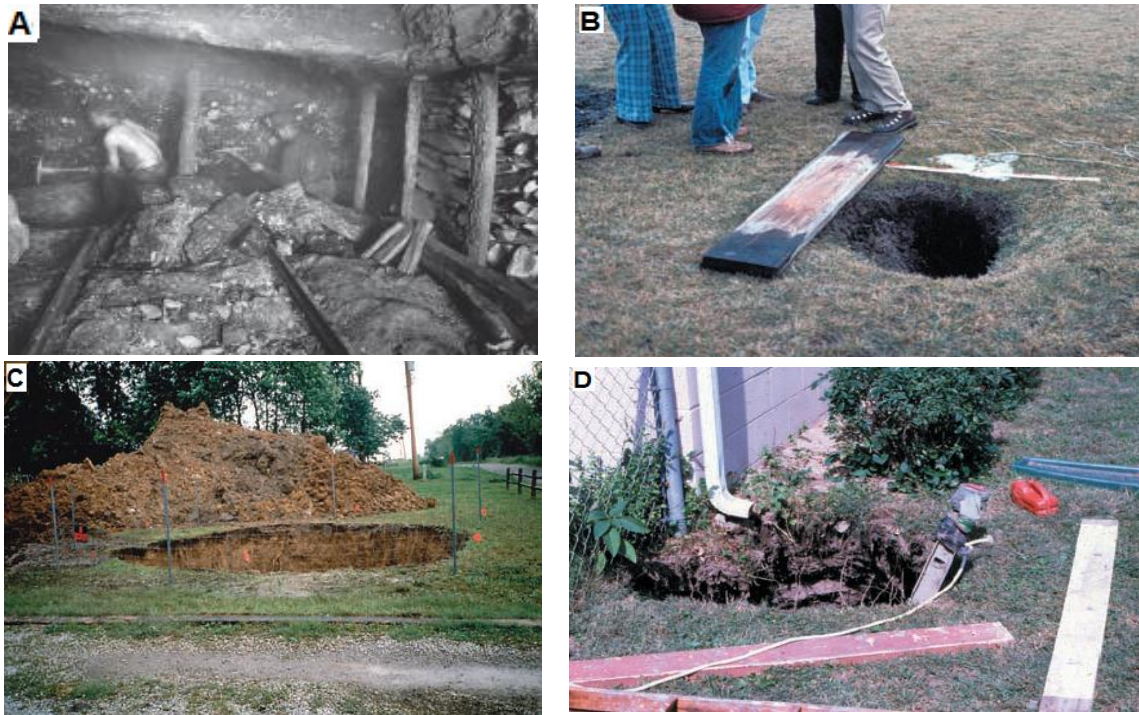
Su exacta localización, en términos de delimitar la extensión de eventuales suelos o terrenos comprometidos y cuantificar la magnitud y volumen del proceso, revisten particular trascendencia; tanto más, cuando que en torno a la ciudad de Copiapó, se ha desarrollado, históricamente, una intensa y permanente actividad minera, conexas a explotaciones de oro, cobre, plata y fierro. Un porcentaje muy importante de ellos, comprometen laboreos o faenas subterráneas que han derivado en la creación de numerosas cavernas en situación de colapsar tanto por el progresivo y natural deterioro geomecánico del material de sobrecarga, como por actividades antrópicas: modificaciones en la situación del nivel de agua subterránea, producción de vibraciones (tronaduras); y alteraciones en las sollicitaciones superficiales vinculadas a la instalación de obras civiles: caminos, edificaciones, etc. (HAUSER, 2008). Procedimientos racionales destinados a controlar los efectos de este tipo de procesos, apuntan hacia la exacta localización de todos los laboreos mineros subterráneos, tanto activos como abandonados existentes en torno a la zona de interés.

Los procesos de hundimiento y/o subsistencia de cavidades mineras, en virtud de la magnitud de las acciones desencadenantes, pueden desarrollarse tanto bajo la forma de repentino colapso, sin manifestar ningún signo físico que permita anticipar su ocurrencia, como con el desarrollo de claros rasgos primarios; estos, normalmente, incluyen deformaciones perceptibles del terreno, acompañadas de grietas con o sin desplazamiento vertical. Detectados algunos signos físicos, estos favorecerían la adopción de oportunas medidas de corrección y control sin excluir la evacuación y relocalización de personas y obras civiles (HAUSER, 2008).

➤ **Casos de subsistencia producto de la minería en Estados Unidos:**

En Estados Unidos se desarrollaron las minas subterráneas en la ciudad de Illinois poco después de la llegada de los primeros colonos. Ellos extrajeron carbón, plomo, zinc, fluorita, arcilloso, y piedra caliza. Durante los primeros años, la tierra fue escasamente poblada. Los pueblos y ciudades se fueron ampliando en áreas y el hundimiento se convirtió en un problema grave (BAUER, 1993). En ese sentido, cerca de 72.036 hectáreas de suelo residencial en Illinois se encuentran cerca de minas subterráneas y pueden ser susceptibles a hundimientos (BAUER, 2006). El número de minas subterráneas de carbón en Illinois se ha estimado en 5.500. Existen solamente 2.600 mapas de las 5.500 minas. En 1991, se estima que alrededor de 320.000 viviendas en el estado se construyeron sobre o adyacentes a minas subterráneas (BAUER, 2006).





**Figura 27.** A: Fotografía minería subterránea. Estas minas operaron desde la década de 1870 a 1951 en quince condados de los Estados Unidos. B, C y D: Típicos eventos de subsidencia asociados a minería según BAUER (2006).

En el estado de Illinois, los daños a la propiedad fueron suficientes para la creación de una severa ley estatal, la Ley de Seguros de Hundimiento de Minas, la cual fue aprobada en 1979 para proporcionar el seguro de subsidencia para propietarios de viviendas en zonas mineras (BAUER, 1993).

➤ **Otros casos de subsidencia en el mundo producto de la minería**

Minería de extracción de carbón, plomo, zinc, oro y depósitos de mineral de hierro en las zonas kársticas ha estado estrechamente asociado con subsidencias en China. El colapso de la superficie provocado por un aumento en el drenaje de agua en la mina y la posibilidad de entrada de agua desde acuíferos kársticos amenazan el medio ambiente de las zonas mineras y en ese sentido, una combinación de factores incluyendo el peso del suelo, el proceso de difusión y de succión de vacío puede contribuir a la formación de subsidencias (GONGYU *et al.*, 1999). Las medidas clave para prevenir hundimientos en las zonas mineras son controlar la cantidad de drenaje en las minas, reducir fluctuación del nivel del agua, sellar conductos kársticos y cavidades del subsuelo en el suelo que recubre, impedir la entrada de agua, y por último aumentar la presión de aire en los conductos de Karst (GONGYU *et al.*, 1999).



Otros casos de subsidencia producto de faenas mineras subterráneas es la provincia de Lorraine en Francia, una región con más de 140 km<sup>2</sup> de áreas con minas subterráneas abandonadas las cuales son susceptibles a colapsos en la superficie (SAEIDI *et al.*, 2013).

En Sudáfrica los ejemplos de subsidencias han ocurrido en faenas correspondientes a la minería de oro en la zona de Johannesburgo, en la minería de carbón que se localiza en la cuenca carbonífera Witbank, la minería de rajo abierto de carbón en la cuenca del Ruhr, la minería de tiza y piedra caliza en Suffolk y la minería de solución de sal en Cheshire. Estos depósitos minerales han sido a menudo trabajados durante más de 100 años, y por lo tanto un problema importante resulta de estas minas abandonadas especialmente aquellos a poca profundidad, la presencia de túneles de los cuales no existe registro (BELL *et al.*, 2000).

#### ➤ **Subsidencia en Mina Santos, comuna de Tierra Amarilla, Chile 1993**

Según el informe técnico realizado por HAUSER (1993), el hundimiento en Mina Santos cercana al área urbana de la comuna de Tierra Amarilla sucedió el día sábado 6 de marzo del año 1993, donde se produjo un proceso de subsidencia en terrenos de la compañía minera “Ojos del Salado”, en conexión directa con laboreos mineros subterráneos. El proceso se desarrolló en forma abrupta, con gran estruendo o ruido subterráneo, situación que creó gran alarma y confusión en la población (HAUSER, 1993).

El hundimiento generó una cavidad cilíndrica de 30 – 32 m de diámetro y 18 m de profundidad, totalizando un volumen de aproximadamente 14.000 m<sup>3</sup>. La sección expuesta en las paredes de la cavidad comprometió:

- Una secuencia alternada de 6 m superiores de escombros o relleno artificial, con ripios y gravas, compactos, por tanto bien cementadas, porosidad media y permeabilidad baja
- 6 m basales de ripios y gravas con matriz arenosa y niveles lenticulares areno – limosos
- Un conjunto de material con baja compacidad, suelto, alta porosidad y alta a muy alta permeabilidad.

Las causas que habrían incidido para provocar el cráter de hundimiento en Mina Santos en el año 1993 serían según HAUSER (1993):

- De tipo antrópico (actividad minera)
- Factores estructurales o tectónicos (fracturamiento de los niveles superficiales del basamento rocoso)

- Factor hidrogeológico (presencia de abundante agua almacenada en acuíferos fluvio – aluviales, sobreyacentes a los caserones)
- Factor geomecánicos (baja capacidad de autosoporte de la secuencia sedimentaria y niveles superiores alterados – fracturados del basamento rocoso con presión litostática).

Tras producirse el hundimiento, el fondo de la cavidad creada se observó seco. Transcurrido un tiempo no determinado en el informe de HAUSER (1993), la estructura comenzó a llenarse con agua y al cabo de un día, el nivel de agua en el fondo se estabilizó en los 18 m de profundidad.

El agua se originó en la descarga o drenaje gravitacional desde los acuíferos libres y/o semiconfinados radicados en la secuencia fluvio – aluvial. La descarga en referencia provocó un “golpe de agua” en los niveles de carguío y explotación, forzando bombeos hacia el exterior de hasta 110 l/s para rehabilitar el acceso y operaciones de la mina.

En los niveles de explotación y carguío en torno al frente o término NW de los avances, el hundimiento, junto con condicionar un severo ingreso de agua, provocó la invasión y contaminación del material rocoso mineralizado ya tronado, con ripio, grava y arena, provenientes de los niveles fluvio - aluviales removidos.

La explotación del yacimiento tuvo que ser paralizada por algunos días, a objeto de disponer de labores de rehabilitación basado en la limpieza y preparación de vías de acceso y extracción, bombeo para agotar excesos de agua, reacondicionar ductos de energía y ventilación. En aquella ocasión el hundimiento no produjo ningún tipo de daño o lesiones al personal activo en la mina y sin información para las personas que residían en las cercanías, pero lo más probable es que las personas que vivían cerca sintieran una gran alarma debido al fuerte estruendo o ruido subterráneo producido al momento del colapso de la mina.

El techo rocoso en torno al cuerpo mineralizado bajo los depósitos fluvio - aluviales presentaban fuerte fracturamiento y alteración por corresponder a una antigua superficie de erosión las cuales corresponden al Mioceno Superior – Plioceno que en esencia son secuencias sedimentarias clásticas de piedemont según el SERNAGEOMIN (2003). En ese sentido, la secuencia aluvial, en virtud de su efectiva porosidad albergaba importantes volúmenes de agua. Se anticipó meses antes que la clave de importantes segmentos de los caserones, podrían experimentar gradual sobreexcavación en torno a los pilares según el informe de HAUSER (1993), además este autor menciona que sobrepasados determinados niveles, podrían esperarse colapsos mayores reflejados en el desarrollo de procesos de hundimiento. De hecho, el primero ocurrió sobre el caserón North Stope, al N del pilar María José. En mérito a consideraciones de minimizar riesgos laborales, dicha cavidad fue convenientemente rellenada con material estéril según HAUSER (1993).

## **Subsistencia en ex yacimiento de cobre “La Africana” en la Comuna de Pudahuel, Región Metropolitana**

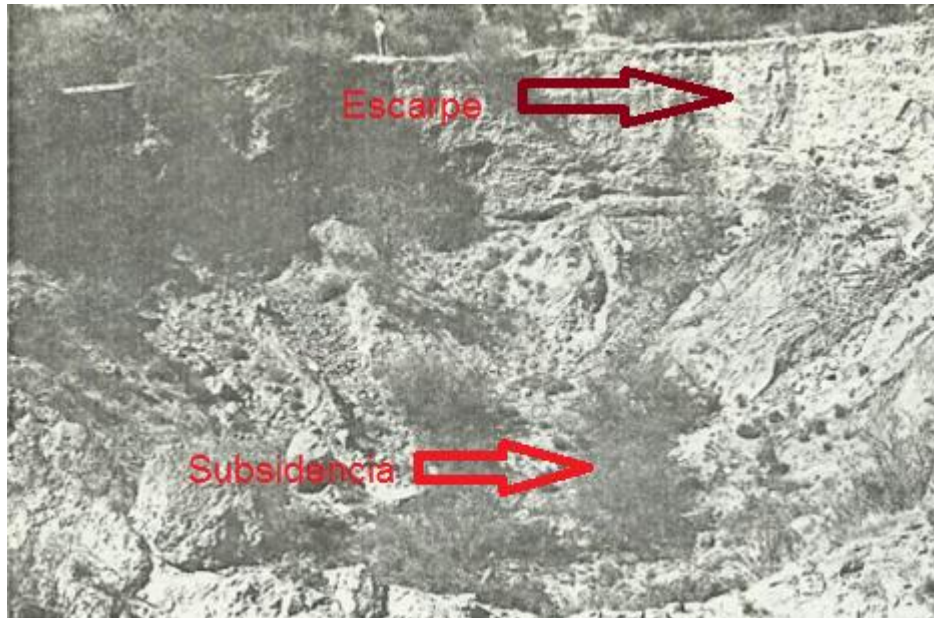
Según el informe técnico de HAUSER (1988), se determinó la existencia de dos subsidencias asociados a labores subterráneas abandonados de la ex Mina La Africana, lo cual significó que el Ministerio de la Vivienda, a través de su Departamento de Urbanismo de la Secretaría Ministerial Metropolitana del Ministerio de la Vivienda, solicitara al SERNAGEOMIN efectuar una evaluación geotécnica del sector susceptible a urbanización, con miras a establecer el riesgo que tales fenómenos comprometían las obras proyectadas.

El yacimiento de La Africana estuvo en explotación, con algunas intermitencias por espacio de 22 años, entre 1956 y 1978, y paralizó en el mes de mayo de 1978. La paralización de actividades de extracción mineral se debió a un notable agotamiento de reservas y descensos en las leyes. Los costos de extracción experimentaron paulatinos incrementos en la medida de la profundización de las labores. Las periódicas invasiones de agua a los distintos niveles, obligaron a permanentes labores de bombeo, con altos requerimientos energéticos.

Los caserones o cavidades creadas por la explotación de la mina (conocidos como “raise” en la nomenclatura de los laboreos), poseían alturas medias de 50 m, con anchos fluctuando entre 15 y 35 m (con ajuste a la potencia de la veta).

Estos caserones mineros crearon condiciones propicias para inducir fenómenos de subsidencia. En superficie, las subsidencias se materializaron en cuatro subsidencias que se alinearon de acuerdo con una traza rectilínea Norte – Sur que concordaba con el rumbo de la veta (HAUSER, 1988). Los primeros cráteres se desarrollan en terreno aluvial, mientras que los dos restantes en terreno rocoso del cerro ubicado inmediatamente al Sur del sitio donde se emplazaba la antigua planta de tratamiento de la mina La Africana. La subsidencia tres, se desarrolló hacia 1985. La subsidencia cuatro data de la época en que se desarrollaba la explotación (alrededor de los años 1974 – 1976).

La subsidencia uno en la Figura 28 comenzó a desarrollarse en un breve tiempo después que la mina paralizó en mayo de 1978. Las primeras manifestaciones de actividad se expresaron con el desarrollo de grietas superficiales. Con el tiempo, fueron acompañadas por paulatinas deformaciones, hasta crear una zona depresionaria que antecedió al colapso hacia mediados de 1979. La cavidad creada por la subsidencia, con forma circular, largo máximo de 54 m y ancho medio de 47 m, poseía al año 1988 una profundidad media de 15 – 17 m y el volumen de la cavidad era aproximadamente 10.000 m<sup>3</sup>.



**Figura 28.** Borde N de la cavidad cilíndrica N° 1 con sección granular en el ex yacimiento de cobre La Africana (con gravas y gravas arenosas con abundante matriz cinerítica).

En la cavidad cilíndrica N° 2 (Figura 29) fue un fenómeno de subsidencia vinculado a movimientos sísmicos, inducidas por el terremoto que el día 3 de marzo de 1985 que afectó a la zona central del país. Se desarrolló bajo la forma de un verdadero colapso. El fenómeno no fue acompañado por deformaciones perimetrales y/o desarrollo de grietas. Según HAUSER (1988) desde aquel momento hasta el año 1988, las paredes del cráter no acusaron inestabilidad significativa y aquel comportamiento admite ser atribuido a la elevada compacidad del material cinerítico que comprende mayoritariamente el relleno sedimentario del sector.



**Figura 29.** Cavidad cilíndrica N° 2 vista hacia el N en el ex yacimiento de cobre La Africana. En extremo derecho se observa tranque de relave.



**Figura 30.** Detalle de depósitos granulares en sección superficial de la cavidad cilíndrica N° 2 en el ex yacimiento de cobre La Africana (borde sur).

Los antecedentes disponibles indican que previo a la decisión de paralizar total y definitivamente la explotación del yacimiento en Mayo de 1978, el sistema de explotación fue modificado. Como resultado de ello, durante el último año de laboreo, las operaciones de relleno y fortificación habrían sido descuidadas, más aún, importante número de pilares de soporte fueron explotados y retirados (HAUSER, 1988). En apariencia, los caserones creados entre los niveles 2 y 3 al N del pique, no fueron rellenados totalmente con relaves. Además, no debe ser desatendida la influencia desestabilizadora de las tronaduras, conexas a la explotación en situación de inducir severo fracturamiento de la zona (HAUSER, 1988).

Históricamente, las filtraciones en los laboreos subterráneos acusaban una manifiesta relación con la posición del nivel del agua del río Mapocho en el sector.

Al momento de paralizar sus actividades en mayo de 1978, mina La Africana terminó con el bombeo lo cual se tradujo en la inmediata invasión de agua. Medidas efectuadas en algunos piques situaron el nivel estático en profundidades en el rango 20 – 35 m. Interesa consignar que en el año 1985 cuando se produjo un importante hundimiento en la cavidad cilíndrica N° 3, el pique 5 descargó un gran caudal instantáneo de agua. Esta situación supone que la totalidad de las cavidades creadas por la explotación subterránea de la mina, se encontraron totalmente ocupadas por agua (HAUSER, 1988).



### 3.1.1.2 Obras civiles

#### Subsistencia en construcción Línea 3 de Metro Santiago

En relación a subsidencias en obras civiles localizadas en ciudades, se menciona la subsidencia en Av. Vivaceta en marzo de 2016 en la comuna de Independencia, Chile. Esta subsidencia se asocia a la construcción de la línea 3 del Metro de Santiago (Figura 31).



**Figura 31.** Subsistencia en Av. Independencia asociado a la construcción de la línea 3 del Metro de Santiago. Fuente: Nuñez (2016).

#### Subsistencia por rotura de matriz de agua potable en Santiago, Chile.

La inundación provocada por la rotura de matriz de Aguas Andinas el 9 de junio del 2016 provocó una subsidencia en el terreno donde se localiza la calzada norte de Av. Providencia (Figura 32). El material retirado desde el subsuelo por la filtración de agua originó un socavón en donde el agua inclusive llegó hasta las vías del Metro de la línea uno de Santiago. Cabe señalar que podrían existir intersticios dejados por la permeabilidad y arrastre de material transportado, debido a la filtración de agua aguas abajo, con la posible consecuencia de posibles subsidencias en el futuro en áreas cercanas al lugar detonadas por movimientos sísmicos.



**Figura 32.** Subsistencia en Av. Providencia asociado a rotura de matriz de agua potable. Fuente: Marín (2016).

### **3.1.1.3 Sobreexplotación de acuíferos**

La disminución del nivel freático en una cuenca producto de la sobre explotación de acuíferos se ha relacionado con la subsidencia de terreno (ZERMEÑO *et al.*, 2004). Además, según PACHECO (2007), con ciertas condiciones hidrogeológicas, se pueden desarrollar subsidencias, donde este fenómeno se caracteriza por la generación de hundimientos y fracturamientos superficiales, las cuales pueden estar asociados a la sobreexplotación del agua subterránea de acuíferos granulares compuestos por depósitos aluviales y/o lacustres del Cuaternario. En ese sentido, las zonas con mayor potencial para la explotación del agua del subsuelo, y por tal razón las que presentan un mayor desarrollo y crecimiento, son los valles formados en cuencas que en un proceso de millones de años han sido cubiertas por materiales granulares, usualmente de origen aluvial y lacustre, los cuales son un excelente medio para la formación de depósitos de agua susceptibles de ser aprovechados (PACHECO, 2007).

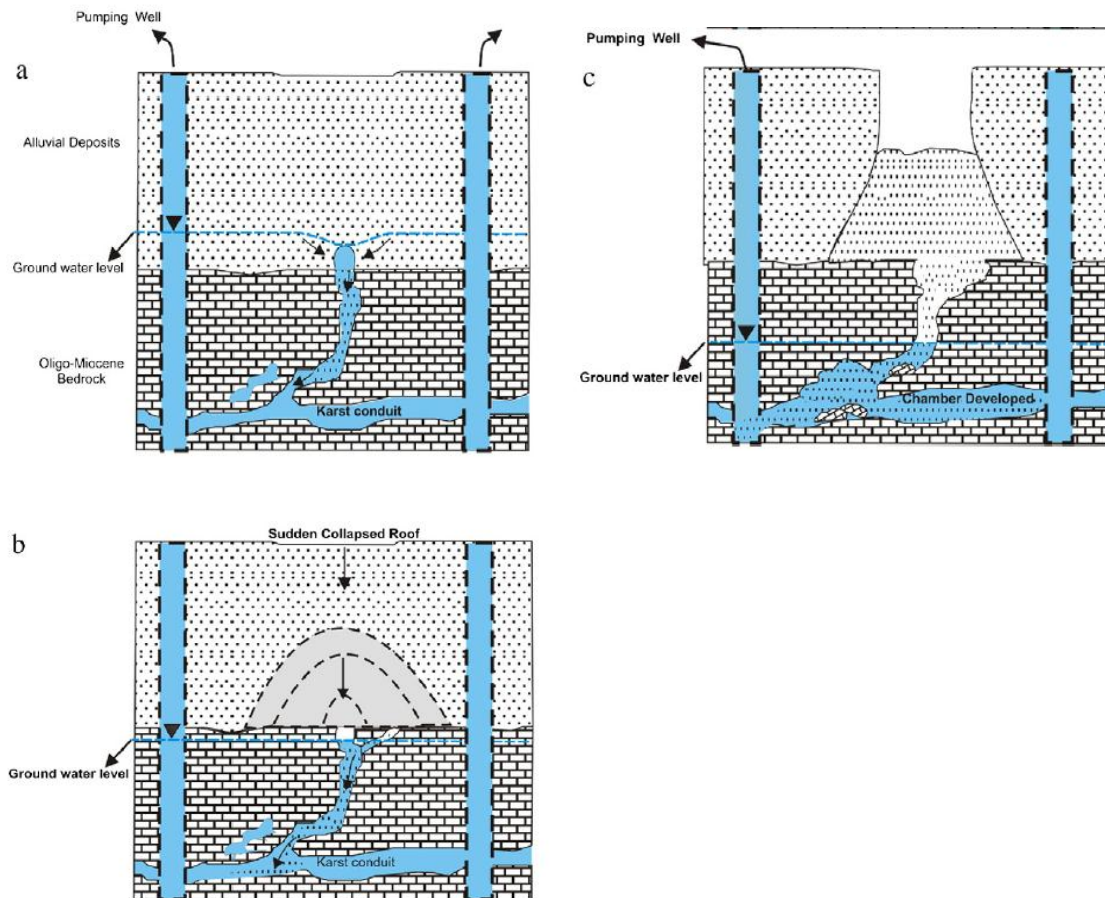
Cuando la cantidad de agua que se extrae del subsuelo es más grande que la cantidad de agua que entra al acuífero, se dice que el acuífero está siendo sobreexplotado. Por lo tanto, la sobreexplotación del acuífero de una cuenca, que contiene rellenos granulares, aluviales y lacustres con potencial de ser consolidado, tiene como consecuencia según PACHECO (2007):

- La generación de hundimientos
- Asentamientos y acomodamientos graduales de los rellenos
- La generación de grietas en la superficie del terreno

En la Figura 33 en referencia a HEIDARI *et al.*, (2011) se observa el colapso de la superficie producto de la disminución del nivel subterráneo del agua producto del bombeo superficial necesario para agricultura, industria y/o consumo humano. Al bajar el nivel freático quedan intersticios con aire, donde en la parte superior se encuentra el material aluvial por ejemplo, el cual puede tener un colapso vertical producto:

- De la gravedad
- Del peso de construcciones superficiales
- Del peso de maquinarias como camiones de gran tonelaje que circulen en la superficie.

Al colapsar el material superficial este cae por el conducto el cual rellena el espacio dejado anteriormente y también podría ser transportado por el agua subterránea dejando una cavidad cilíndrica en la superficie del terreno.



**Figura 33.** Modelo morfogenético para el desarrollo del colapso de la superficie; (a) sin efecto cárstico con el flujo de agua activo el cual está presente en la profundidad dentro de la roca de fondo, (b) un arco comienza a propagar hacia arriba a través de los sedimentos, (c) la propagación de arco de sedimentos y ocurrencia de subsidencia (HEIDARI *et al.*, 2011).

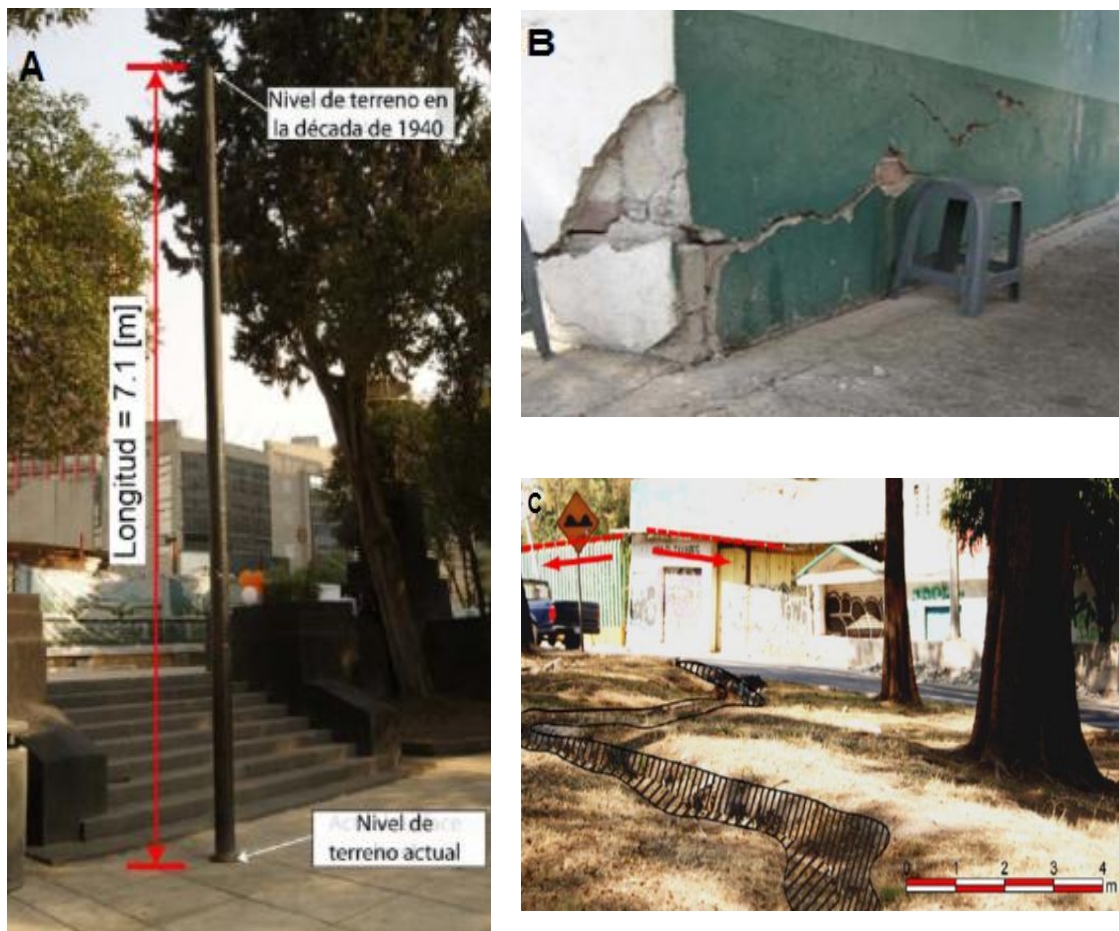
➤ **Caso de subsidencia producto de sobreexplotación de acuíferos en México**

La subsidencia en la ciudad de Aguascalientes, México, ha presentado numerosos daños en viviendas y daños a la vialidad producto de este fenómeno. En el trabajo de Zermeño (2004) se plantea como principal explicación que la extracción no uniforme del agua del subsuelo de la ciudad de Aguascalientes provoca una subsidencia no uniforme de la superficie de la zona urbana en donde favorece su agrietamiento.

La zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), también ha presentado subsidencias debido a la extracción de agua subterránea. La ZMCM se encuentra localizada en el límite suroeste de la Cuenca de México, es uno de los sistemas hidráulicos más complejos en América. Es hoy una región urbana habitada por cerca de 21 millones de personas que dependen del agua subterránea como su principal fuente de agua potable (HERNÁNDEZ, 2013).

El agua subterránea se explota en la región hace más de un siglo en la ZMCM. La explotación intensiva ha generado según HERNÁNDEZ (2013):

- Tasas de abatimiento de 1,4 m/año
- Inversión del gradiente hidráulico
- Modificación de la calidad química del agua
- Consolidación de las arcillas, deformaciones y subsidencias (Figura 34)



**Figura 34.** Imágenes de los efectos de la subsidencia en la ciudad de México. (a) Ademe de un pozo antiguo (~1940) cerca del Monumento a la Revolución, donde se muestra que el brocal se encuentra aproximadamente 7 m por arriba de la cota actual, (b) daños en infraestructura urbana al este de la ciudad, producidos por subsidencia diferencial, (c) ejemplo de la reactivación y propagación de fracturas superficiales producidas por subsidencia diferencial en el este de la ciudad (HERNÁNDEZ, 2013).



➤ **Caso de subsidencia producto de sobreexplotación de acuíferos en Irán:**

Otro ejemplo es el sucedido en el Norte de la ciudad de Hamedan en Irán (Figura 39), donde en esta área, debido a la explotación excesiva de aguas subterráneas en combinación con la roca susceptible a disolución, produjo 28 sumideros que han aparecido entre los años 1988 y 2006 (HEIDARI *et al.*, 2011). Se profundiza en este caso en la parte de “Casos de subsidencia producto de disolución de la roca subterránea o relieve Kárstico”.

### **3.1.2 Causas Naturales de Subsistencia**

A continuación se revisa posibles causas naturales que podrían provocar subsidencias en el área de estudio.

#### **3.1.2.1 Pérdida de humedad por oscilación climática (sequías)**

Las subsidencias o hundimientos lentos pueden afectar a todo tipo de terrenos, generalmente a suelos blandos, y pueden estar causadas por la extracción de fluidos, agua subterránea y petróleo, o por una variación importante del nivel freático de los acuíferos provocado, por ejemplo en una sequía.

La pérdida de humedad del suelo por oscilación climática se relaciona con la extensión de los periodos secos en relación con periodos húmedos. A mayores espacios de tiempo sin precipitaciones existe mayor probabilidad de compactación del suelo. En ese sentido, los eventos de extrema sequía producen una pérdida de humedad en el subsuelo lo que podría provocar el asentamiento de la superficie.

### **Casos de subsidencia producto de sequía**

➤ **Subsistencia en la comuna de Chanco, Chile, 1981**

Los registros de periódicos de la época informaron sobre el hundimiento de terreno (Figura 35) ubicado en el fundo Santa Domitila, situado a 7 km al NO de Chanco el cual inquietó a los habitantes de esta comuna, en la provincia de Cauquenes. Según la nota de prensa de GAJARDO (1982), el fenómeno se detectó en septiembre de 1981 y adquirió mayor magnitud en febrero de 1982. La depresión se desarrolló con grandes fisuras y deslizamientos verticales de 10 m en algunos sectores presentando espejos de deslizamientos en desniveles de varios metros en la vertical. La depresión avanzó a razón de 50 cm diarios. En esa ocasión se recomendó colocar un sismógrafo. El proceso fue semejante al que se presentó en 1960, en el río San Pedro, cercano al lago Rinihue, con la diferencia que aquél fue posterior a un gran terremoto. El sobrepeso de la ladera, sumado a la influencia húmeda del estero, coincidente con una sequía, pudo producir el hundimiento, permitiendo el escurrimiento de tierra según BÖRGEL (1982) en la nota de prensa de GAJARDO (1982).





**Figura 35.** Imágenes de la subsidencia en la comuna de Chanco en el año 1982, Chile.

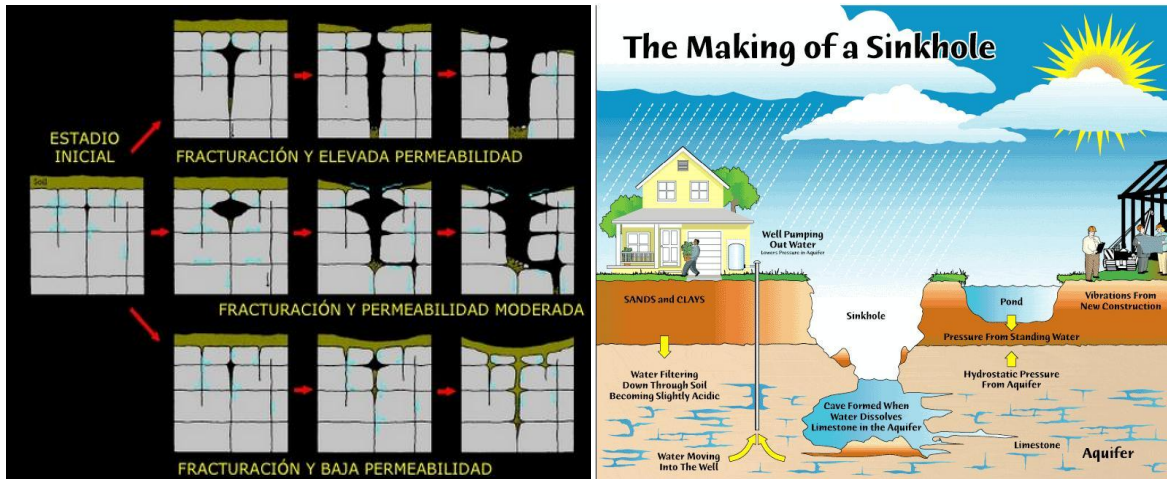
### **3.1.2.2 Relieve Kárstico**

Un Sistema Kárstico, se entiende comúnmente como el conjunto de formas superficiales y subterráneas formadas por procesos de disolución, o inducidos por estos, que permiten el drenaje de las aguas subterráneas desde una determinada área hacia las surgencias Kársticas (PICCINI, 2008).

Los vacíos excavados en la masa rocosa son producto de la acción físico-química de las aguas circulantes. El agua es el sujeto activo y la roca el soporte pasivo de su acción. La circulación del agua es un proceso dinámico y la relación anterior implica una organización progresiva del drenaje subterráneo que tiene por consecuencia una jerarquización de los vacíos excavados (MANGIN, 1982). En este sistema intervienen procesos hidrogeológicos relacionados a su vez con condiciones morfogenéticas regionales. En el interior del sistema existe una interacción entre la cinética de los equilibrios químicos responsables de la disolución y la velocidad y características de las circulaciones. Esta interrelación permite explicar la génesis simultánea de una estructura subterránea y de una morfología de superficie asociada a ella (BAKALOWICZ, 1982).

La permeabilidad de las calizas depende de su litología y estructura, y también condiciona la karstificación, ya que facilita o impide la penetración de las aguas. La permeabilidad de las calizas depende de las fisuras y discontinuidades creadas durante su diagénesis y por la deformación posterior de las capas: planos de fractura y de estratificación, diaclasas y fallas (GALAN, 1991).

Lo esencial de la karstificación reside en que se logre establecer una red de drenaje subterráneo que a la vez ocasione la desaparición más o menos completa del drenaje superficial, independientemente de que las rocas involucradas sean más o menos "solubles" (GALAN, 1991).



**Figura 36.** Esquema que muestra la generación de una dolina producto de roca caliza y agua circundante subterránea (PICCINI, 2008).

En rocas carbonáticas como las calizas, es necesario que el estado inicial de la roca sea favorable a la infiltración y que exista un gradiente hidráulico. En ello interviene la litología de los materiales y su grado de fracturación. Pero el aspecto primordial aparece una vez que una parte de las aguas infiltradas logran crear caminos preferenciales para conducir la infiltración rápida, lo que es condicionado a su vez por las diferencias de potencial (hidráulico) entre las distintas partes del karst y está en relación a sí mismo con el dispositivo topográfico y presencia de niveles de base hacia los cuales pueda drenar subterráneamente el sistema. Las condiciones hidrogeológicas de conjunto permiten explicar la existencia de zonas de intensa karstificación junto a otras poco o nada karstificadas (GALAN, 1991).

La caliza y la dolomía forman la mayor parte de las rocas karstificables y son las rocas karstificables por excelencia. Más del 90% de las cuevas del mundo se encuentran en estos terrenos, que cubren una superficie de 5 millones de Km<sup>2</sup>, lo que representa el 4% de las tierras emergidas. Las calizas contienen un mínimo de 65% de carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>); que llega a más del 95% en las calizas muy puras. Las dolomías están compuestas por un carbonato doble de calcio y magnesio: (Ca, Mg)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (GALAN, 1991).

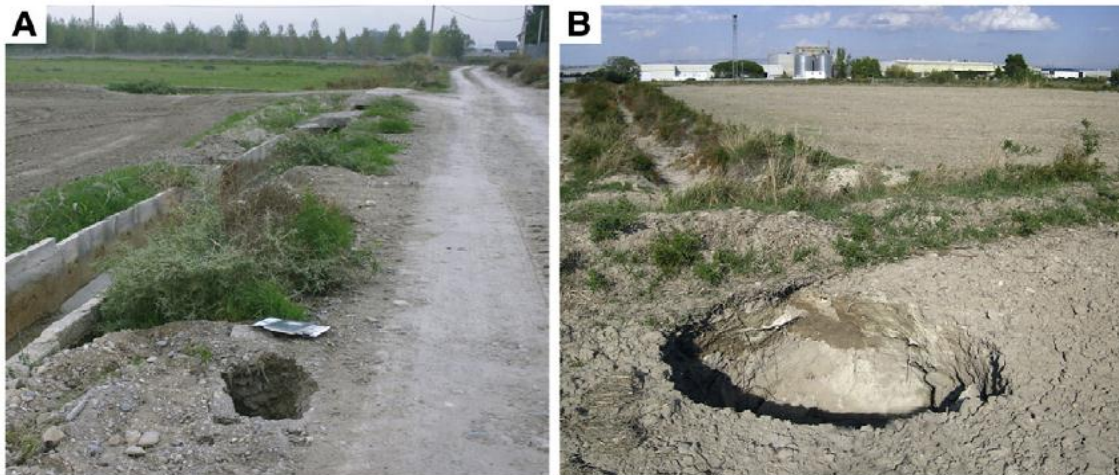
Las calizas son relativamente solubles en el agua cargada de gas carbónico (CO<sub>2</sub>), siendo su solubilidad media de 200-250 mg/lit. La disolución de la dolomía es más lenta y su solubilidad menor, pero generalmente el carbonato de magnesio se presenta asociado a las calizas (calizas dolomíticas). Las calizas metamorizadas (mármoles) son calizas muy puras, enteramente recrystalizadas, e igualmente solubles y karstificables. Las mayores cavidades del mundo en desarrollo y desnivel se encuentran en calizas, alcanzando 531 Km de galerías en Flynt Ridge-Mammoth Cave (USA) y 1.602 m de desnivel en el Gouffre Jean Bernard (Francia) respectivamente (GALAN, 1991).

## Casos de subsidencia producto de disolución de la roca subterránea

### ➤ España

El siguiente caso se ha desarrollado en la parte inferior de la terraza del río Ebro aguas abajo de la ciudad de Zaragoza, NE de España (Figura 37). La mayor parte de la zona está ocupada por campos de cultivo. En los últimos años nuevas zonas industriales y residenciales se han construido reduciendo así el área cubierta por los cultivos (GALVE *et al.*, 2011). En esta área, el valle del Ebro se encuentra en la Formación Zaragoza y presenta evaporitas principalmente de yeso del Mioceno (QUIRANTES, 1978).

Bajo condiciones de alto contenido de agua, la estructura de la suelo puede colapsar debido a la disolución del yeso, convirtiéndose en un material sin cohesión y en aquellas condiciones fácilmente erosionable (JIMÉNEZ-SALAS *et al.*, 1974; FARACO, 1975). Esta zona de España se ve afectada por numerosas dolinas, las cuales son un tipo especial de depresión geológica característico de los relieves kársticos, las cuales son inducidas por irrigación y riego. Esto se ve reflejado debido a que ocurren con frecuencia durante la temporada de riego en los campos de cultivo, especialmente en lo inmediato a proximidades de zanjas y canales (GALVE *et al.*, 2011).



**Figura 37.** Imágenes de subsidencias (A y B) producidas la parte inferior de la terraza del río Ebro aguas abajo en la ciudad de Zaragoza, NE de España (GALVE *et al.*, 2011).

Aguas arriba del río Ebro en la ciudad de Zaragoza se han producido subsidencias en áreas urbanas como se muestran en las siguientes imágenes de la Figura 38:





**Figura 38.** Imágenes de grietas prominentes en un edificio situado junto a la carretera N - 232 y hundimiento en una calle de Valdefierro en la ciudad de Zaragoza (GALVE *et al.*, 2009).

➤ **Irán**

La mayoría de los sumideros en la llanura central de la región de Hamedan (Figura 39), en el O de Irán, se desarrollan en una parte no consolidada de sedimentos de piedra caliza del Oligo-Mioceno. Estas subsidencias se han desarrollado en las zonas con mayor circulación de aguas subterráneas. La caliza se disuelve en aguas ácidas, especialmente a lo largo de las fracturas subterráneas las cuales se traducen en presencia de grandes conductos y que permiten el transporte de sedimentos no consolidados y el desarrollo erosivo hacia la superficie (HEIDARI *et al.*, 2011).



**Figura 39.** Imagen de subsidencia en Hamedan, Irán (HEIDARI *et al.*, 2011).

En consecuencia, reducción del agua subterránea y la posterior eliminación de sedimentos los cuales crea intersticios por debajo de la llanura sobre todo en el lecho de roca y el interfaz de sedimentos son los principales factores que gobiernan la generación de subsidencias en esta región (HEIDARI *et al.*, 2011).

➤ **Chile**

En el reportaje de LUZ (2016) señala que en el año 2012 en la comuna de Alto Hospicio, al Norte de Chile apareció un socavón de más de 12 m de profundidad y 1 m y medio de ancho en el antejardín de una casa. En el sector de la Pampa, en esta misma comuna, apareció en agosto del año 2015 otro socavón de 3 m de profundidad y 2 m de ancho. El socavón más grande es el que se localiza en la población Santa Teresa el cual posee 30 m de profundidad y 216 m de ancho. Según LUZ (2016) en la comuna de Alto Hospicio existen 2.807 casa afectadas (Figura 40). Se asocia los socavones a filtraciones en la red de agua potable o en el alcantarillado lo cual provoca que con el contacto con el suelo salino de la zona produzca la disolución del suelo con la consecuencia que el suelo pierda fuerza, se hunda y surja un socavón (LUZ, 2016). En ese sentido, la geología de La comuna de Alto Hospicio según MARQUARDT (2008) está labrada sobre las Unidades neógenas denominadas por Gravas de Alto Hospicio (MPah). Corresponde a una secuencia de gravas bien consolidadas y areniscas de origen aluvial, con algunas intercalaciones de cenizas de caída. Una característica sobresaliente de la secuencia de gravas y arenas, es que se encuentra fuertemente cementada por sales solubles. Observaciones hechas por el SERNAGEOMIN (2014), constan de niveles en que el material clástico ha sido completamente desplazado durante el proceso de formación de suelo. Esta fuerte cementación podría ser explicada mediante el transporte de aguas subterráneas a través de fracturas y estructuras de orientación este-oeste y en menor proporción, por la percolación y disolución de costras salinas precipitadas en superficie.



**Figura 40.** Imágenes de los socavones en casas en la comuna de Alto Hospicio, Norte de Chile. (LUZ, 2016).

La unidad geológica tiene un importante desarrollo interno de grietas rellenas de material fino (Figura 41). Dichas fracturas se asocian a la contracción y expansión del depósito más superficial, debido a las variaciones en el volumen de las sales contenidas en él como respuesta a cambios bruscos de temperatura y humedad SERNAGEOMIN (2014).



**Figura 41.** Imágenes de las gravas de Alto Hospicio en vía que conecta Iquique con Alto Hospicio (Ruta 16) en el Norte de Chile. Se observa la alternancia de niveles de gravas gruesas y materiales finos muy bien laminados con numerosas grietas rellenas de depósitos finos y/o materiales salinos SERNAGEOMIN (2014).

En el informe del SERNAGEOMIN (2014) se menciona que el IDIEM de la Universidad de Chile realizó un estudio de mecánica de suelos (Informe N°612.685-A) para la comuna de Alto Hospicio, cuyo principal objetivo consistió en la generación de un documento que contenga los lineamientos para determinar si un suelo es colapsable o no frente a la infiltración de aguas y la eventual disolución de las sales cementantes. En dicho documento, se menciona que la presencia de sales en cantidades significativas dentro de la estructura del suelo, ocasiona que ésta posea una rigidez considerablemente alta en estado seco, lo que implica que las deformaciones que se producen al ser cargados por una fundación son muy reducidas (IDIEM, 2010). Los suelos salinos al verse sometidos a la infiltración y percolación de agua sufren la disolución de sales, provocando el reacomodo de las partículas traducido en oquedades en el subsuelo y pérdida de rigidez.

La metodología usada por el SERNAGEOMIN (2014) fueron ensayos realizados para la determinación del contenido de sales solubles totales las cuales fueron por el método de lixiviación acuosa (cloruros y sulfatos). El criterio considerado para la determinación de colapsabilidad de suelos según IDIEM comprende lo siguiente:

- Si el contenido de Sales solubles (SS) es menor a un 2% corresponde a un Suelo no colapsable por disolución de sales solubles.
- Para contenidos de sales solubles (SS) mayor a 2% corresponde a un Suelo colapsable por disolución de sales solubles. En este caso, la recomendación es



adoptar medidas de diseño y constructivas para evitar y disminuir los efectos de asentamientos en estructuras.

En ese sentido, para determinar las propiedades químicas del suelo en Alto Hospicio se efectuaron dos calicatas, una ubicada adyacente a la planta de tratamiento de aguas servidas de Aguas del Altiplano, y la restante a las afueras de la ciudad (Caliche) SERNAGEOMIN (2014).

Se concluye en el trabajo del SERNAGEOMIN (2014) que los suelos en los que encuentra emplazada la comuna de Alto Hospicio son colapsables ante la disolución de sales contenidos en la matriz de la unidad geológica, conocida como Gravas de Altos Hospicio. Según los lineamientos metodológicos de IDIEM, en los puntos muestreados al interior de la ciudad, existe un porcentaje promedio mayor a un 2%, por lo que las medidas de mitigación en cuanto al diseño y cuidado de los suelos debe ser rigurosa y supervisada. El recubrimiento de cañerías ante una eventual infiltración o la disminución de regadío en estos sitios, son algunas de las medidas preventivas ante la disolución y posterior colapso de los suelos salinos. Ante todo, el riesgo geológico descrito no impide el uso de estos suelos, sino que demanda una serie de medidas específicas, tendentes a evitar o mitigar impactos negativos potenciales.

### 3.1.2.3 Subsistencia inducida por sismos

Un terremoto es la forma natural de la Tierra de liberar la energía acumulada. En los sismos tectónicos, las placas al interactuar en sus bordes aplican fuerzas una contra otra, esto provoca una acumulación de esfuerzo (stress) en la región y una deformación (strain) asociada a esta interacción (COMTE, 2012).

Existen tres tipos básicos de interacción entre las placas: Bordes Convergentes, Bordes Divergentes, y Bordes de Fallas Transformantes. Todos ellos producen terremotos. La subducción entre las placas se produce debido a que una es más densa que la otra. En el caso Continental – Oceánica (Figura 42), la corteza oceánica al ser más densa que la continental, subducta bajo ella, generando magmatismo, cuña astenosférica y arcos volcánicos, junto con contacto sismogénico interplaca y sismicidad intraplaca (COMTE, 2012).

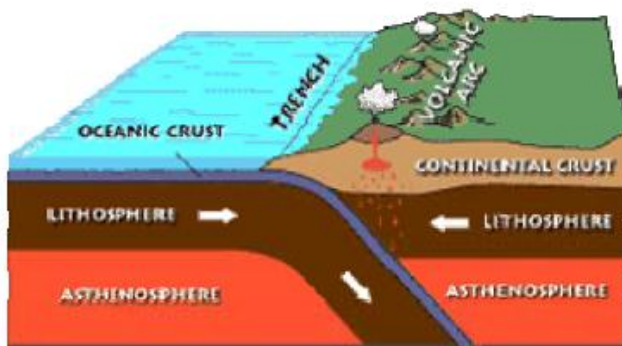


Figura 42. Esquema de la interacción de placas de tipo Convergente.

Chile se encuentra en el borde entre el encuentro de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. En ese sentido, Chile es uno de los países sísmicos del mundo, en él se liberó durante el siglo pasado más del 40% de la energía sísmica del planeta. La mayor parte de su territorio se encuentra en el contacto por subducción de las placas de nazca y sudamericana, siendo afectado por 3 tipos de sismos: interplaca, intraplaca de profundidad intermedia y corticales (LEYTON, 2010).

De manera general los sismos pueden producir subsidencias en una amplia área. Un ejemplo de ello fue el terremoto del 27 de febrero de 2010 de  $M_w = 8,8$  en el centro-sur de Chile que provocó alzamientos y subsidencias cosísmicas (QUEZADA *et al.*, 2012). En el litoral, entre las regiones de Valparaíso y O'Higgins, la línea de costa experimentó subsidencia cosísmica que provocó una disminución del ancho de las playas, profundización de ríos, sumergencia de barras litorales e inundación de vegetación y su desecación (QUEZADA *et al.*, 2012).

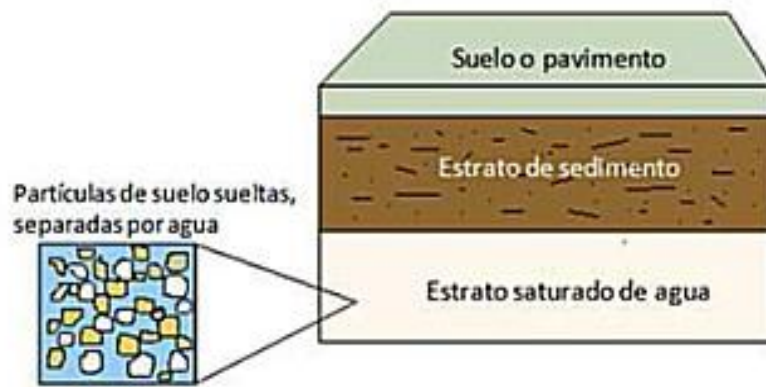
Como se mencionó anteriormente, el cambio del relieve más notorio es la disminución del ancho de las playas. En Bucalemu, un arco que une dos rocas con arena de playa debajo, antes del terremoto quedó con agua de mar y el retroceso de la playa fue superior a 10 m. Más al sur, la playa de Duao ( $34,9^\circ$  S) desapareció por completo en algunas partes, llegando el mar hasta los muros protectores (QUEZADA *et al.*, 2012).

#### **3.1.2.4 Licuefacción**

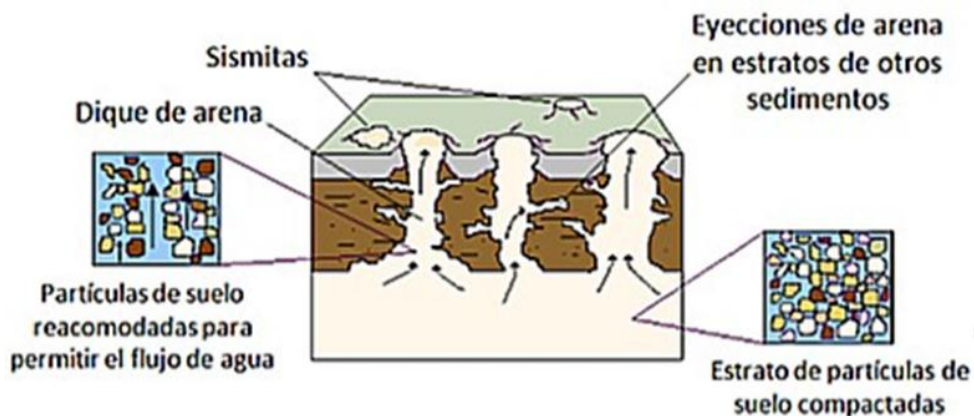
Otra manera que un terremoto pudiera dar origen a subsidencias es a través de la licuefacción. La licuefacción es un fenómeno en el cual los suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y saturados en agua se separan debido a vibraciones generadas comúnmente por terremotos, tronaduras, u otro fenómeno de similares características. Estas vibraciones actúan elevando la presión de agua de los poros. Si ésta llega a igualar o superar la fuerza de contacto entre los granos, la resistencia se reduce a cero y el sedimento cae y el agua de saturación tiende a salir como una fuente surgente, comportándose como material licuado, cuyo resultado son fenómenos como desplazamientos y/o fallas de terreno, volcanes de arena, asentamientos diferenciales, etc. (FALCÓN *et al.*, 2012).

En el trabajo de HENRIQUEZ (2007) describe a licuefacción como un fenómeno en el que suelos granulares sueltos, saturados, no consolidados, y no cohesivos pierden su resistencia al corte debido a vibraciones del terreno, transformándose temporalmente a un estado licuado (Figura 43 y 44). En ese sentido, la licuefacción se genera a través de la pérdida de rigidez y resistencia con la vibración o pérdida de resistencia por baja en esfuerzos efectivos (exceso de presión de poros) frente a sismos de gran magnitud, resultando en la densificación del suelo, generándose deformaciones y asentamientos en la superficie, junto con el escape de agua a presión (HENRIQUEZ, 2007)

Los terrenos susceptibles de experimentar licuefacción correspondan a suelos formados por sedimentos no consolidados, de baja a nula compactación y saturados de agua. Se trataría, principalmente, de arenas depositadas en ambientes fluviales, eólicos, litorales y en menor medida aluviales (FALCÓN *et al.*, 2010).



**Figura 43.** Esquema de la situación inicial sin inducción sísmica con partículas de suelo separadas con agua (PALACIOS *et al.*, 2013).



**Figura 44.** Esquema del fenómeno de licuefacción luego de sollicitación sísmica (PALACIOS *et al.*, 2013).

El nivel estático de aguas es un factor imprescindible si se quiere evaluar la susceptibilidad a la licuefacción, debido a que el fenómeno sólo ocurre en un ambiente saturado. Mientras más superficial sea el nivel estático de aguas mayor será la probabilidad que se desencadene el fenómeno (LARA, 2013).

Factores para que se produzca licuefacción:

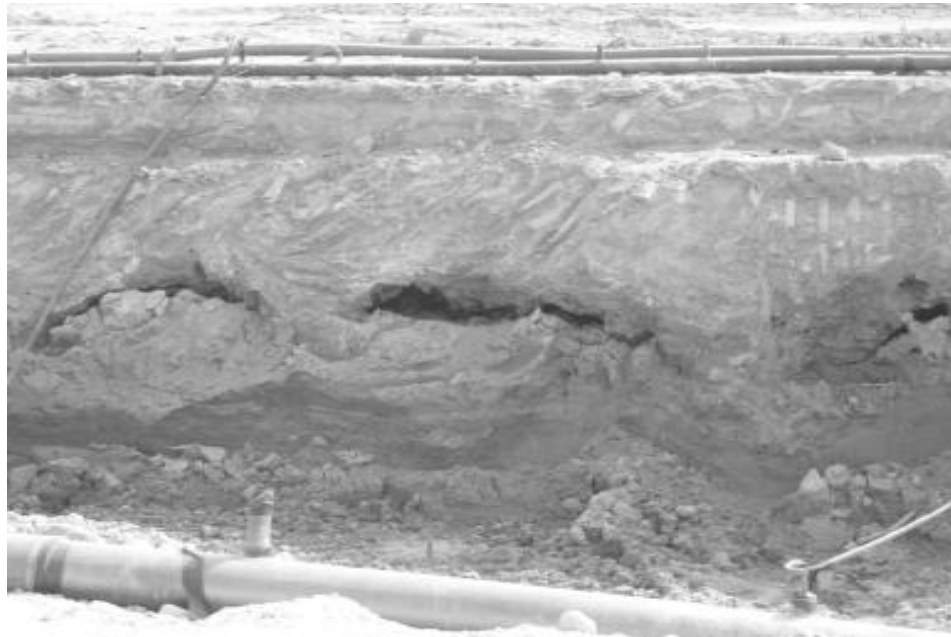
- Localidades emplazadas sobre depósitos aluviales de valle de tipo no consolidados, estratificados, compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas formados por material joven producido durante el Holoceno

- Nivel freático inferior a los 5 metros
- Rellenos mineros
- Ambientes de playas, barras arenosas y sistemas fluviales, ambientes lacustres y fluviolacustre

Por último, aparte del fenómeno de licuefacción, los sismos y tronaduras pueden ser inductores a colapsos en la superficie de un terreno producto de cavidades, galerías mineras y/o en suelos con intersticios que pudieran existir en un área determinada.

### **Casos de subsidencia producto de sismos, Kuwait**

En el trabajo de RANA (2008) se explica la génesis del proceso y formas de tratamientos para las subsidencias en una región de Kuwait. En ese sentido, una amplia investigación geotécnica se llevó a cabo en una zona residencial en desarrollo a 20 kilómetros al norte de la ciudad de Kuwait. Las investigaciones dieron como resultado información significativa con respecto a la estratigrafía y las propiedades del subsuelo e indicaron que la capa superior tendía a perder arena limosa con el agua subterránea que circula alrededor de 1,3 m debajo de la superficie del suelo.



**Figura 45.** Imágenes de cavidades encontradas en los perfiles de suelo en Kuwait



**Figura 46.** Imágenes de dos colapsos en la superficie producto de cavidades subterráneas (aproximadamente 1,03 m X 1,15 m de diámetro cada respectivamente).

Durante la excavación, una red de pequeñas cavidades interconectadas se encontraron las que existen a profundidades que van de 0,5 a 8 m (Figura 45). Se determinó que estas cavidades se extienden horizontalmente comenzando con profundidades que coinciden con la del agua subterránea de la zona (RANA, 2008).

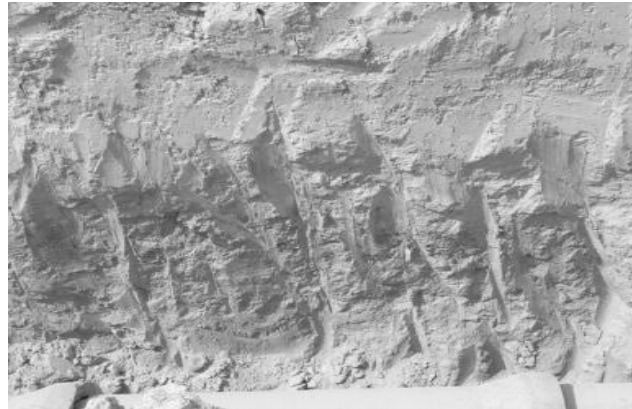
En esta región, el movimiento de las aguas subterráneas en dirección al mar es la razón detrás de la disolución de sedimentos y también el lavado de los sedimentos finos produciendo el plegamiento del suelo (RANA, 2008). En este estudio geotécnico no se encontraron suelos con rastros de sedimentos orgánicos. Las cavidades también se podrían haber formado debido a la licuefacción de varios terremotos con magnitudes que van de 3 a 4,5 en la escala de Richter que afectaron a la zona en el pasado (RANA, 2008).

Para reducir el riesgo de desarrollo de colapsos en esta zona residencial, se sugirieron técnicas de mejora después de revisar los perfiles de suelo, los registros de pozos y análisis de gradación. Las técnicas utilizadas fueron reemplazo del suelo, compactación dinámica, y compactación por Vibroflotación, conocido también como vibrocompactación (Figura 47 y 48). Un equipo de consultores señaló que la Vibroflotación era el mejor tratamiento económico y más práctico en este caso (RANA, 2008).



**Figura 47.** Procedimiento de mejoramiento del suelo en el área residencial a 20 Km de la ciudad de Kuwait.





**Figura 48.** Perfil de suelo después del tratamiento de compactación dinámica y compactación por vibroflotación.

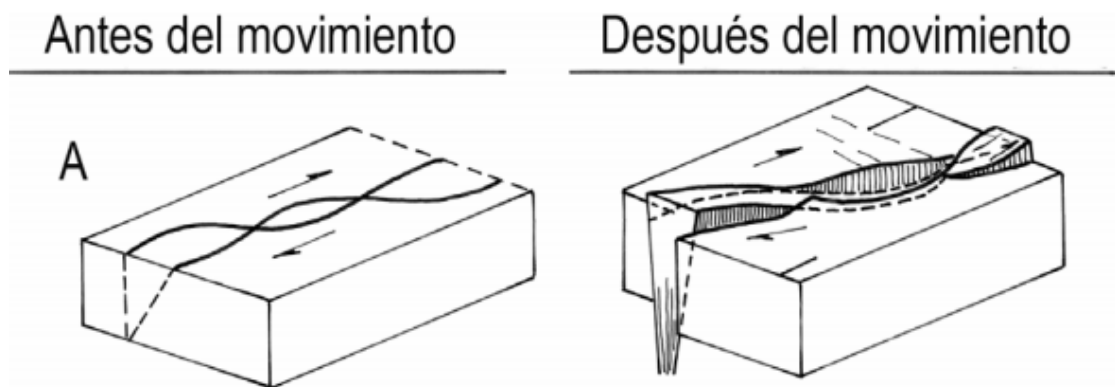
### **3.1.2.5 Sistema de fallas bajo una cuenca**

La geometría y dinámica del patrón hidrográfico de una cuenca presenta gran sensibilidad en el corto periodo geológico, frente a variaciones tectónicas, climáticas y geomorfológicas (OWENS & SLAYMAKER; 2004; BURBANK & ANDERSON, 2005). Estos mecanismos pueden explicar la morfometría, extensión de sus cuencas y los patrones hidrográficos actuales (MARDONEZ *et al.*, 2007).

La estructura geológica puede tener una influencia notable sobre la organización del relieve, y a través de esta en el tamaño, forma y patrón hidrográfico de las cuencas. Cuando la red fluvial se adapta a lineamientos de falla, diseña trazados angulados, paralelos y/o rectangulares (BURBANK & ANDERSON, 2005). En ese sentido, los descensos de la superficie terrestre producidos por las fallas producen un efecto conocido como subsidencia tectónica. Este tipo de subsidencia es, en general, muy lenta y de pequeña magnitud (de pocos mm o décimas de mm al año) frente a otros tipos de subsidencia (TOMAS *et al.*, 2009).

**En general, la subsidencia de una cuenca se asocia a:**

- Movimientos tectónicos en la vertical
- Acumulación y compactación de los sedimentos



**Figura 49.** Esquema de falla de rumbo con espacios vacíos luego de movimiento sísmico que posteriormente se rellenan.

#### **Características generales:**

- El espacio de acomodación corresponde al vacío en la cuenca a consecuencia de la subsidencia, que posteriormente se rellena (Figura 49)
- Los límites geográficos de la cuenca es dónde empieza y dónde acaba, terrenos propios de la cuenca y los que la rodean sin subsidencia o incluso con levantamientos
- Las áreas próximas sometidas a erosión, son los terrenos de donde proceden los sedimentos.

Los movimientos verticales del suelo o subsidencia, pueden tener origen tectónico ya que en una zona distensiva puede dar lugar a la formación de fallas y un consiguiente reajuste hidrostático (BÖRGEL, 2015). Por otra parte, la recurrencia de la actividad de la falla y el hecho de que constituyan zonas fuertemente fracturadas y alteradas se consideran factores importantes para analizar la estabilidad de las obras civiles y el potencial riesgo para los asentamientos humanos (ALANIZ *et al.*, 2002).

En un sistema de falla se puede correlacionar con la hidrología de una zona según BÖRGEL (2015) tal como lo menciona también los párrafos anteriores de BURBANK & ANDERSON (2005). En ese sentido, según BÖRGEL (2015), un sistema de fallas ortogonal se relaciona con la geometría de una cuenca, donde la línea de falla sigue la dirección de la cuenca. Si la cuenca tiene una dirección rectilínea lo más probable que la cuenca se encuentre en un sistema de fallas. Las fallas son zonas de debilidad de la corteza terrestre y recepciones cantidades importantes de agua proveniente de las partes altas y aquí se concentra el agua. Con terremotos, las fallas se mueven y desplazan, y las aguas circulan y se pierden, donde por este motivo, las zonas de acumulación de agua en las fallas (pozos o cubetas) quedan secos. Luego, la falla vuelve a su lugar o cercano a él según el tamaño del sismo, y empieza la acumulación de agua de nuevo. La falla al expandirse succiona el material que se encuentra entremedio de ella. En ese sentido, las fallas están relleniéndose

constantemente luego de un sismo que provoque desplazamiento entre los bloques o expansión. En definitiva, ocurrido un sismo, el material que se encuentra entremedio de la falla se retira aguas abajo quedando sin material.

### **3.2 Métodos de detección de cavidades**

En esta parte de esta investigación se revisan dos métodos geofísicos para detectar cavidades subterráneas y una técnica para analizar tasas de subsidencias a través de imágenes satelitales.

#### **Métodos geofísicos**

Tradicionalmente, los métodos geofísicos se han empleado para la localización de recursos naturales explotables como:

- Yacimientos minerales
- Cuerpos de agua subterránea
- Zonas geotérmicas
- Yacimientos de hidrocarburos

La profundidad de exploración para localizar estos recursos naturales generalmente es de varios cientos de metros, inclusive de varios kilómetros (PACHECO, 2007).

Una nueva rama de la geofísica de exploración es la geofísica ambiental. El objetivo de esta rama de la geofísica es la exploración de la capa superficial del subsuelo donde la actividad antropogénica puede alterar las condiciones naturales del subsuelo, y donde las condiciones geológicas afectan a la actividad antropogénica. Generalmente las profundidades de exploración no van más allá de los 300 metros (PACHECO, 2007).

En ese sentido, uno de los objetivos particulares de la exploración ambiental es la de localizar escenarios geológicos potencialmente riesgosos para las actividades humanas tales como fallas geológicas activas (DEMANET *et al.* 2001, HEALY Y PRESS, 1969, BENSON Y FLOYD, 2000) y cavernas en el subsuelo (BUTLER, 1984, MILLER Y STEEPLES, 1991). A continuación se revisan dos técnicas geofísicas:

- Radar de Penetración Terrestre
- Tomografía de Resistividad Eléctrica.

### **3.2.1 Radar de Penetración Terrestre (GPR)**

El Radar de Penetración Terrestre (Ground Penetrating Radar o GPR llamado también Georradar) consiste en un método de prospección geofísica basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas y con esto se obtienen perfiles que permiten ver anomalías en el subsuelo (PUEYO *et al.*, 2005). El pulso radiado penetra en tierra donde parte de él se refleja hacia la superficie cada vez que interacciona con un objeto, estructura o cambio en la estratigrafía del terreno, con propiedades electromagnéticas.

El GPR es una técnica superficial y no invasiva que permite determinar la existencia y las características de las cavidades y galerías subterráneas, así como para evaluar el riesgo de hundimiento en una zona determinada (GÓMEZ, 2012).

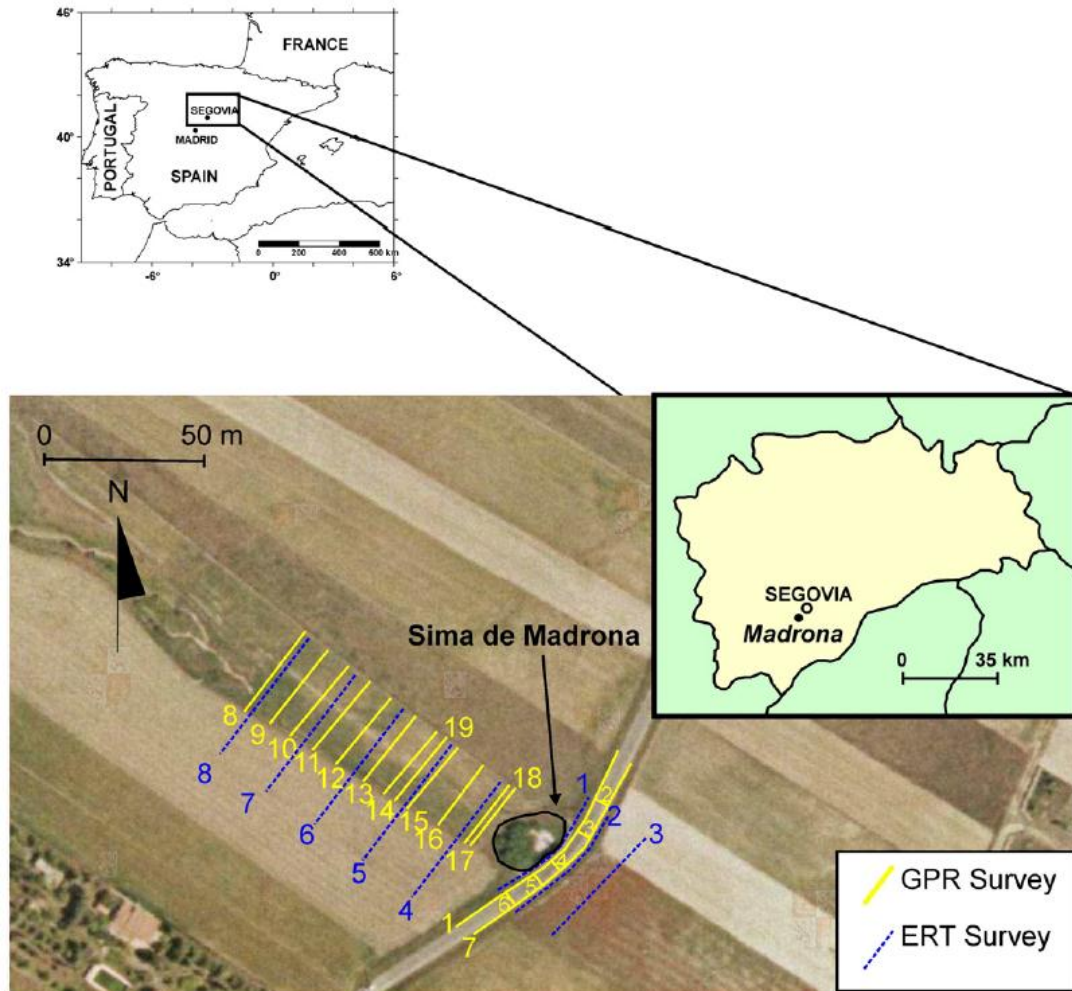
De acuerdo con el tipo de señal radiado los georradares pueden dividirse en:

- Los denominados de impulso en el que la señal radiada es un pulso de duración de 1 hasta 10 ns aunque también son posibles pulsos más estrechos.
- Los radares de frecuencia modulada continua (frequency-modulated continuouswave) o escalonada (Stepped-frequency).

En el trabajo de GÓMEZ (2012) se muestra un ejemplo de uso del GPR. En este caso la localidad en estudio es la provincia de Segovia, España, donde existen numerosos afloramientos de rocas de carbonato que se ven afectados por procesos karstificación en la que hay numerosas galerías y cuevas. Este es el caso de la Sima de Madrona donde se produjo un colapso de un socavón.

En la siguiente cartografía se muestra la localización de la Sima de Madrona y también los perfiles realizados a través de GPR (Figura 50):

Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.



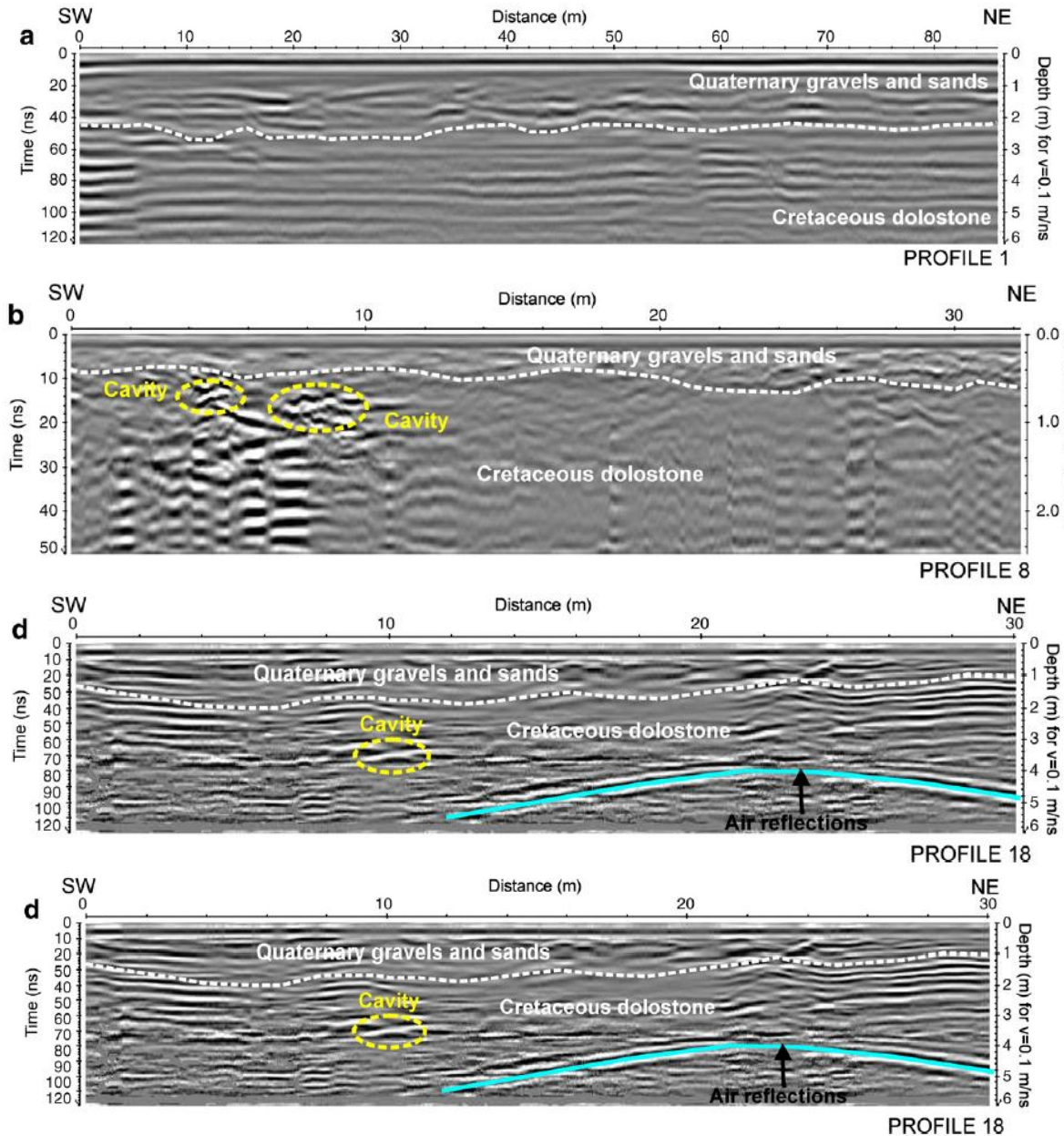
**Figura 50.** Ubicación del GPR (19) y ERI (11) en perfiles que se llevan a cabo en la Sima de Madrona, España (GÓMEZ, 2012).

En la Figura 51 se observa perfiles procesados e interpretados los cuales muestran diferentes características del subsuelo en la Sima de Madrona en España según la descripción de GÓMEZ (2012):

- En el perfil a se encuentran los límites entre materiales detríticos cuaternarios y las dolomías del Cretácico.
- En el perfil b se observa fuerte reflexiones debajo del contacto entre materiales detríticos Cuaternarios y dolomías del Cretácico, interpretados como la aparición de cavidades poco profundas.
- En el perfil c existen reflexiones en forma de arco que muestran fuerte la estructura de dolomías del Cretácico que desaparecen lateralmente debido a la disolución de las rocas carbonatadas.



- En el perfil d muestra fuerte reflexión en el Cretácico que corresponde a una unidad de dolomías y que se interpretan como pequeña cavidad cuyo inicio aparece en el borde de la Sima (GÓMEZ, 2012).



**Figura 51.** Perfiles en la Sima de Madrona, España, en donde se muestra cómo el GPR da indicios de cavidades subterráneas.

### 3.2.2 Tomografía Resistividad Eléctrica

La Tomografía Eléctrica es una técnica geofísica empleada en el estudio del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del mismo (la resistividad), a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde perforaciones. En ese sentido, el diferente comportamiento

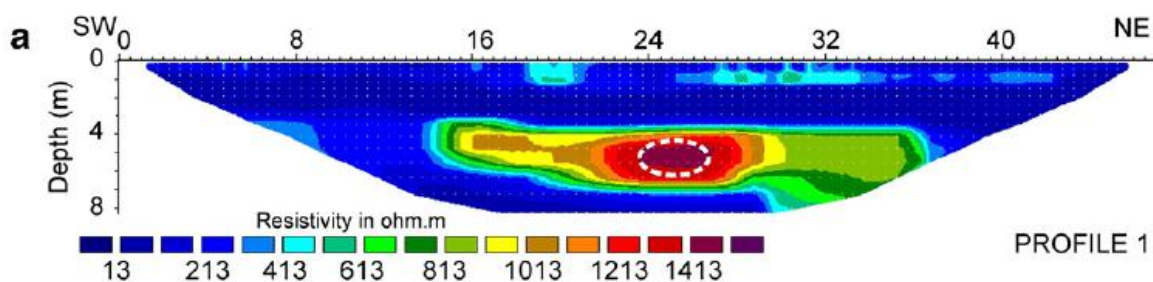
geoelectrico del medio permite obtener perfiles 2D e imágenes 3D de la distribución de resistividades del mismo, por lo que se trata de una de las herramientas de carácter no destructivo más eficaz para el análisis y caracterización de posibles discontinuidades del subsuelo (MARTÍNEZ *et al.*, 2007).

La Tomografía Resistividad Eléctrica permite además, determinar la presencia de cavidades en el subsuelo, bien sean de origen natural como las cavidades kársticas, o bien sean antrópicas como las galerías mineras. Estos fenómenos de subsidencias constituyen un hecho determinante en la ordenación del territorio al proyectar cualquier tipo de construcción, y en especial para la ingeniería civil, es necesario conocer la posible presencia de cavidades en la profundidad del subsuelo, ya que éstos podrían provocar hundimientos en la superficie (MARTÍNEZ *et al.*, 2007).

### Utilidades de la tomografía de resistividad eléctrica:

- Reconocimientos de niveles estratigráficos
- Localización de sustrato rocoso
- Localización de nivel freático y contaminaciones
- Localización de cavidades
- Localización de tuberías de gran tamaño

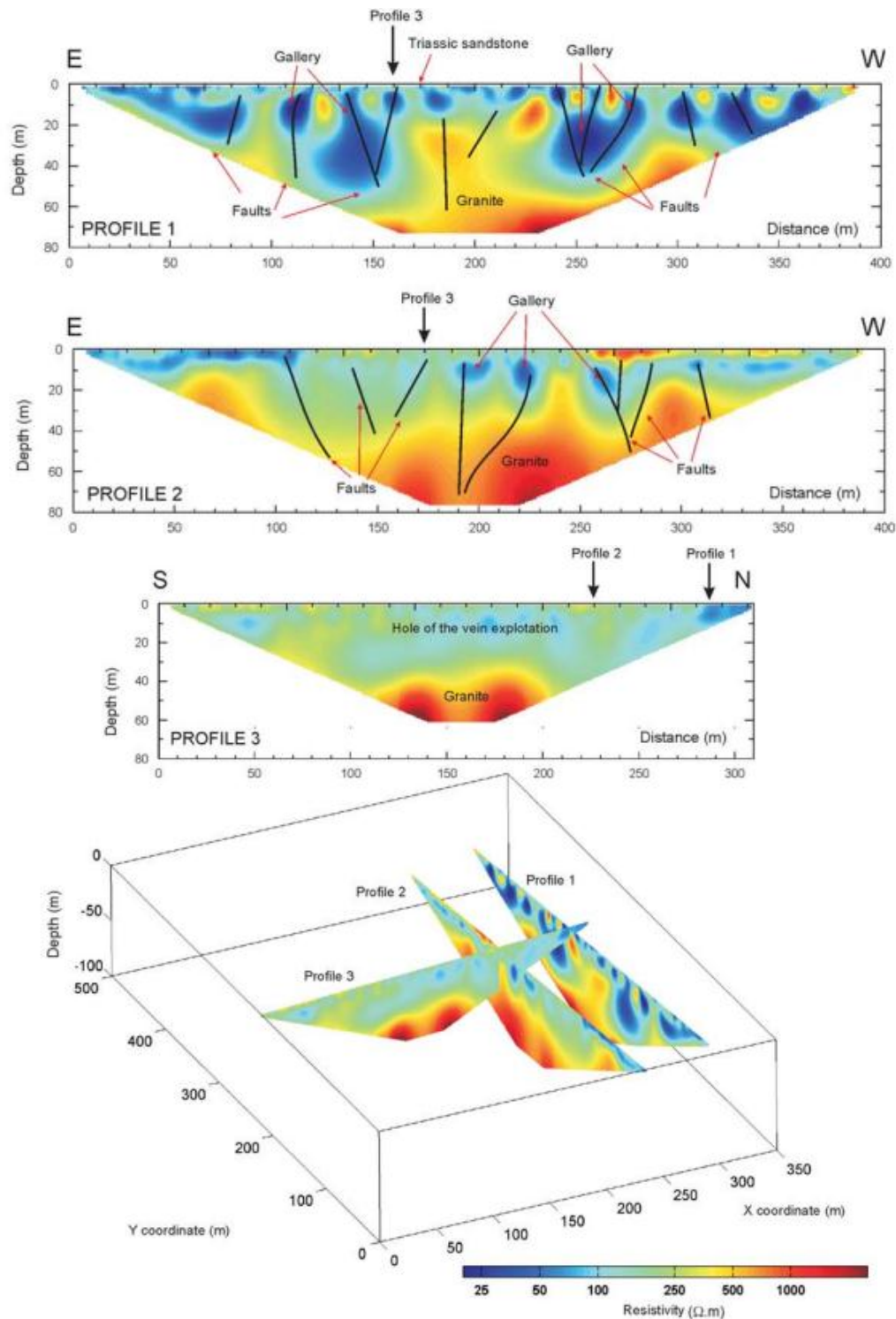
En el siguiente ejemplo de tomografía de resistividad eléctrica corresponde también al caso de la Sima de Madrona en España (Figura 52):



**Figura 52.** Perfil de Tomografía Resistividad Eléctrica en donde se visualiza la presencia de una cueva circular u ovular en el círculo puntuado de color blanco que tendría un diámetro máximo de ~ 3 m.

En la Figura 52, el modelo de resistividad obtenido, representado en una escala lineal, muestra a una distancia de 25 m y a una profundidad de alrededor de 5-6 m de la presencia de una importante zona de altos valores de resistividad ( $> 1500 \Omega m$ ), que se ha interpretado como la presencia de una cueva circular u ovular con un diámetro máximo de ~ 3 m.

Otro ejemplo de perfiles de tomografía de resistividad eléctrica corresponde a localidad al noreste de Linares, España, la cual se observa en la Figura 53.



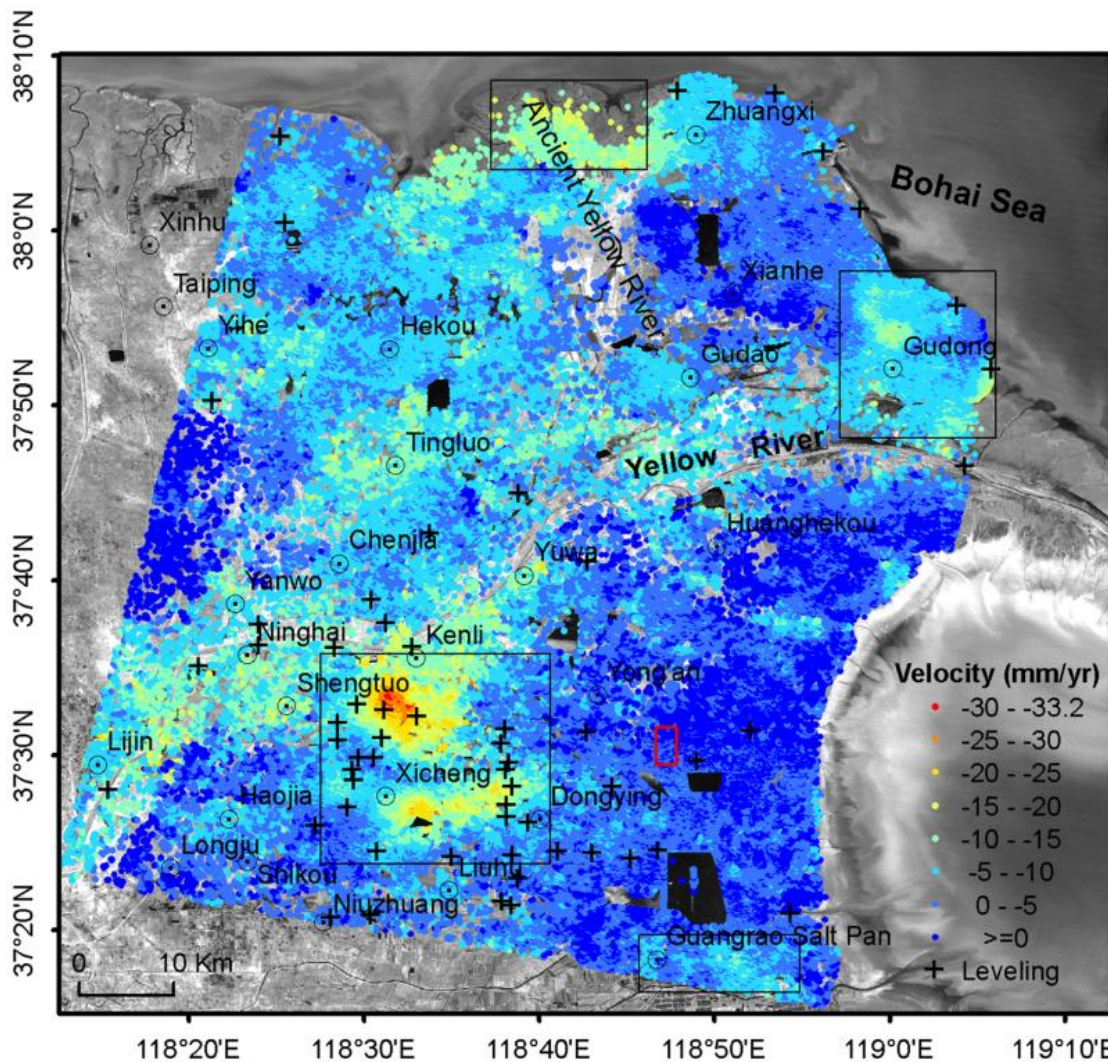
**Figura 53.** Modelos de resistividad eléctrica del terreno en Linares, España. Notar que existe una correlación de la resistividad con las fallas en el perfil 1 y perfil 2 en esta figura.



### 3.2.3 Análisis de tasas de subsidencias a través de imágenes satelitales

Una forma para monitorear cambios en la superficie terrestre es la comparación de imágenes satélites en distintos momentos. Un ejemplo de ello son las imágenes de radar. La técnica de Radar de Apertura Sintética Interferométrica (InSAR) proporciona una herramienta para la vigilancia de hundimiento del terreno. En ese sentido, InSAR permite obtener topográfica de alta precisión y detectar microdeformaciones del relieve (ZHANG *et al.*, 2014).

En la Figura 54 se observa un ejemplo de aplicación de la InSAR en donde las tasas de subsidencia en el delta del río Amarillo en China. El delta es rico en petróleo, gas natural, salmuera, energía geotérmica, y otros recursos. Las subsidencias en esta zona están asociadas a la extracción de petróleo (ZHANG *et al.*, 2014).



### **3.3 Marco Jurídico y Administrativo del Subsuelo en Chile**

Las subsidencias han ocurrido en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, por lo tanto es importante revisar las leyes que rigen sobre la explotación del subsuelo en un área poblada. En ese sentido, un tema no menor es el de determinar cuál es la extensión espacial que tienen personas naturales y privados para la explotación de recursos del subsuelo urbano.

#### **El Uso del Subsuelo**

Según el abogado Roberto Guillmore, la utilización que puede hacer el propietario del suelo sobre el subsuelo que le corresponde no ha existido mayor dificultad, ya que siendo parte de su dominio, según ha sostenido la doctrina y no lo ha refutado la Jurisprudencia, éste puede efectuar sobre él todas las facultades que este derecho real le otorga.

Cuando estamos en presencia del subsuelo de un bien nacional de uso público el tema de utilización es diferente. Esta posibilidad se presentó con motivo de los estacionamientos construidos bajo bienes nacionales y municipales lo que provocó un importante pronunciamiento de la Contraloría General de la República y luego originó una modificación de la ley Orgánica Constitucional de Municipalidades. De acuerdo al artículo 5° letra c) de La Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades, se señala que la administración de este subsuelo le corresponde a las municipalidades. Por tanto, para que un particular pueda llevar a cabo una actividad, deberá necesariamente circunscribirse a un procedimiento administrativo de modo tal, que pueda obtener una concesión para la utilización del bien de uso público. En estricto rigor es una concesión de obra pública, la cual se obtiene de una licitación pública como bien lo señala la LOCM en su artículo 37.

#### **Casos especiales**

Por lo general se confunde la posibilidad de explotar el subsuelo con los regímenes jurídicos de la explotación minera y de los derechos de agua. Sin embargo, existen sustanciales diferencias que es necesario observar

##### **➤ Usos del subsuelo por parte de la Industria Minera**

En lo relativo a la situación jurídica de las minas, éstas se encuentran excluidas de toda apropiación directa por los particulares, ya que la Constitución de Chile establece: “el estado tiene el dominio absoluto, exclusivo, inalienable e imprescriptible de todas las minas”. Este último es un tipo de sistemas doctrinarios que explican el origen de la propiedad minera. En ese sentido, el sistema doctrinario que ocupa Chile es el Dominical o de Dominio Absoluto del Estado que atribuye al estado el dominio patrimonial, absoluto, exclusivo e inalienable de la riqueza minera. Se configura de este modo un dominio pleno para el estado que le permite reservar para sí la explotación de determinadas sustancias, o explotar esta riqueza por medio de terceros a través de concesiones y, en suma, celebrar cualquier acto o



contrato respecto de la riqueza minera (ZUÑIGA, 2005), o como lo define Luis González B: *“...el sistema en virtud del cual el Estado se comporta frente a la riqueza minera como frente a un bien particular, como verdadero dueño, por lo tanto, puede explotar por sí mismo esta riqueza o por medio de terceros, puede reservar la explotación y otorgarla facultativamente, sin que en ningún momento se desprenda de la propiedad de las minas, concediendo sólo la explotación de las mismas”*. Esta disposición es repetida por el artículo primero del Código de Minería. Lo importante de esta enunciación es el hecho que aun cuando las sustancias minerales se encuentren en el subsuelo de un particular, éste no se hará propietario de ellas, requiriendo el permiso de la autoridad competente respectiva para serlo (ZUÑIGA, 2005).

La importancia para este sistema de dominio del Estado sobre las minas es según ZUÑIGA (2005) que este sistema doctrinario se desenvuelve plenamente después de la primera guerra mundial, período en el cual se comprobó que ciertas sustancias minerales debían estar en manos del Estado para los altos fines de la defensa nacional y no sometidos, en virtud de la legislación, al arbitrio de los particulares.

Cuando existan ya los permisos de la autoridad competente y estén realizados, los particulares tendrán derechos de exploración y explotación minera de una concesión, según los casos, derechos administrativos para explorar y explotar los minerales. En cuanto a las actuales obligaciones de los concesionarios, considera la ley solo el pago de patentes anuales (tasas), como forma de amparo, sin que exista la necesidad de una actividad exploratoria efectiva. Bajo este marco, es perfectamente posible que un concesionario pueda intervenir en terreno particular para desarrollar su concesión, así lo señala expresamente la Constitución en su artículo 19 N° 24 inciso 6° al establecer que los predios superficiales estarán sujetos a obligaciones y limitaciones que la ley señale para facilitar la exploración, explotación y el beneficio de dichas minas, como son las servidumbres prediales.

Por último en relación a la industria minera, si existieran faenas mineras nuevas, es decir, después de la urbanización, esto sería ilegal por parte de la compañía minera que estuviera extrayendo mineral bajo un área urbanizada, ya que según el Código Minero Chileno que rige hoy en el país hace que cualquier lugar, a excepción de las áreas urbanas, sean susceptibles de concesión minera.

#### ➤ **Aprovechamientos de aguas subterráneas por parte de particulares**

Otra forma de utilización de subsuelo es el aprovechamiento de las aguas subterráneas. Para poder utilizar las aguas subterráneas es preciso obtener el derecho de “aprovechamiento”, esto es, una concesión que le permita ejercer una posesión exclusiva sobre este bien público que son las aguas. En este caso, y a diferencia de lo que ocurre en materia minera, el peticionario de un aprovechamiento de aguas subterráneas, deberá acreditar el dominio sobre el inmueble donde se encuentre ubicada la extracción, o la autorización de su dueño.

Ahora, cuando la obra de captación se encuentre ubicada en un bien nacional de uso público, se requerirá la autorización del organismo bajo cuya administración éste se encuentre, por lo que normalmente requerirá la autorización de la municipalidad respectiva, de acuerdo a lo previsto en el artículo 5° letra c) de la ley 18.695.

### **Iniciativas legales en Chile para la explotación del subsuelo**

En razón de la ley 19.425 del año 1995, se modificó la Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades, lo que respecta al subsuelo en los Bienes Nacionales de Uso Público. Se entregó a las Municipalidades la administración del subsuelo, estableciéndose que este puede ser objeto de Concesiones y Permisos a objeto de construirlo y explotarlo.

Estas concesiones se otorgan previa Licitación Pública, pudiendo ser transferibles asumiendo el adquirente todos los derechos y deberes del contrato de concesión. Agrega la presente ley que las aguas, sustancias minerales, materiales, objetos que aparecieran como consecuencia de la ejecución de las obras, no se entenderán incluidos en la concesión y su utilización por el concesionario se regirá por las normas que le sean aplicables. Cabe destacar que esta iniciativa legal ha permitido la creación de importantes proyectos de construcción de estacionamientos subterráneos en Santiago.

En el artículo transitorio de esta ley establece que “mientras no se incorpore el uso del subsuelo en los bienes nacionales de uso público en los planes reguladores, es preciso que la municipalidad respectiva obtenga previamente un informe favorable del Ministerio de Vivienda y Urbanismo”. Esto significa que las Municipalidades si bien pueden planificar el uso del subsuelo de los bienes nacionales de uso público mediante sus planes reguladores, mientras no lo haga la concesión del uso del subsuelo para la construcción y explotación de bienes requiere de un informe favorable del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los resultados de esta investigación según los objetivos planteados. Los resultados se presentan a través de una explicación del proceso que causaría las subsidencias en el área de estudio.

### **4.1 Hidrogeología e Hidrología**

Como se mencionó en el capítulo correspondiente a la descripción del Área de Estudio, en el subcapítulo de Hidrogeología, un tema importante de estudiar es describir los materiales presentes en el subsuelo. En ese sentido, en este capítulo se describe el acuífero correspondiente al área de estudio, los niveles de precipitaciones y el balance hídrico del acuífero. Todas estas variables se estudian para ponderar la posible incidencia en las subsidencias a través de roca susceptible a disolución y a la acción antrópica de extracción de agua subterránea, la cual como se ha mencionado anteriormente en el subcapítulo de Sobreexplotación de Acuíferos en el Marco Teórico, también podría provocar subsidencias de terreno. En la Figura 55 se presenta la localización del acuífero donde se encuentran las subsidencias según la DGA (2013), luego en la Figura 56 se presenta un perfil geoelectrico para ver el potencial hidrogeológico del acuífero. En la Figura 58 se presenta los niveles de precipitaciones a través de la estación meteorológica localizada en la ciudad de Copiapó. Además, se presenta el balance hídrico del sector del acuífero donde localizan las subsidencias con datos de la DGA en Vargas (2013), y por último se presentan sondajes mecánicos realizados por AGUIRRE (1999) y estratigrafía del área de estudio según MARSCHIK (2001) y SEGERSTROM & RUIZ (1962) para identificar el tipo de roca presente en el área de estudio. A continuación veremos la descripción de cada una.

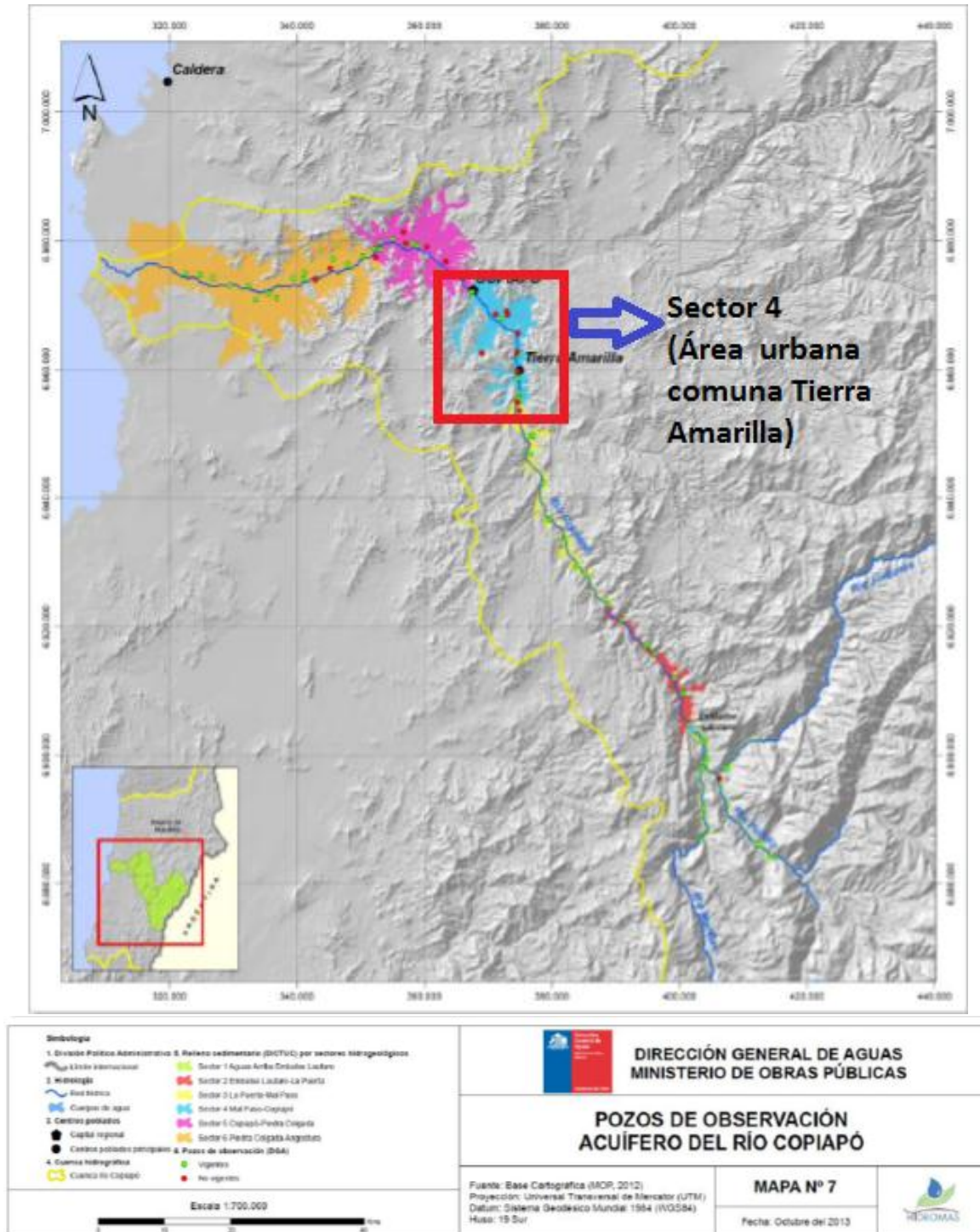
#### **4.1.1 Acuíferos**

La cuenca del río Copiapó se subdivide en seis sectores desde aguas arriba hacia la desembocadura según la DGA (2013). El área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se ubica en el subsector 4 (Figura 55) que corresponde al área desde Mal Paso hasta la ciudad de Copiapó. Es en esta área donde se presentan las subsidencias.

En el capítulo de descripción del Área de Estudio, se presentan las características de la cuenca del río Copiapó. Según esta descripción, los materiales corresponden a depósitos no consolidados los cuales constituyen el relleno sedimentario. Están conformados por secuencias mayoritariamente permeables a semipermeables con porosidad intergranular. Desarrollan potentes, continuos y extensos niveles estratificados, multiacuíferos (libres a semiconfinados), radicados muy especialmente, en depósitos granulares modernos: ripios, gravas, gravas arenosas y arenas fluviales a fluvioaluviales (AGUIRRE, 1999). El Basamento Rocosó Indiferenciado está conformado por las rocas que constituyen los flancos y el basamento rocoso del valle del río Copiapó. Estos materiales, son prácticamente impermeables. No obstante presentan una permeabilidad secundaria local

Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.

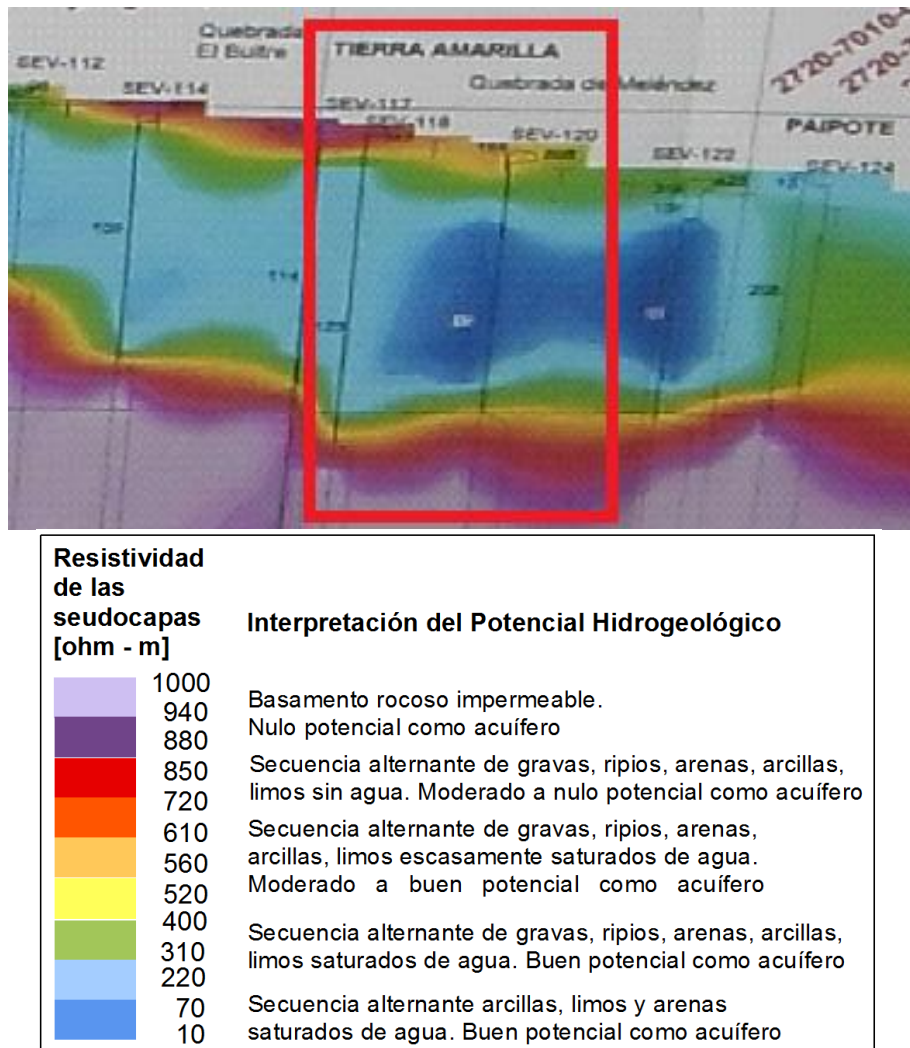
vinculada a la alteración y/o fracturamiento superficial los cuales poseen baja a nula capacidad para almacenar y/o transmitir el agua subterránea (AGUIRRE, 1999).



**Figura 55.** Cartografía de localización de acuíferos según la DGA (2013). El acuífero del sector 4 corresponde al del área urbana de la comuna de Tierra amarilla donde se localizan las subsidencias.

## Perfil Geoelectrico

El Perfil Geoelectrico de la Figura 56 pertenece al trabajo de AGUIRRE (1999) en donde se observa que la superficie del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla existen secuencias alternadas de gravas, ripios, arenas, arcillas y limos sin agua con nulo potencial como acuífero en los primeros 20 m de profundidad. Hacia más profundidad se encuentran secuencias alternadas de gravas, ripios, arenas, y arcillas y limos saturados de agua con buen potencial como acuífero. Desde los 80 m, el subsuelo presenta secuencias alternadas de arcillas, limos y arenas saturados de agua con buen potencial como acuífero. Se observa que en sector de quebrada de Meléndez en su subsuelo existe un alto potencial como acuífero.



**Figura 56.** Extracto del Perfil Geoelectrico, desde Embalse Lautaro a Piedra Colgada, Valle del río Copiapó, Región de Atacama (AGUIRRE, 1999). En rectángulo rojo es el área de estudio de las subsidencias.



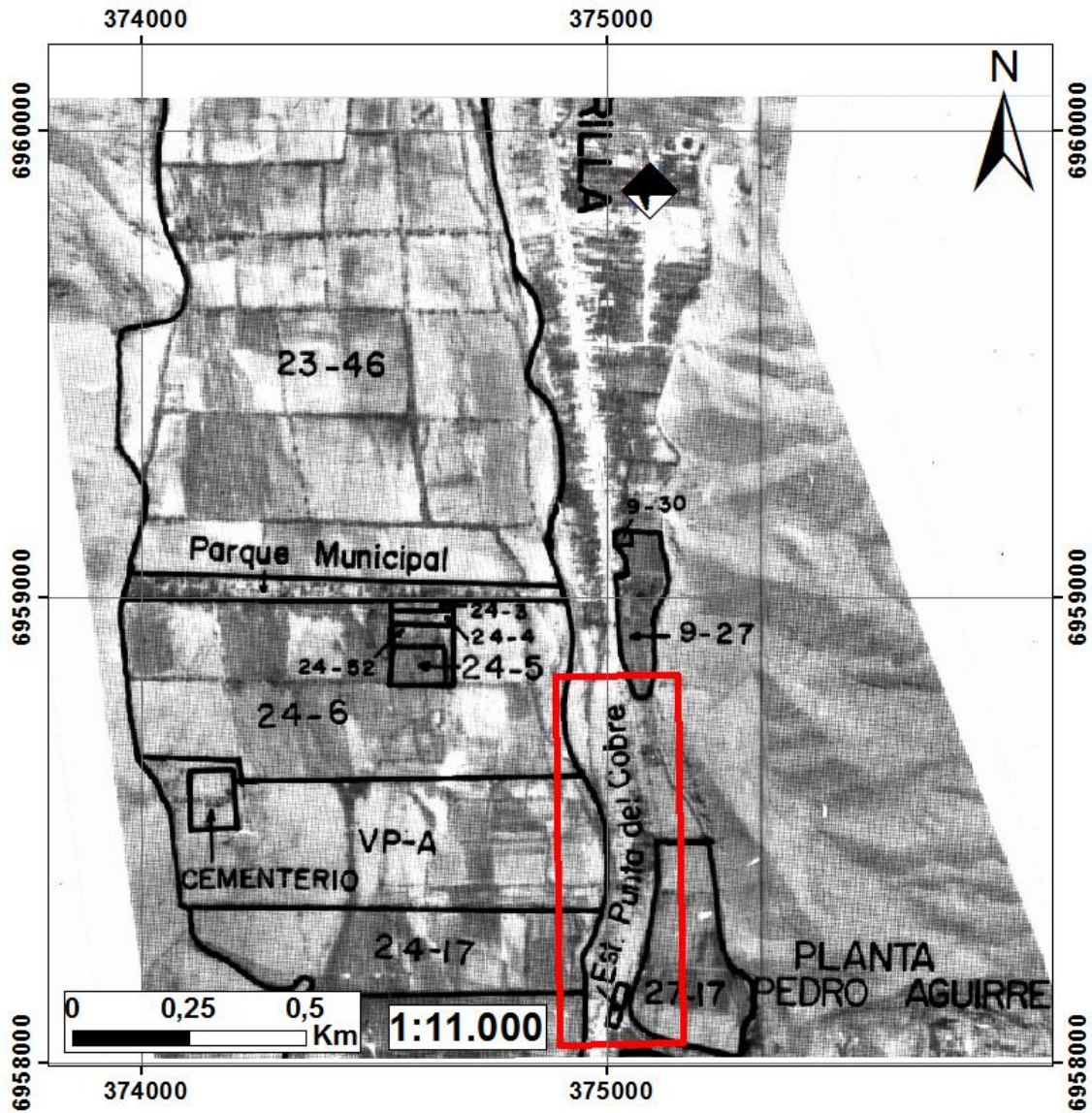
A través de los últimos años, según el balance hídrico presentado en la Figura 59, se aprecia una disminución en las entradas de agua y un aumento de las salidas. En ese sentido, lo más probable es que el perfil geoelectrico de la Figura 56 haya disminuido en la actualidad su potencial hidrogeológico, donde esta disminución podría ser debido a la acción antrópica (por ejemplo: extracción para la agricultura, minería y/o consumo residencial) o natural (por ejemplo: provocada por extensos periodos sin precipitaciones).

En la Figura 57 se observa una cartografía basada en una fotografía aérea del año 1962 en donde se aprecia la baja urbanización del área de estudio, no obstante esta área presenta mayoritariamente paños de cultivos en donde hoy en día se localiza el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.



También en la Figura 57 se localiza, a través de la simbología de la cartografía en rectángulo rojo, el estero Punta del Cobre a unos 500 m de la subsidencia del patio de una casa.

El agua que podría circular por aquel estero podría tener incidencia en la disolución de la roca caliza presente en la zona.

Otro efecto de este estero sería que si ha disminuido su potencial hídrico, vale decir bajando la circulación hídrica en el subsuelo, esta situación podría estar dejando intersticios vacíos bajo el subsuelo y con esto provocando la subsidencia de terreno en este punto.



**Simbología**

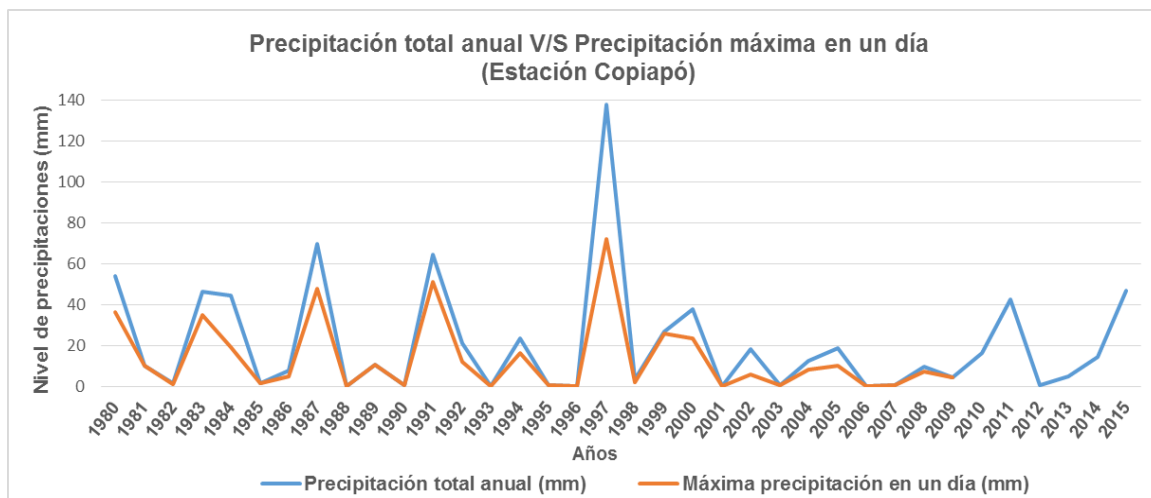
-  Subsistencia patio de una casa
-  Área Estero Pta. del Cobre

**Información Imagen:**  
 Mozaico preparado para Impuestos Internos usando aerofotografías tomadas en 1962, ejecutados por el proyecto areofotogramétrico de la O.E.A. en Chile.  
 Actualización propiedades al año 1979.

Figura 57. Mapa basado en fotografía aérea del año 1962 realizado por la O.E.A. en Chile.

#### 4.1.2 Nivel de precipitaciones

En la Figura 58 se observa el nivel de precipitaciones para los últimos 35 años en la estación pluviométrica en la ciudad de Copiapó. Se ha elegido esta estación por ser la más cercana a la comuna de Tierra Amarilla y poseer una altitud similar (11 km de distancia al área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y 500 m de altitud sobre el nivel de mar respectivamente).



**Figura 58.** Gráfico para la correlación entre el total de precipitaciones del año y el máximo de precipitaciones caídas en un día para la Estación Copiapó. Fuente: Dirección Meteorológica de Chile y Dirección General de Aguas.

El promedio de precipitaciones para el periodo comprendido entre los años 1980 y 2015 es de 20 mm. En el gráfico de la Figura 58 se observa además que las precipitaciones varían cada año principalmente en la amplitud. Existen periodos que es muy baja la precipitación llegando a nula en algunos años, como por ejemplo los años 1988, 1993, 1996, 2001, 2003, 2006, 2007 y 2012. Además, en este periodo de tiempo (1985 – 2015) existen años consecutivos de bajas precipitaciones como son 1985 y 1986, 1995 y 1996, 2006 y 2007 y por último los años 2012 y 2013.

Se observa también en el gráfico de la Figura 58 que la correlación de “Precipitación total anual” con la “Máxima precipitación diaria” (esta última con datos solo hasta el año 2009) refleja que las precipitaciones se concentran en un periodo muy corto de tiempo, donde la “Máxima de precipitación anual” cae casi en totalidad en un día para la mayoría de los años presentados en la Figura 58. Por último, los años con mayores niveles de precipitaciones son 1987, 1991, 1997, y 2015 (este último año con datos hasta el 31 de julio).

### **Pérdida de humedad por oscilación climática**

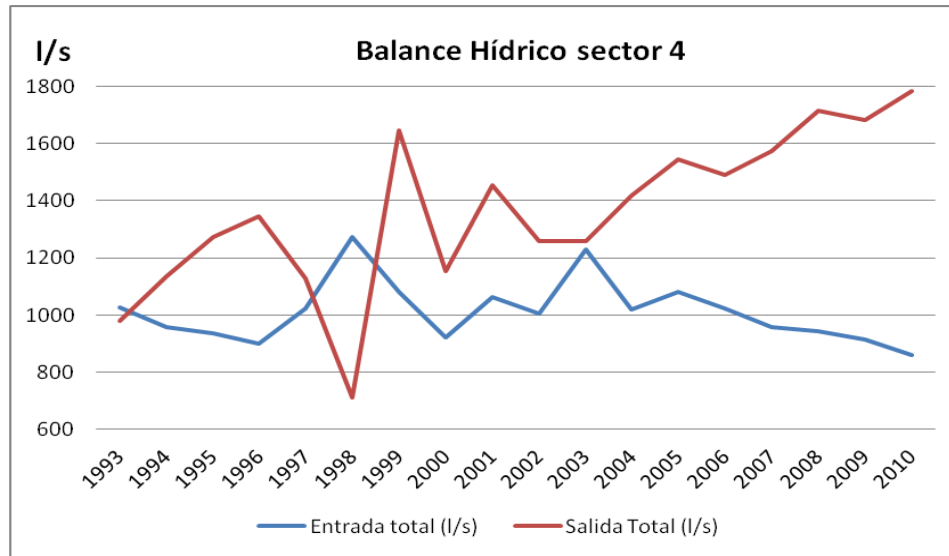
La Pérdida de humedad por oscilación climática corresponde a mayores espacios de tiempo sin precipitaciones con lo cual existe mayor probabilidad de compactación del suelo producto de la no recarga del acuífero por el concepto de precipitaciones. En ese sentido, los eventos de extrema sequía producen una pérdida de humedad en el subsuelo (pérdida de volumen) lo que podría provocar el asentamiento de la superficie y así la génesis de las subsidencias. Así mismo, cabe la posibilidad del que asentamiento de terreno producido en el área de estudio sean producto de la evaporación del agua subterránea, producto de los periodos largos de sequía en el área, además agravada por la extracción antrópica del agua, donde el agua en estado líquido se encuentra en los intersticios entre las gravas, gravilla y si su matriz arenosa incluyendo limo y arcilla, las cuales, estas últimas, tienen buen potencial hidrogeológico en el acuífero donde se localizan las subsidencias según la Figura 56. Por lo tanto, al evaporarse el agua subterránea quedarían oquedades de aire los cuales serían rellenados por el material granulométrico superior del terreno que caerían por la gravedad, y así provocando el colapso de la superficie creando las subsidencias a la entrada de la comuna de Tierra Amarilla y en el patio de la casa en la zona urbana de esta comuna. Esta evaporación de agua tendría su génesis en los periodos secos comprendidos entre los años 2006 – 2009 y 2012 – 2013 probablemente.

#### **4.1.3 Balance hídrico**

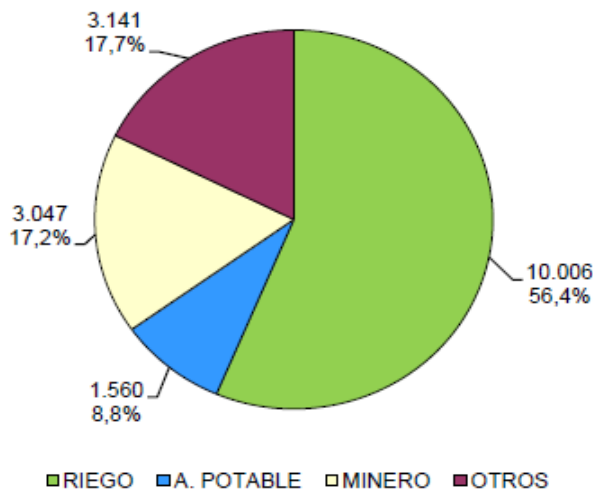
El balance hídrico indica los niveles de recargas y salidas de agua en un acuífero determinado. Este indicador mostraría una posible disminución de los recursos hídricos presentes en el acuífero del sector 4 según datos de la DGA en Vargas (2013). En ese sentido, el sector 4 es donde se localizan las subsidencias, las cuales podrían estar asociadas a la disminución del volumen hídrico en el acuífero producto de actividades antrópicas y/o naturales.

La diferencia entre el total de entrada y las salidas totales nos da el nivel de almacenamiento del acuífero en relación a su balance hídrico. Es así que los recursos subterráneos en este sector han sufrido en los últimos años importantes descensos sostenidos en sus niveles (ver Figura 59). Esto debido a los altos caudales de extracciones en el sector, comparado con la capacidad de recarga del acuífero. En este sector desde el año 1983 ha tenido mayores salidas que entradas, excepto el año 1998, donde el nivel de almacenamiento fue positivo con más de 500 l/s.

Desde al año 2003 el balance hídrico denotó un aumento fuerte en las salidas y una disminución en la recarga llegando al año 2010 a un nivel de almacenamiento negativo de más 900 l/s debido que han existido periodos con baja precipitaciones llegando a nula en algunos años, como por ejemplo los años 1988, 1993, 1996, 2001, 2003, 2006, 2007 y 2012, lo cual afectaría la recarga del acuífero del sector 4.



**Figura 59.** Balance Hídrico sector 4 donde se localiza la comuna de Tierra Amarilla. Datos de la DGA en Vargas (2013). Para ver datos completos ver Anexo 6.



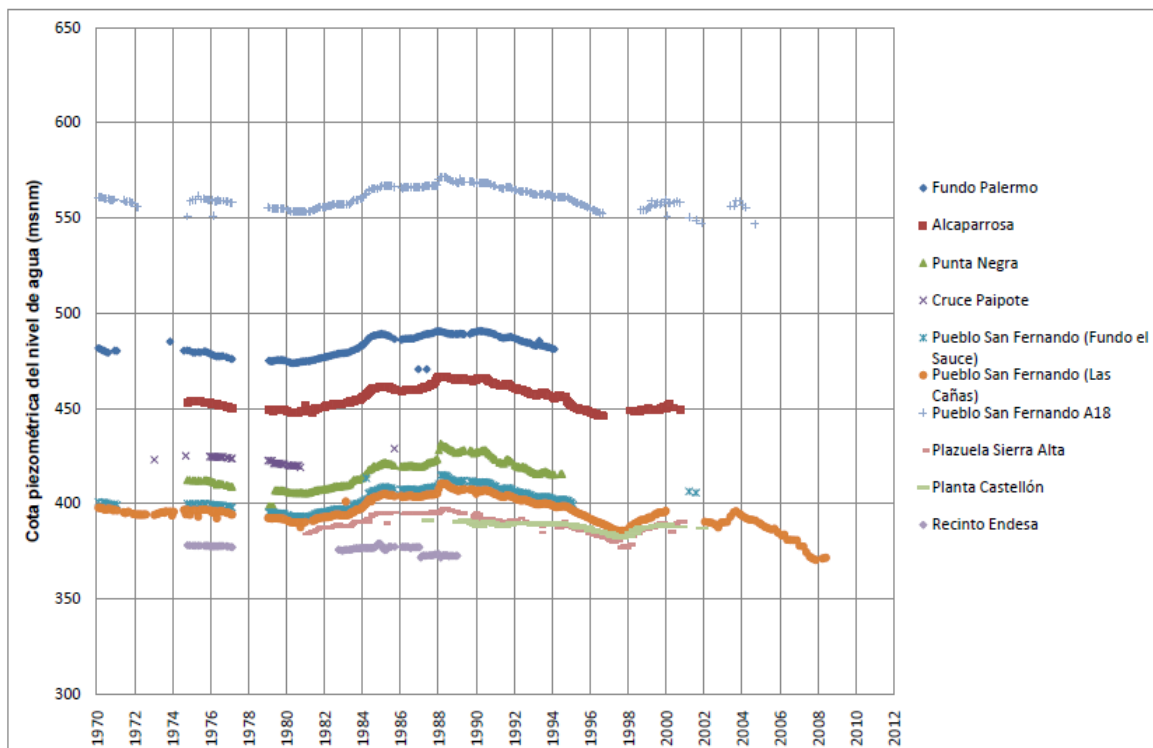
**Figura 60.** Uso de caudal otorgados en el acuífero del río Copiapó (VARGAS, 2013).

Según la Figura 60, las principales salidas del acuífero del sector 4 corresponden al uso de agua para riego con un 56%, donde este uso ha ido en aumento en los últimos años por el importante volumen de exportación de uvas, y labores mineras con un 18%, en donde también el uso del agua para las faenas mineras ha ido aumentando considerablemente para cubrir la demanda extranjera de cobre y que se ha exportado en los últimos años. En este último caso en relación a la minería, existe la posibilidad de que las faenas presentes alrededor del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla a medida que se sitúan a mayor profundidad obligarían a disponer mayores volúmenes de agua extrayéndola en forma de bombeo para el proceso productivo (HAUSER, 1988).



En el trabajo de AGUIRRE (1999) se expone una tasa de descenso del acuífero entre el Embalse Lautaro y Piedra Colgada en la cuenca del río Copiapó de 1,75 – 4,5 m/año y si esta tasa se prolongara indefinidamente, el acuífero eventualmente podría desembalsar el agua disponible al cabo de 44 años a contar del año 1999 según este autor. Con este antecedente sumado a los anteriores en relación al balance hídrico, cabe la posibilidad que en el subsuelo existan intersticios con aire y/o vacíos en donde la superficie de la comuna de Tierra Amarilla haya colapsado generando las subsidencias observadas en las Figuras 3 y 4, además que en el futuro podría existir nuevos colapsos y asentamientos de la superficie producto de la gravedad, sismos naturales y tronaduras por faenas mineras que actuarían como detonadores si es que existen cavidades subterráneas.

Por otro lado, el comportamiento de los niveles de la cota piezométrica del nivel del agua en el sector 4 no registran variaciones significativas según la Figura 61 en los últimos 42 años hasta el año 2009 para el pozo de pueblo San Fernando. El pozo de Alcaparroza es el más cercano a las subsidencias y no presenta mayor variación entre los años 1974 y 2001. Para los años siguientes al 2001 no existen datos.



**Figura 61.** Niveles de agua subterránea en Sector 4 según nivel de cota piezométrica en pozos. El pozo de Alcaparroza es el más cercano a las subsidencias. (VARGAS, 2013).

#### 4.1.4 Estratigrafía y Sondajes Mecánicos

El área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se encuentra a una altitud promedio de 500 m.s.n.m. con ascenso de altitud hacia aguas arriba del río Copiapó. La diferencia en metros entre el suelo del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y su basamento rocoso es de 250 m en promedio (Figura 62), donde esta diferencia se presenta sobre los 500 m en el área de Paipote producto de la falla geológica inferida en el trabajo de AGUIRRE (1999).



**Figura 62.** Perfil para el basamento rocoso v/s cota de superficie sobre el fondo de valle en la cuenca de río Copiapó según la DGA (2003). En rectángulo rojo se encuentra el perfil de estudio para las subsidencias.

En estos dos niveles, el espesor que se encuentra entre la cota de superficie en el fondo de valle y el basamento rocoso, se producirían dos fenómenos que estarían provocando las subsidencias:

- El primero de ellos sería la disminución de niveles subterráneos de aguas que estaría en el espesor formado por los sedimentos fluviales y aluviales. En relación a los perfiles geomecánicos se muestran el tipo de granulometría y a cuántos metros se encuentra el basamento rocoso (Figura 83 del Anexo 2 y Figura 84 del Anexo 3). En el espesor granulométrico se encuentra el agua subterránea aunque puede el agua circular por grietas del basamento. En ese sentido, el potencial hídrico se encuentra sobre el basamento rocoso, en donde se localiza los depósitos fluviales y aluviales. Al bajar el nivel freático por extracción de agua en pozos, quedarían intersticios con aire, en donde esta situación podría provocar los colapsos verticales producto de la gravedad y/o peso de construcciones superficiales, además del peso de maquinarias como camiones de gran tonelaje que circulen en la superficie (HEIDARI *et al.*, 2011).
- El segundo de ellos sería el tipo de roca que se encuentra en el basamento rocoso

que podría presentar características de ser roca susceptible a disolución. La circulación del agua subterránea presente en los acuíferos del río Copiapó podría provocar la disolución de la roca al producir los procesos químicos de disolución, producto de la interacción de la roca y el agua de los acuíferos. En ese sentido, la estratigrafía donde han ocurrido las subsidencias presenta roca caliza según las Figuras 79, 80, 81 y 82 del Anexo 1 y de la Figura 85 del Anexo 3, en donde este tipo de roca es susceptible de disolución y por lo tanto producir subsidencias. Por lo tanto, como en el mismo caso anterior en relación a la disminución de agua subterránea, existe la posibilidad que la superficie de la comuna de Tierra Amarilla se asiente sobre los intersticios dejados por la disolución de la roca en los casos de las subsidencias localizadas a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y en el patio de una casa en el área urbana de esta comuna. Otra explicación para este proceso de kárstificación sería el intenso riego superficial en los viñedos donde el agua se infiltraría viajando aguas abajo llegando a un nivel donde se encontraría la roca caliza.

A continuación se presenta una descripción de los perfiles geomecánicos y estratigrafía de cada punto de subsidencias:

#### **A) Entrada área urbana de la comuna de Tierra Amarilla**

El Primer punto de subsidencia se localiza en la entrada área urbana de la comuna de Tierra Amarilla (Figura 3) en donde se observa a través de la simbología el área afectada por subsidencias todas ellas separadas a pocos metros de distancia. Las subsidencias se encuentran sobre una rotonda y sobre la vía local C -35. Las subsidencias en este sector se distribuyen en un área de depósitos antrópicos (rellenos).

En la Figura 83 del Anexo 2 se observa en forma más detalla un perfil de sondaje mecánico realizado por AGUIRRE (1999) localizándose este sondaje a unos 30 m de las subsidencias que se encuentran en la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. En el perfil geomecánico de la Figura 83 se observa que en la parte superior existe material arcilloso con limos y arenas con un espesor de 2 m. Luego una secuencia de bolones y ripios con alrededor de 5 m de espesor. Más abajo arenas y luego gravas con alrededor de 15 m. Continúa el perfil geomecánico con una secuencia de gravas con alrededor de 8 m de espesor. Inmediatamente se presenta una secuencia de gravas con una profundidad de 75 m la cual es la de mayor espesor de todas las secuencias. Luego se observa una secuencia con presencia de bolones con arcillas y limos con alrededor de 40 m de profundidad y luego una secuencia de gravas con 20 m de espesor llegando por último al basamento rocoso a unos 172 m de profundidad.

En el espesor, descrito recién los cuales corresponden a los sedimentos no consolidados y localizados anterior del basamento rocoso, podrían existir las subsidencias producto de acciones antrópicas (por ejemplo extracción de agua) y/o naturales (extensos periodos de sequías) mencionadas en los párrafos anteriores. En este punto de subsidencia no se encontró un perfil estratigráfico de la zona.

## **B) Patio de una vivienda localizado en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla**

El segundo punto de subsidencia se localiza en el patio de una vivienda en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla el cual corresponde a un área de depósitos fluviales y aluviales (Figura 21) con formación de suelo en la superficie (Figura 6C).

El Perfil Geomecánico de la Figura 84 del Anexo 3 es el más cercano a la subsidencia que se encuentra en el patio de una vivienda en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. En él se observa un espesor de 41 m el cual está formado por ripios, gravas y arenas. Es en esta zona donde se encuentra el potencial hidrogeológico del acuífero del sector 4. Después de los 41 m se encuentra el basamento rocoso. Al igual que en el punto de subsidencia anterior, en la zona anterior del basamento rocoso que corresponde al espesor de los sedimentos no consolidados, podría existir la subsidencia producto de acciones antrópicas (extracción de agua) y/o naturales (extensos periodos de sequías)

En la Figura 85 del Anexo 3 corresponde a una columna estratigráfica del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla cercana a la subsidencia del patio de una casa. En ella se observa roca caliza en la superficie y hacia abajo rocas volcánicas. Al existir roca caliza en esta área de subsidencia, podría existir la disolución de este tipo de roca la cual es susceptible al proceso de disolución físico – químico que provocaría las subsidencias.

## **C) Caserón minero localizado en la quebrada de Meléndez**

El Tercer Punto de Subsidencia corresponde al caserón minero localizado en la quebrada de Meléndez. La estratigrafía de la quebrada de Meléndez según la Figura 81 del Anexo 1 de los autores SEGERSTROM & RUIZ (1962) corresponde en la superficie a areniscas y tobas. A más profundidad, presenta roca caliza con alrededor de 150 m de espesor. A más de 170 m de profundidad presenta areniscas, lutitas y limolitas.

Otra columna estratigráfica que se localiza en la quebrada de Meléndez muy cerca de la subsidencia del caserón minero es la presentada por MARSCHIK (2001) en la Figuras 79, 80, 81, y 82 del Anexo 1. En ellas se observa la presencia roca caliza, rocas volcánicas con carbonatos y clastos de sílex en la parte superior. En la parte más profunda presenta limolita y sedimentos de hamatita. Sobre los 20 m de profundidad se encuentran dacitas alteradas y magnetitas en general.

En esta subsidencia podría existir proceso de disolución de la roca, ya que existe roca susceptible para ello (caliza), no obstante, los técnicos de minera PUCOBRE han señalado que la subsidencia fue provocada por el colapso de la roca subterránea no dando mayores detalles TVN (2013).

## 4.2 Tipo de suelo

Se describe en esta parte el tipo de suelo presente en el área de estudio debido a que según los niveles salinos en el suelo y la posibilidad de contacto con el agua podrían ocasionar subsidencias. Un ejemplo de esto son las subsidencias que se han producido en la comuna de Alto Hospicio descrito en el reportaje de LUZ (2016). El reportaje de LUZ (2016) y el informe del SERNAGEOMIN (2014) se presentan en el capítulo del Marco Teórico dentro del subcapítulo Relieves Kársticos. LUZ (2016) señala que en el año 2012 en la comuna de Alto Hospicio, al Norte de Chile, apareció un socavón de más de 12 m de profundidad y 1,5 m de ancho en el antejardín de una casa. En el sector de la Pampa, en esta misma comuna, apareció en agosto del año 2015 otro socavón de 3 m de profundidad y 2 m de ancho. El socavón más grande es el que se localiza en la población Santa Teresa el cual posee 30 m de profundidad y 216 m de ancho. Según LUZ (2016) en la comuna de Alto Hospicio existen 2.807 casa afectadas (Figura 40). Se asocia los socavones a filtraciones en la red de agua potable o en el alcantarillado lo cual provoca que con el contacto con el suelo salino de la zona produzca la disolución del suelo con la consecuencia que el suelo pierda fuerza, se hunda y surja un socavón (SERNAGEOMIN, 2014). A continuación se describen los suelos del área de estudio en la comuna de Tierra Amarilla para verificar si se estaría produciendo el mismo proceso que en la comuna de Alto Hospicio.

Los suelos de la comuna de Tierra Amarilla corresponden a la Serie Apacheta según Centro de Información de Recursos Naturales del Ministerio de Agricultura CIREN. La Serie Apacheta es un miembro de la familia Franca Gruesa sobre arenosa mixta, calcárea, térmica de los Typic Haplocambids (Aridisols) los cuales son típicos suelos de zonas áridas (CIREN, 2007).



**Figura 63.** Fotografías de suelos de la serie Apacheta (CIREN, 2007).

Los suelos de la Serie Apacheta ocupan una posición de terrazas remanentes con una topografía suavemente inclinada que, en algunos casos llegan a ser plana o casi plana. Son suelos muy estratificados que incluyen suelos enterrados, lo cual es frecuente en estos



suelos aluviales del Valle del río Copiapó. La textura del horizonte superficial puede variar entre franco arenosa, franco limosa, y franco arcillo arenosa y en profundidad las estratas pueden variar desde franco arcillosa hasta arenosa, incluso cambiando de posición dentro del perfil.

Los colores pueden variar entre el matiz 10 YR y el 7.5 YR. Se trata de suelos bien drenados, pero hay sectores imperfectamente drenados que pueden incluir sectores planos o ligeramente cóncavos. Es un suelo frecuentemente salino en el horizonte Ap y no salino en el horizonte B, fenómeno que estaría relacionado con problemas de manejo en el agua de riego (CIREN, 2007). Tabla de Propiedades Físicas y Químicas en Anexo 5.

### Características Físicas y Morfológicas del Pedón

**Profundidad de  
Horizonte de  
Suelo (cm)**

0 - 14 (Ap)	Pardo (7.5 YR 5/2) en húmedo; franco arenosa con grava fina; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo, friable, estructura de bloques subangulares finos y medios, débiles. Raíces finas y medias escasas; poros finos y medios abundantes. Fuerte reacción al ácido clorhídrico, en la matriz y filamentos. Límite lineal claro.
14 - 48 (B)	Pardo oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo; franco arcilloso arenosa; plástico y ligeramente adhesivo; estructura de bloques subangulares medios y finos, fuertes. Raíces muy finas, finas y medias abundantes; poros finos muy abundantes. Coprolitos escasos. Gravitas facetadas escasas. Reacción al ácido clorhídrico en filamentos de CaCO <sub>3</sub> horizontales y en la matriz. Límite lineal Abrupto.
48 - 60 (2C1)	Pardo oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo; arenosa gruesa; no plástico y no adhesivo; Raíces muy finas; poros medios y gruesos abundantes. Reacción ligera al ácido clorhídrico. Con gravitas facetadas y redondeadas, algunas meteorizadas y oxidadas. Límite lineal, abrupto
60 - 80 (3C2)	Pardo oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo, arenosa; no plástico y no adhesivo; macizo. Ligera reacción al ácido clorhídrico. Límite lineal, abrupto.
80 - 91 (4C3)	Variegado; arena gruesa. Raíces medias ocasionales. Gravitas redondeadas abundantes. Límite lineal, abrupto.
91 - 120 (SAb)	Pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2) en húmedo, arena francosa; ligeramente plástico y no adhesivo; estructura de bloques subangulares finos y medios, débiles. Raíces finas y medias comunes; poros finos y medios abundantes. Ligera reacción al ácido clorhídrico.

**Tabla 4.** Características Físicas y Morfológicas del pedón y/o horizontes de suelos según su profundidad en cm. CIREN (2007).

Existen suelos en el área de estudio del tipo calcáreo y bien drenado, por lo tanto existiría la posibilidad de que las subsidencias sean producto del contacto del suelo y agua. En el terreno realizado en febrero de 2016 se consultó si existen o existieron filtraciones de agua a través de cañerías en el área de subsidencia localizada en el patio de la casa, donde la respuesta de los habitantes de la casa fue que no. No obstante, existiría la posibilidad que las subsidencias se deban a la combinación del suelo y la circulación de agua subterránea en forma natural. En ese sentido, revisando una fotografía aérea del año 1962 realizado por la O.E.A. en Chile (Figura 57) se localizó el estero Punta del Cobre en el sector de minera Santos y minera Punta del Cobre a pocos metros de la subsidencia del patio de la casa, con lo cual cobra fuerza el proceso de subsidencia entre la combinación de suelo salino y agua.

### **4.3 Actividad sísmica en el área de estudio**

Como se mencionó en el subcapítulo referente a Subsistencia Inducidas por Sismos dentro del capítulo de Marco Teórico Conceptual, se explica que de manera general los sismos pueden producir subsidencias en una amplia área. Un ejemplo de ello fue el terremoto del 27 de febrero de 2010 de  $M_w = 8,8$  en el centro-sur de Chile que provocó alzamientos y subsidencias cosísmicas (QUEZADA *et al.*, 2012). En el litoral, entre las regiones de Valparaíso y O'Higgins, la línea de costa experimentó subsidencia cosísmica que provocó una disminución del ancho de las playas, profundización de ríos, sumergencia de barras litorales e inundación de vegetación y su desecación (QUEZADA *et al.*, 2012). En ese sentido, la zona norte de Chile, donde se encuentra el área de estudio, es influenciada por neotectonismo, representado por fallas activas reconocidas como el Sistema de Falla de Atacama (Figura 65). Esta zona de falla activa corresponde a un área continua de 1.000 km de longitud en la Cordillera de la Costa que se extiende desde Iquique a los 20° de Latitud Sur hasta La Serena a los 30° de Latitud Sur, la cual desarrolla deformación por levantamiento vertical, con extensión horizontal producida por fallamiento normal (THOMAS, 1980).

En relación a la licuefacción inducida por sismos, los terrenos susceptibles de experimentar licuefacción correspondan a suelos formados por sedimentos no consolidados, de baja a nula compactación y saturados de agua. Por lo tanto, se trataría principalmente de arenas depositadas en ambientes fluviales, eólicos, litorales y en menor medida aluviales (FALCÓN *et al.*, 2010).

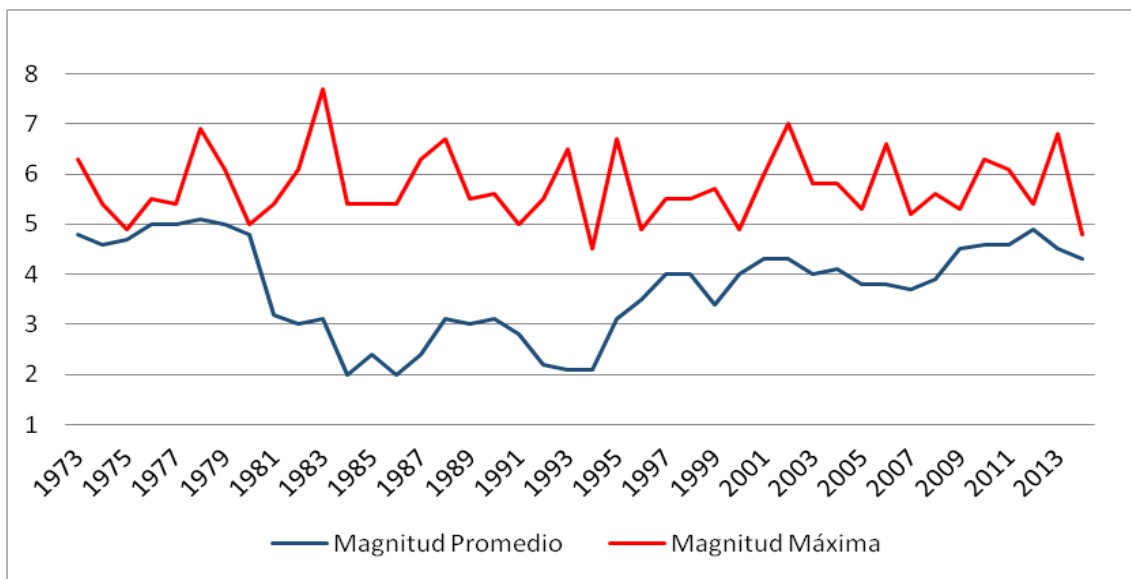
A continuación se revisa los antecedentes históricos en relación a los sismos de mayor magnitud con epicentro en la ciudad de Copiapó que se encuentra a 15 Km al N del área de las subsidencias, además de los sismos entre los años 1964 y 1995 localizados entre los 27° y 30° Latitud Sur con la profundidad y su magnitud, las fallas presentes en el área de estudio y sus alrededores en la región de Atacama, y por último la factibilidad de ocurrencia de licuefacción como el proceso detonador de la creación de las subsidencias que se presentan en esta investigación.

Sismos Históricos		
Ciudad	Año	Magnitud
Copiapó	1796	7,7
Copiapó	1819	8,3
Copiapó	1822	8,5
Copiapó	1851	7,1
Copiapó	1859	7,6
Copiapó	1918	8,2
Copiapó	1946	7,9

**Tabla 5.** Sismos históricos sobre magnitud 7,0 en la ciudad de Copiapó.

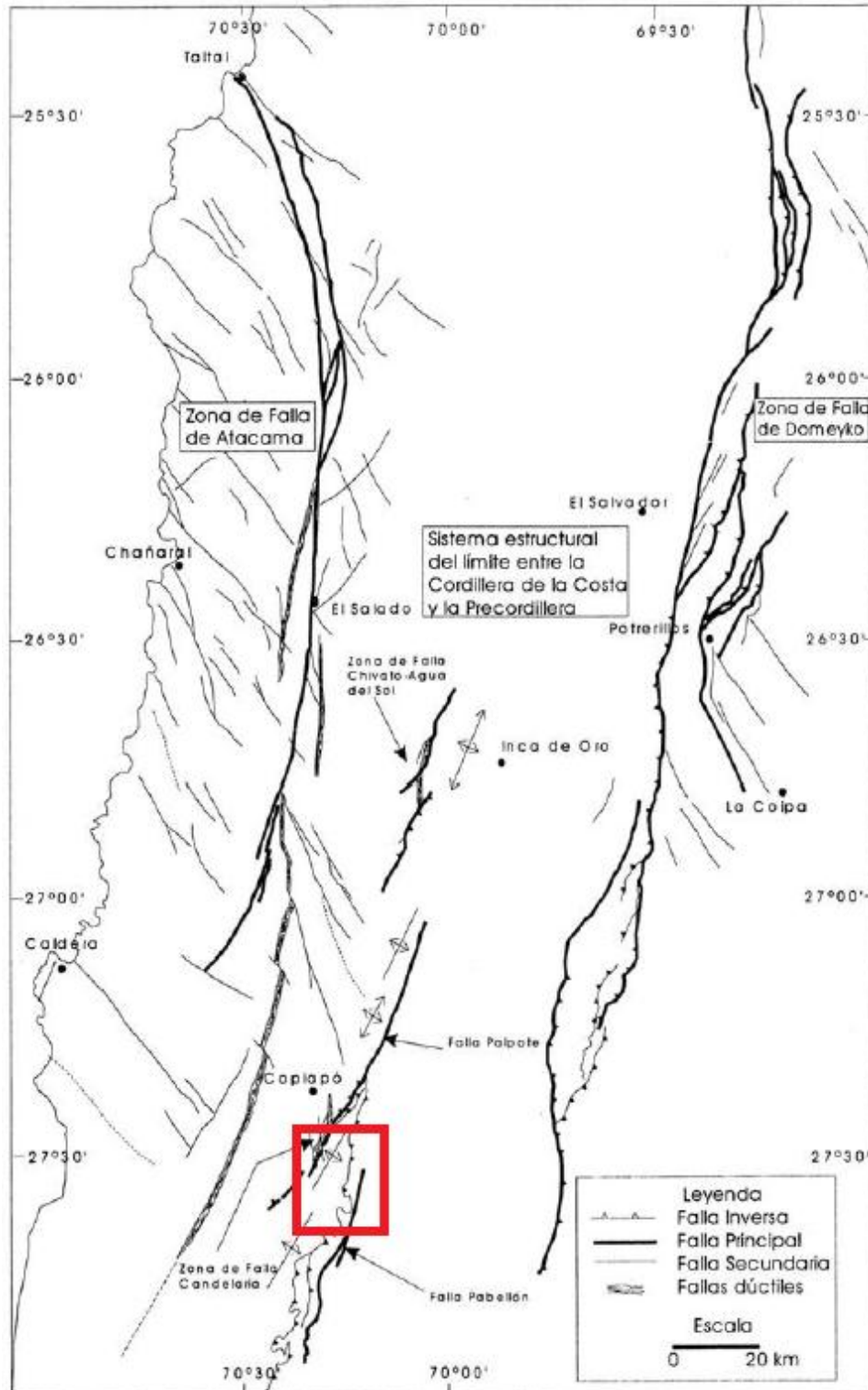
El área de estudio se encuentra cerca de la transición entre subducción que se sumerge hacia el este con un ángulo de aproximadamente 30° con una subducción geométrica subhorizontal (COMTE *et al.*, 2002). Esta zona presenta según la Tabla 5 sismos históricos sobre magnitud 7,0 en un periodo de recurrencia promedio cada 27 años. Este promedio es obtenido desde el año 1796 al año 1983 (este último año desde la Figura 64).

En la Figura 64 se observa la magnitud máxima y promedio de sismos entre los años 1973 y 2013 entre -26°S y -29°S y -68°O y -72°O. Entre estos años las magnitudes máximas oscilan entre 5 y 7,5° para esta zona.



**Figura 64.** Gráfico para la magnitud máxima y promedio de sismos para los últimos 40 años entre -26°S y -29°S y -68°O y -72°O (Fuente: Estaciones Sísmicas del Departamento de Geofísica de la U. de Chile.)

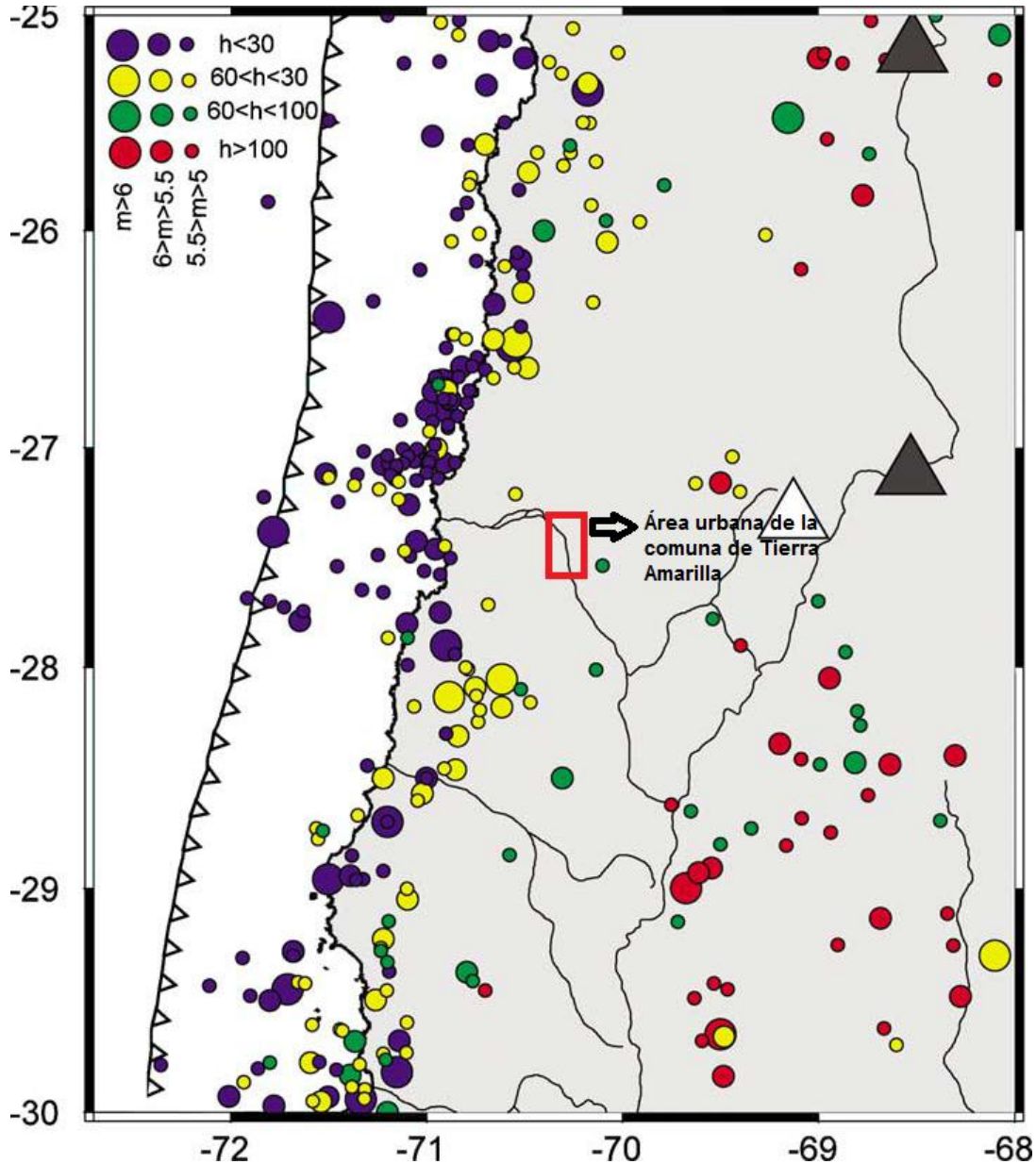
Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.



**Figura 65.** Mapa para las características principales estructurales de la región de Atacama (Arévalo & Grocott 2006). En cuadrado rojo área de estudio.

La mayoría de los sismos presentados en la Ciudad de Copiapó y sus alrededores que han sido registrados son eventos que exhiben una baja tasa de ocurrencia en el continente, con una tendencia a epicentros que se encuentran fuera de la línea de costa (COMTE *et*

al., 2002) lo que se aprecia en la Figura 66. No obstante, la presencia de sismos en los últimos 40 años entre los  $-26^{\circ}\text{S}$  y  $-29^{\circ}\text{S}$  y  $-68^{\circ}\text{O}$  y  $-72^{\circ}\text{O}$  es constante con magnitudes máximas para cada año entre 5,0 y 7,0 en general, con solo un sismo sobre magnitud 7,0 en el año 1983 (Figura 64).



**Figura 66.** Mapa que muestra la distribución epicentral de los sismos con magnitudes superiores a 5.0 registrados en distancias telesísmicas según el Centro Sismológico Internacional (ISC) entre 1964 y 1995. El tamaño de cada círculo es proporcional a la magnitud del terremoto ( $m$ ) y su color está relacionado con los diferentes intervalos de profundidad en km. Línea sombreada indica la posición de la fosa de contacto Interplacas (COMTE et al., 2002).

Como se ha explicado en este subcapítulo, el área de estudio entre  $-26^{\circ}\text{S}$  y  $-29^{\circ}\text{S}$  y  $-68^{\circ}\text{O}$  y  $-72^{\circ}\text{O}$  presenta sismos con magnitudes máximas sobre 5 en general desde año



1973 hasta el año 2013 y para fechas anteriores a 1973 han habido sismos con magnitudes desde 7,1 hasta 8,3 registrados en el área de Copiapó.

Debido al tipo de subsidencia que se estudia en esta investigación, las cuales tienen una geometría circular u ovaladas y con pocos metros de diámetro, con excepción a la subsidencia del caserón minero, se puede decir que los sismos naturales no estarían explicando por sí solo las subsidencias, ya que como se explicó anteriormente, estos sismos producen hundimientos en grandes extensiones del relieve y además alzamientos de la corteza terrestre, por lo tanto es poco probable que sea por sí solos los que provoquen las subsidencias.

La actividad sísmica y las distancias telesísmicas de los eventos registrados, exhiben una baja tasa de ocurrencia de terremotos continentales como se mencionó anteriormente, con una tendencia a epicentros que se encuentra fuera de la línea de costa (Figura 66), pero los de gran magnitud pueden, en condiciones adecuadas según el tipo de suelo, ser percibidos a grandes distancias, por lo cual el riesgo persiste debido al posible asentamiento o hundimiento del suelo inducido por sismos que hagan compactar el suelo y por lo tanto colapsar repentinamente las cavidades subterráneas no detectadas que puedan existir producto de disolución de la roca, disminución de niveles subterráneos de agua u otro proceso que se haya presentado en la zona de las subsidencias.

En relación a la licuefacción inducida por sismos, el área de estudio es una zona que posee un suelo de tipo Franco Grueso sobre arenosa mixta, calcárea, térmica de los Typic Haplocambids (Aridisols) los cuales son típicos suelos de zonas áridas (CIREN, 2007). Por lo tanto, al ser una zona árida el área de estudio, la saturación de agua es poco probable, además para el año de las subsidencias (2013) hubo periodos sin lluvia (2006 – 2009, 2012 – 2014) que antecedieron a las subsidencias y el balance hídrico según la Figura 59 es negativo con lo cual la saturación con agua en el suelo tiene poca probabilidad, además el río Copiapó se ha presentado si escorrentía superficial durante un periodo aproximado de 15 años hacia atrás desde la fecha de aparición de las subsidencias, no obstante no está verificado los niveles subterráneos de agua en el área de estudio, aun así, las subsidencias no se presentaron a través de volcanes de arena que podrían haber ascendidos hacia la superficie como es típico en los procesos de licuefacción, lo cual esto último fue consultado a el encargado de emergencia de la Municipalidad de Tierra Amarilla y al dueño de la casa en donde apareció la subsidencia.

En definitiva, con estos antecedentes es poco probable que se haya producido el proceso de licuefacción en el área de las subsidencias. No obstante, podría ser factible el fenómeno de licuefacción en algún punto de subsidencia en el cual haya habido una descarga de agua subterránea en una zona con rellenos antrópicos o naturales saturados de agua, en donde el detonador de la subsidencia a través de la licuefacción, sería tronaduras mineras y/o sismos.

#### **4.4 Tronaduras Mineras**

En relación a las tronaduras por parte de las mineras, estas suceden en el transcurso del día, programadas y anunciadas por la radio local de la comuna de Tierra Amarilla. Las magnitudes de ellas no se encuentran disponibles con datos registrados, aunque es factible que existan registros por parte de las mineras existentes en la zona, pero no se obtuvo acceso a aquellos datos. No obstante, los sismos son perceptibles por los habitantes del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla según consultas realizadas en terreno.

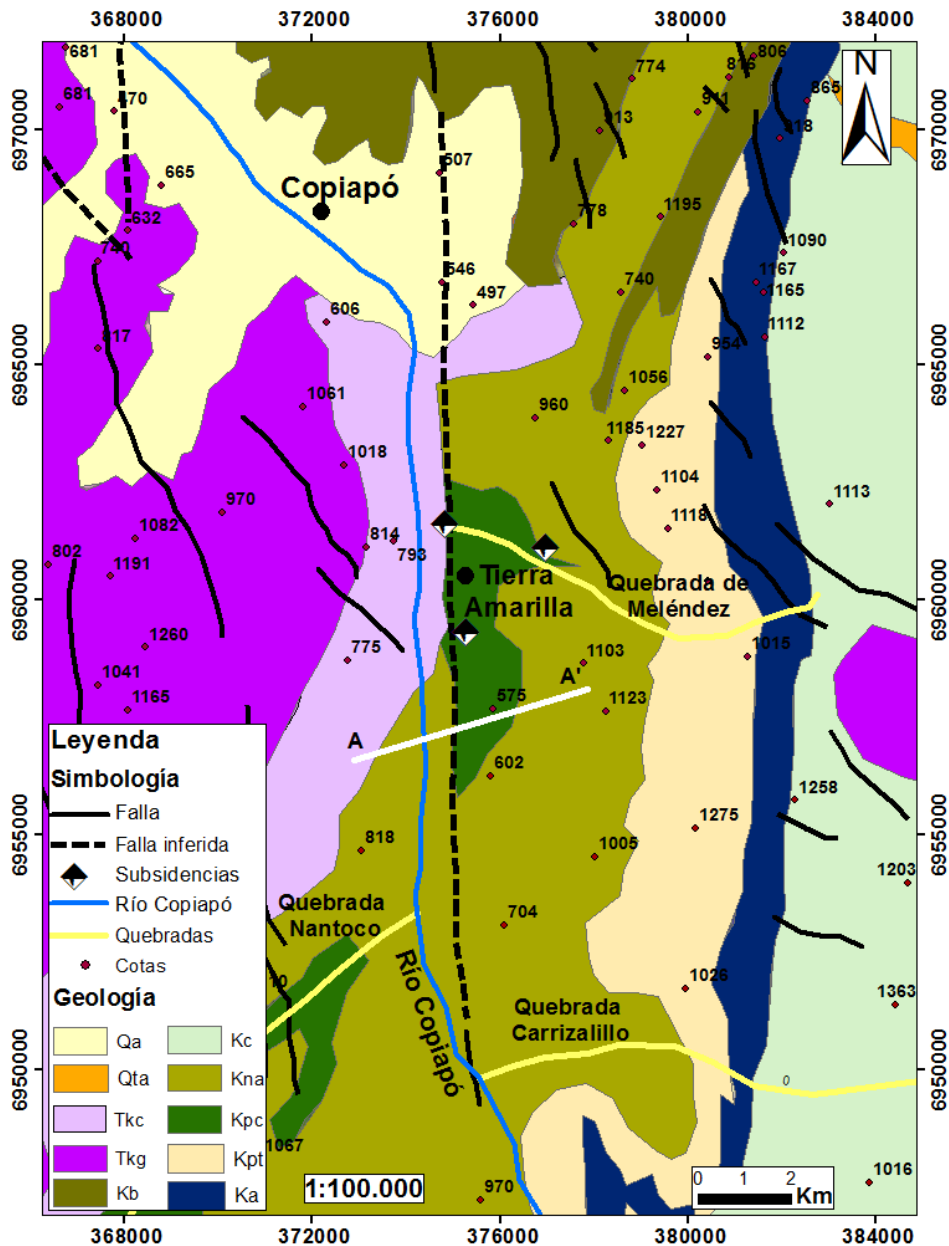
Las tronaduras por parte de las mineras son frecuentes en la zona como se mencionó en el párrafo anterior, pero no es posible atribuir las subsidencias y las grietas presentes en las casas en un cien por ciento a estos sismos antrópicos, pero es indudable que este factor aumenta el riesgo de un asentamiento mayor del suelo si existen cavidades no detectadas tal como se mencionó en el caso referente a la actividad sísmica natural, como un detonador de las subsidencias. Por otro lado, las grietas en las casas podrían deberse al desnivel del terreno en los alrededores de las subsidencias tal como son los casos en las Figuras 34 y 38.

#### **4.5 Sistema de fallas bajo la cuenca de río Copiapó**

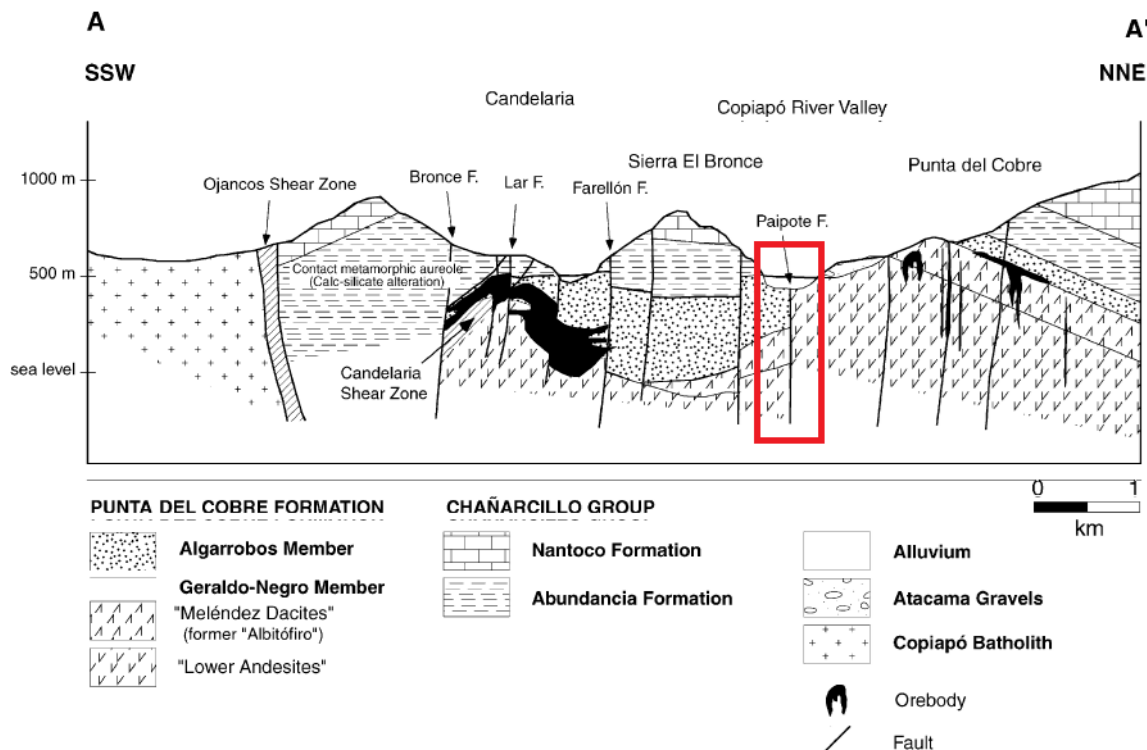
En general, la subsidencia de una cuenca se asocia a movimientos tectónicos de una falla en la componente vertical y a la acumulación y compactación de los sedimentos que se encuentran en la superficie y en la subsuperficie de la cuenca. Cuando la red fluvial se adapta a lineamientos de falla, diseña trazados angulados, paralelos y/o rectangulares a la cuenca (BURBANK & ANDERSON, 2005). En la Figura 53, donde el área de estudio de esta figura corresponde a la región de Linares en España, se observa que las cavidades subterráneas se correlacionan con las fallas existentes. En ese sentido, la cuenca del río Copiapó es acompañada por una falla normal inferida según el trabajo de SERGESTROM (1967). Esta falla inferida por SERGESTROM (1967) localizada en la Figura 67 (línea punteada paralela al río Copiapó) nace al Norte de la ciudad de Copiapó y terminan en Totalillo al Sur del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. La falla tiene hundimiento del bloque Oeste (SERGESTROM, 1967). Esta falla inferida reafirma su existencia en el perfil de la Figura 68. Como se mencionó anteriormente, la falla normal inferida en la cuenca sigue en forma paralela al río Copiapó según se puede observar en la Figura 67, por lo tanto, la cuenca del río Copiapó se encontraría sobre una falla la cual podría tener incidencia en las subsidencias producidas en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Cabe destacar que las fallas generalmente no son puramente normales, inversas o de rumbo. Es muy común observar fallas con algún tipo de combinación, por ejemplo, a lo largo de California, el famoso sistema de fallas de San Andrés tiene un 95% de rumbo, pero cerca de un 5% del movimiento corresponde a una falla inversa (COMTE, 2012).

Con lo mencionado en el párrafo anterior, la génesis de las subsidencias localizadas en la entrada del área urbana y el patio de una casa en la comuna de Terra Amarilla estarían detonadas por la posible expansión de la falla inferida por SERGESTROM (1967) producto

de los movimientos de los bloques de la misma y así quedando espacios vacíos dejados por el movimiento de la falla (ver Figura 49) y que provocarían la compactación vertical del material que se encontraría entre los bloques de la falla y en la parte superior de la cuenca del río Copiapó, donde se encuentra el material fluvial y aluvial. Este material descendería para ocupar el espacio dejado por el movimiento de la falla, con lo cual en la superficie del terreno aparecerían las subsidencias detectadas el año 2013.



**Figura 67.** Mapa geológico de Copiapó y Tierra Amarilla. Modificado de SEGERSTROM (1967).



**Figura 68.** El perfil A – A' corresponde al trabajo de MARSCHIK (2001), el cual se localiza en la cartografía del Anexo N° 4 y también localizada en la Figura 67. En rectángulo rojo se observa una falla que subyace a la cuenca del río Copiapó.

Con el aluvión del año 2015, si existieran vacíos entre los bloques de la falla, lo más probable que estos vacíos hayan sido rellenos subsuperficialmente y superficialmente por el material del aluvión que descendió desde aguas arriba de la cuenca del río Copiapó. Este aluvión se describe a continuación.

#### 4.6 Procesos aluvionales y la inundación de Tierra Amarilla asociado a las lluvias torrenciales de marzo de 2015 y su incidencia en la cuenca del río Copiapó

Se incluye en esta investigación el proceso aluvional acontecido en marzo de 2015 para ver la posible incidencia en el relleno de la cuenca y en la falla inferida en la cuenca del río Copiapó basado en un resumen realizado para XIV Congreso Geológico Chileno. El trabajo completo se puede revisar en el Anexo 9.

#### Procesos aluvional

Los aluviones e inundaciones en el norte de Chile están generalmente asociados a periodos de lluvias cortos e intensos de verano que se desarrollan en la alta cordillera de los Andes (SEPÚLVEDA *et al.*, 2014). El evento aluvional ocurrido en la cordillera de la Región de Atacama en el mes de marzo de 2015, no se habría generado por este tipo de fenómeno; según GARREAUD (2015) dicho fenómeno correspondió a un tipo de tormenta que no es tan frecuente y que se denomina baja segregada. Esto se desarrolla

esencialmente debido a un núcleo de aire frío en altura que se desprende del flujo principal de los vientos del Oeste y que se enfrenta con masas de aire cálido y cargadas de mucha humedad que vienen desde la cuenca amazónica (GARREAUD, 2015). En ese sentido, los flujos de detritos provenientes de la quebrada Carrizalillo (Figura 69A) y su distribución geomorfológica produjeron un entrapamiento del río Copiapó y luego una post – apertura del cauce provocando varios puntos de desborde del río e inundación en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, todo esto asociado al evento de lluvias intensas del 24 - 26 de marzo del año 2015 en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo.

A raíz de estas lluvias se desataron una serie de flujos de detritos que se acumularon en la confluencia de la quebrada Carrizalillo con el río Copiapó (Figura 69 A), distante 6,6 km aguas arriba de la comuna de Tierra Amarilla.

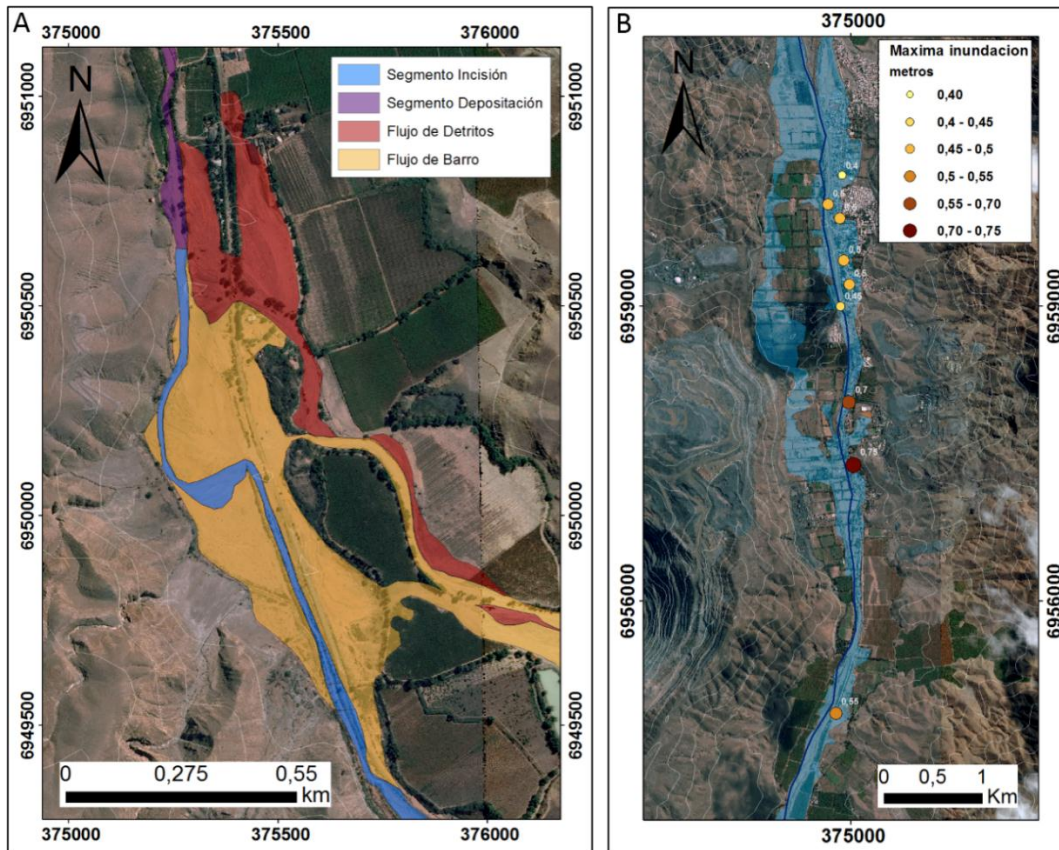
La inundación del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla tiene una implicancia natural y antrópica (Figura 69 B). En relación a lo natural, las intensas lluvias en un corto lapso de tiempo, la cual se asocia a la activación de quebradas tributarias de la quebrada Carrizalillo. Por otra parte, el espesor de las coberturas de coluvios en las laderas de alta pendiente, tienen la característica de ayudar a detonar procesos erosivos. Lo anterior fomentado debido al clima árido y al largo tiempos de exposición de las unidades geológicas a la meteorización, predisponen un escenario propicio para el transporte de un gran volumen de material.

Los caudales sedimentarios produjeron un flujo con un volumen que superó el área del talweg y originó una acumulación en la intersección de la quebrada Carrizalillo y el río Copiapó. Este flujo de barro y detritos también se le unieron la basura acumulada en las cercanías de las quebradas y del río Copiapó. Ante esto el Puente Cerrillos, ubicado en la intersección del río Copiapó y la quebrada Carrizalillo, además del puente localizado en la intersección de la ruta C -35 y C – 397 en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se taponearon con el flujo de detritos, en donde estos entrapamientos según BÖRGEL (1987), generan lagos de barrera los que prontamente se rompen reiniciando la marcha del aluvión, con lo cual el escurrimiento de los flujos fue hacia los caminos y casas. En ese sentido, el aluvión llegó al área de las subsidencias que se encuentra en la entrada Norte del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla (Figura 3). En la Figura 70 se observa esta subsidencia post evento aluvional de marzo del 2015.

La subsidencia localizada en el patio de una casa en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla no resultó afectada por el aluvión superficialmente ni tampoco el área de la quebrada de Meléndez donde se localiza la subsidencia del Caserón Minero. La implicancia de este aluvión fue el aumento del nivel freático, y el posible relleno de cavidades, si es que existen, por material transportado desde aguas arriba de la cuenca de río Copiapó.



Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsidencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.



**Figura 69.** A: Distribución espacial del flujo de detritos y barro en la confluencia del río Copiapó y la quebrada Carrizalillo. B: Mapa de inundación y puntos de máxima inundación en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.



**Figura 70.** Imagen de la subsidencia a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla post evento aluvional de marzo del 2015.

#### **4.7 Minería en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla**

La comuna de Tierra Amarilla presenta antecedentes sobre subsidencias producto de faenas mineras, por lo cual es inevitable pensar la injerencia de ellas en los hundimientos, pero para una comprobación se requieren los datos de ubicación subterránea con su correspondencia en superficie de las labores mineras, en este caso Minera Alcaparroza, Minera Mantos de Cobre, Minera Santos y Minera Ojos del Salado. En ese sentido, si hay labores mineras bajo el área urbana de la comuna de tierra Amarilla, estas labores serían en el basamento rocoso, no el zona de relleno sedimentario fluvial y aluvial (Figura 56).

En relación a la posible extracción de mineral en faenas mineras y ejes y galerías subterráneas abandonadas por antiguas labores mineras, se localiza y describe la siguiente información:

##### **➤ Concesiones Mineras de Exploración:**

Las faenas mineras que se encuentran activas en las cercanías de las subsidencias y el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla se pueden observar en la Figura 1. En la Figura 71 se observa los Titulares de las Concesiones de Exploración en el área de las subsidencias según la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE). Los datos de localización de concesiones de exploración ha sido través del SERNAGEOMIN y el emisor de estas concesiones ha sido el Ministerio de Economía de Chile. Las concesiones mineras para exploración en el área de las subsidencias localizadas en la quebrada de Meléndez se encuentran en posesión por los titulares Minera Ojos del Salado y de Jesús Rojas Patino. Para las subsidencias que se localizan a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y la que se encuentra en el patio de una casa también la minera titular es Ojos del Salado.

##### **➤ Concesiones Mineras de Explotación:**

La Figura 72 se observa la Localización de Concesiones Mineras de Explotación (pertenencia) y los puntos de subsidencias. La subsidencia que se encuentra en la quebrada de Meléndez se encuentra en una explotación minera antigua al igual que la subsidencia en el patio de una casa en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Las mineras titulares en la explotación son SIm Estefanía y Minera Ojos del Salado respectivamente. La subsidencia que se localiza a la entrada del área urbana se encuentra en una explotación minera nueva y su titular es Minera Ojos del Salado. El área de concesión de explotación para Minera Ojos del Salado fue otorgada por el Ministerio de Economía de Chile y Ministerio de Bienes Nacionales en la explotación que se encuentra localizada en la subsidencia del patio de una casa. La misma minera, Ojos del Salado, también tiene explotación en la zona donde se ubican subsidencias en la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y esta concesión fue entregada por el Ministerio de Bienes Nacionales. La concesión de explotación para Minera SIm Estefanía, que se localiza en Quebrada de Meléndez, fue entregada por el Ministerio de Energía.

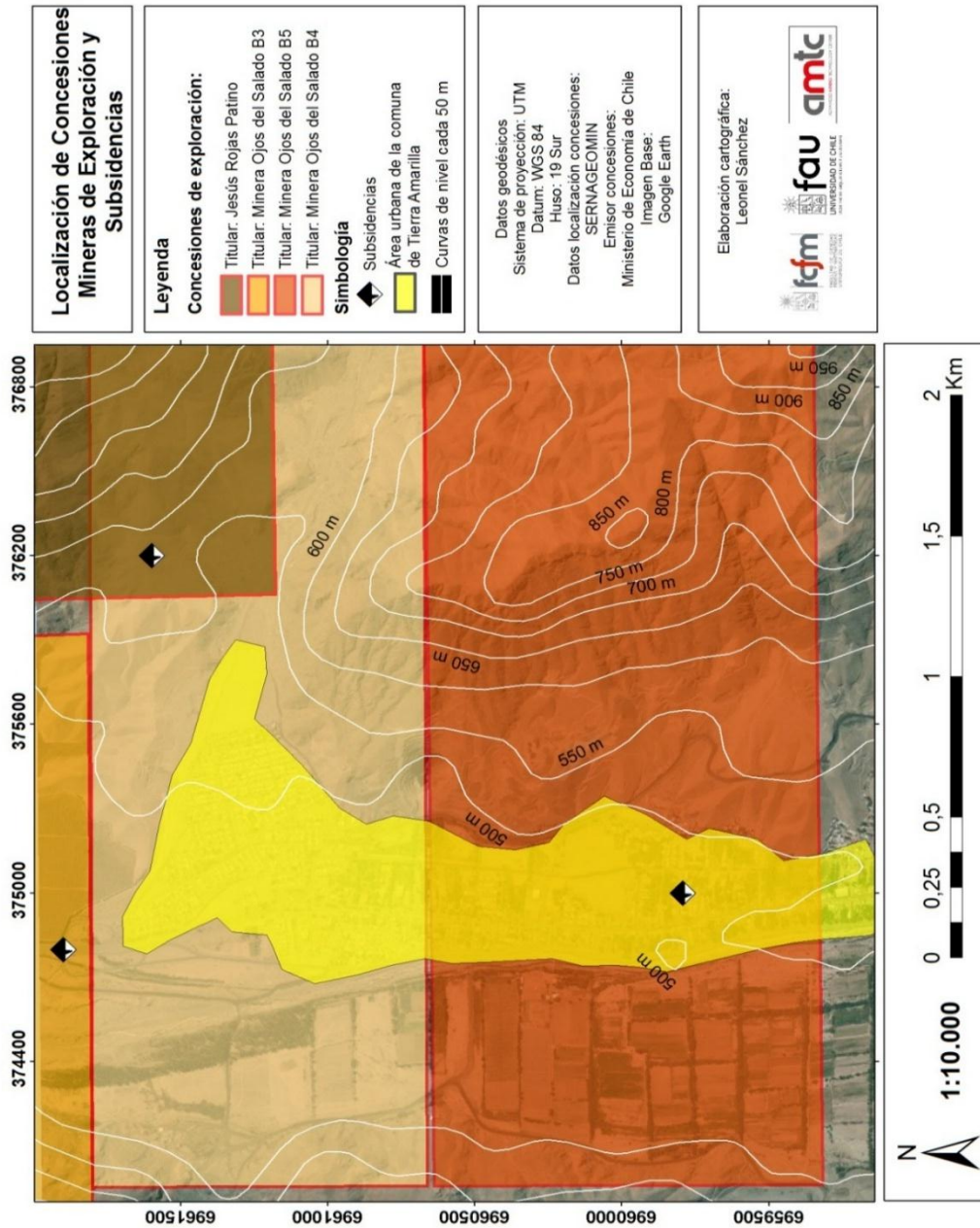
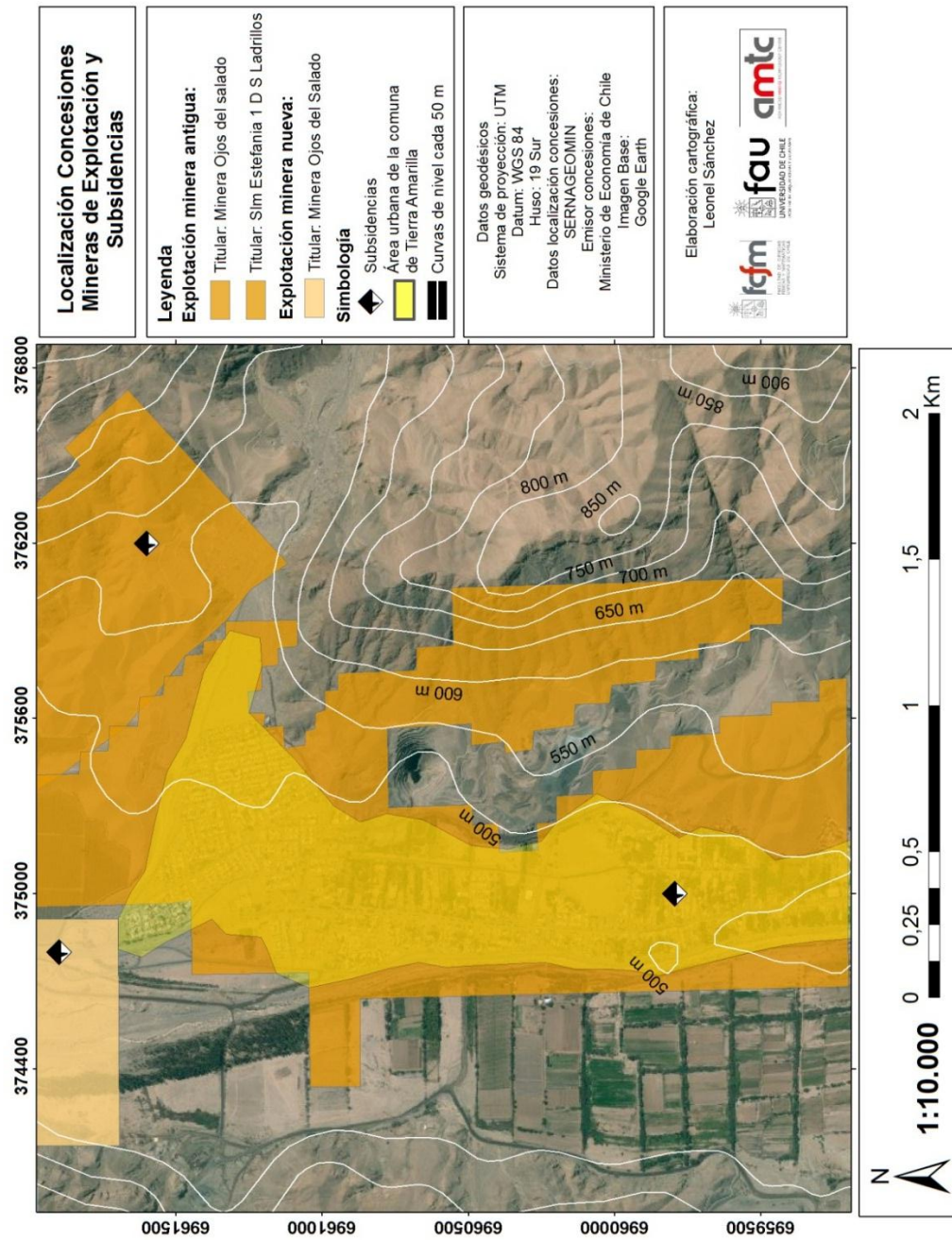


Figura 71. Cartografía de localización de concesiones mineras para exploración. Se localizan además los puntos de subsistencias.



Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.



**Figura 72.** Cartografía de localización de concesiones mineras para explotación. Se localizan además los puntos de subsistencia.

## **Galerías mineras abandonadas**

La Región de Atacama ha tenido un desarrollo histórico de la minería desde tiempos prehispánicos hasta nuestros días. El hombre atacameño se hizo así, de manera natural minero. Los pueblos de la Región de Atacama prehispánicos utilizaron los metales principalmente no para armas para la guerra o para manufacturar herramientas, sino para funciones en el plano simbólico y ritual (MUSEO CHILENO DE ARTE PRECOLOMBINO, 2005).

En ese sentido, no se ha logrado determinar en este trabajo si existen galerías subterráneas de labores mineras antiguas de tiempo Prehispánico o Colonial que subyacieran bajo el área de estudio. No obstante, en la actualidad las explotaciones mineras antiguas georreferenciadas por el SERNAGEOMIN corresponden a minera ojos del Salado y SIm Estefanía según la Figura 72. La faena minera de explotación nueva corresponde a Minera Ojos del Salado donde se ubica la subsidencia localizada en la entrada Norte del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla (Figura 72).

## **4.8 Combinación de factores**

Los factores analizados anteriormente en este trabajo podrían combinarse para producir el proceso generador de las subsidencias en el área de estudio. En ese sentido, según CARBONEL (2013) las subsidencias de terreno operan distintos mecanismos o factores de forma simultánea en relación a su origen.

Los factores que se sugieren en esta investigación según los antecedentes recopilados y que se podrían combinar para la generación de subsidencias son los siguientes:

- La disminución del agua subterránea reflejado en un balance hídrico negativo para los últimos años.
- El tipo de roca soluble, que en este caso sería roca caliza
- Los sismos tectónicos y tronaduras mineras
- Los periodos de sequía en la zona
- Las fallas existentes en la cuenca del río Copiapó
- La actividad minera subterránea antigua y nueva
- La circulación de agua subterránea

A continuación se desarrollan y describen las posibles combinaciones de factores:



➤ **Roca soluble, circulación de agua subterránea y sismos naturales y/o antrópicos**

Una combinación de factores detonadores de las subsidencias sería disolución de la roca producto del contacto del agua subterránea y roca soluble dejando así intersticios en donde la superficie del terreno colapsaría detonado repentinamente por sismos tectónicos o tronaduras mineras.

➤ **Disminución de agua subterránea, y sismos naturales y/o antrópicos**

Otra combinación de factores sería la disminución de agua subterránea, en donde, al bajar el nivel freático, quedarían intersticios vacíos, pues el agua ocupa un volumen en el subsuelo de la cuenca, entonces el material que este en la parte superior de los intersticios colapsaría en forma vertical, además detonado por sismos tectónicos o tronaduras mineras. En ese sentido, existen en el mundo ya la experiencia de subsidencias producto de esta combinación donde, la combinación de cavidades subterráneas más la actividad sísmica son peligros que afectan a algunas ciudades. En el trabajo de OVANDO-SHELLEY (2013) se dan indicios de esta situación, ya que según este autor, gran parte de la ciudad de México se ubica sobre depósitos de arcillas de origen lacustre de alta compresibilidad las cuales se han consolidado por efecto de la explotación de sus acuíferos. Por tal motivo, la ciudad está hundiéndose de manera diferencial y continuará haciéndolo en el futuro. Por lo tanto, al combinarse cavidades y sismos pueden generar más daño (OVANDO-SHELLEY *et al*, 2013). El mecanismo para tal situación de peligro es en primer lugar el cambio de las propiedades del subsuelo debido a la evolución futura de la presión de poro y en segundo lugar los incrementos de esfuerzos efectivos resultantes en la respuesta sísmica de los depósitos arcillosos de esta antigua zona lacustre en ciudad de México (OVANDO-SHELLEY *et al.*, 2013).

➤ **Roca soluble, disminución de niveles subterráneos de agua, y sismos naturales y/o antrópicos**

La combinación entre roca soluble y disminución de niveles subterráneos de agua también serían factores detonantes de las subsidencias. En ese sentido, si existe disolución de la roca quedarían espacios ocupados todavía por agua, pero al disminuir el nivel freático quedarían estos espacios solo con aire con lo cual el colapso de la superficie sería por gravedad, además, podría detonarse por sismos y/o tronaduras.

➤ **Falla geológica, disminución de niveles subterráneos de agua, roca soluble, y sismos naturales y/o antrópicos**

En relación a la falla normal inferida paralela al río Copiapó, esta falla podría expandirse dejando espacios entre los bloques de la falla, los cuales sumado además la disminución del nivel freático de la cuenca y/o la disolución de la roca, quedarían

espacios vacíos, con lo cual produciría el colapso vertical de la superficie, detonado además, por sismos y/o tronaduras mineras.

#### **4.9 Métodos de detección de cavidades**

##### **Métodos geofísicos**

Los métodos de detección de cavidades a través de dos técnicas geofísicas se mencionaron dentro del capítulo Marco Teórico Conceptual las cuales son:

- Radar de Penetración Terrestre
- Tomografía de Resistividad Eléctrica.

En ese sentido, uno de los objetivos particulares de la exploración geofísica es la de localizar escenarios geológicos potencialmente riesgosos para las actividades humanas tales como fallas geológicas activas (DEMANET *et al.* 2001, HEALY Y PRESS, 1969, BENSON Y FLOYD, 2000) y cavernas en el subsuelo (BUTLER, 1984, MILLER Y STEEPLES, 1991) con lo cual se localizarían áreas de riesgo de subsidencias.

En esta investigación no se logró aplicar ninguno de los dos métodos propuestos debido a su elevado costo.

##### **Análisis de tasas de subsidencias a través de imágenes satelitales**

En relación al análisis de tasas de subsidencias a través de imágenes satelitales, se mencionó dentro del capítulo Marco Teórico Conceptual que esta técnica es una forma para monitorear cambios en la superficie terrestre la cual consiste en la comparación de imágenes satélites en distintos momentos. Un ejemplo de ello son las imágenes de radar.

La técnica de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR) proporciona una herramienta para la vigilancia de hundimiento del terreno. En ese sentido, InSAR permite obtener topográfica de alta precisión y detectar microdeformaciones del relieve (ZHANG *et al.*, 2014).

La aplicación de esta técnica sería de gran ayuda para detectar microdeformaciones del relieve y así adelantar planes de acción en un área en donde se podría producir una subsidencia mayor, ya que probablemente antes de que colapso de mayor magnitud en el suelo habrían indicios de microdeformaciones en el terreno.

Lamentablemente al igual que en el caso de las dos técnicas geofísicas presentadas, tampoco se pudo aplicar el análisis de imágenes de radar debido a que estas imágenes son de un alto costo. No obstante, con todos los antecedentes recopilados a través de los objetivos propuestos y los resultados obtenidos, se procede en las siguientes páginas a realizar una ponderación de cada factor estudiado en esta investigación para obtener así una aproximación de cuál o cuáles factores serían los que estarían generando las subsidencias en el área de estudio, pero antes se presenta un mapa resumen con los factores estudiados.

#### 4.10 Mapa resumen de resultados obtenidos en la investigación

La Figura 73 corresponde a una cartografía resumen que incluye algunos de los factores que podrían estar ocasionando las subsidencias en la comuna de Tierra Amarilla.

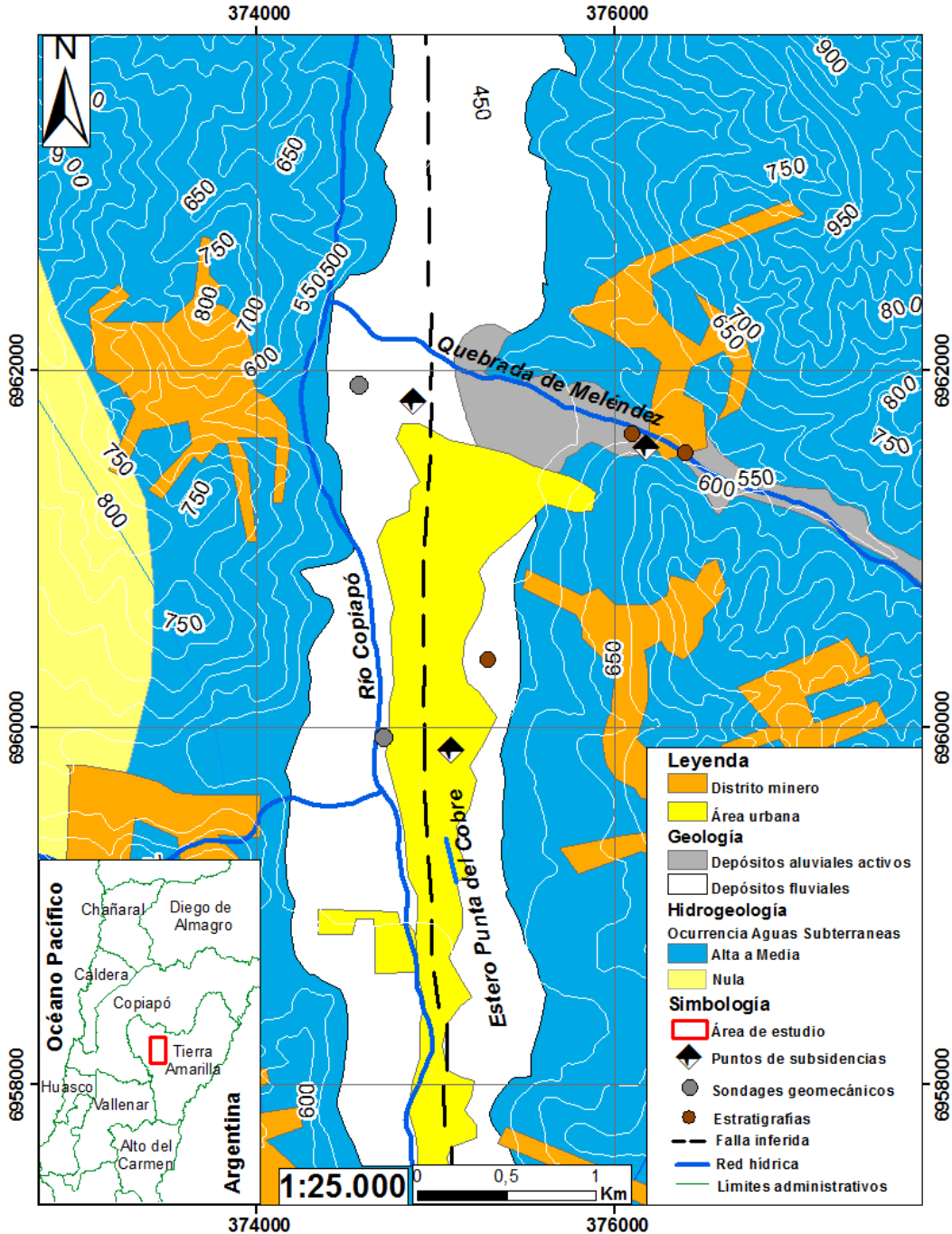


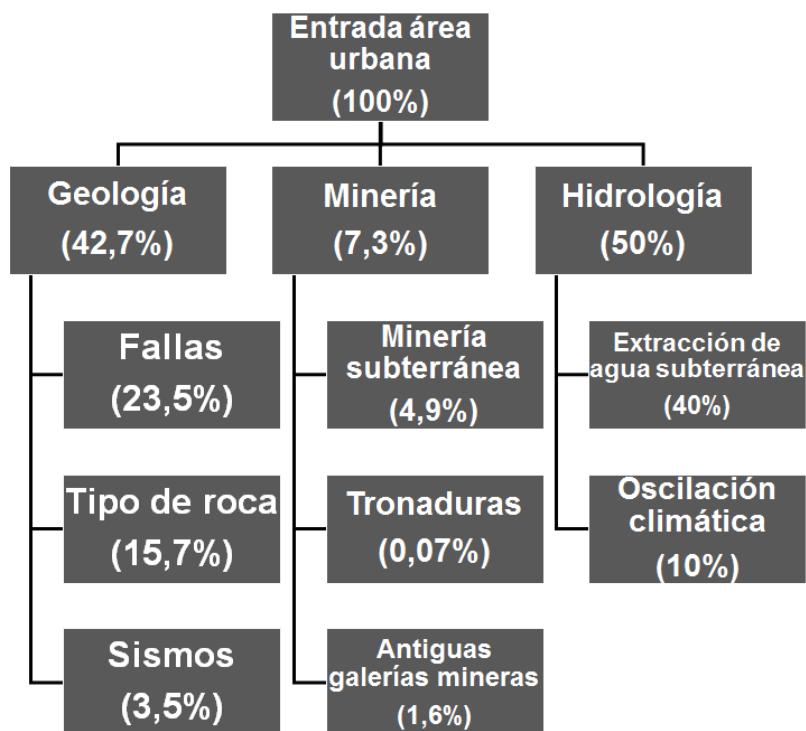
Figura 73. Mapa resumen que muestra los resultados de la investigación según los objetivos planteados.

#### 4.11 Resultado de ponderación de factores

Para cada punto de subsidencia han resultado diferentes ponderaciones ya que se ha evaluado según los antecedentes geológicos, hidrológicos y mineros para cada caso de subsidencia presentados previamente en los Resultados de este trabajo. Las ponderaciones obtenidas con el software Expert Choice son los siguientes:

##### 4.11.1 Entrada área urbana de la comuna de Tierra Amarilla

En la Figura 74 se presentan los resultados que estarían detonando la subsidencia en la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla

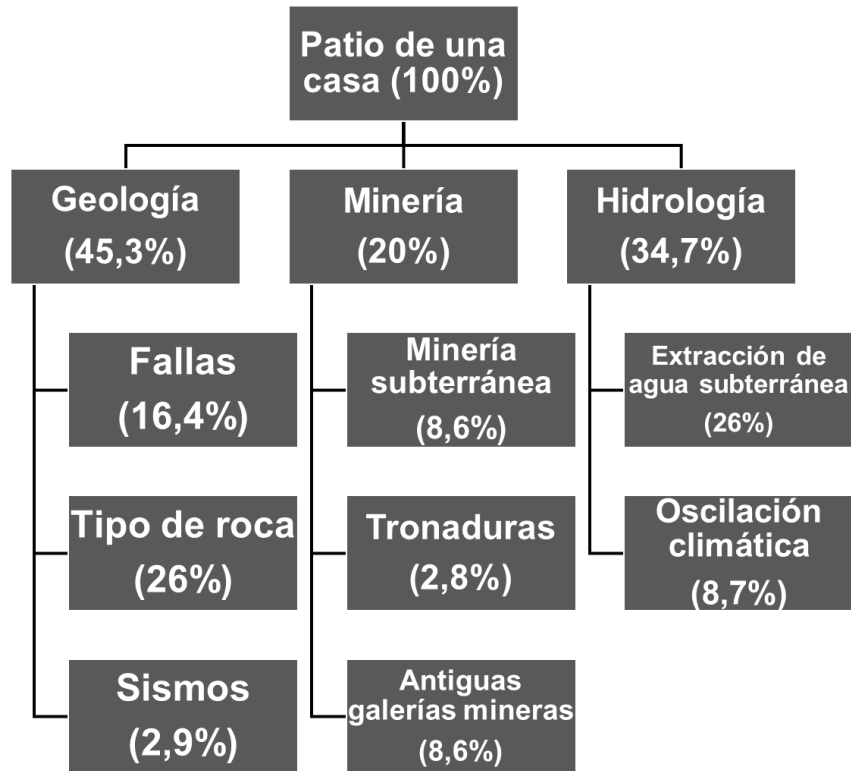


**Figura 74.** Resultados ponderación de la subsidencia en la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.

El peso más grande corresponde a los factores hidrológicos con un 50%, luego la geología del lugar con un 42,7% y por último los factores mineros con un 7.3%. Dentro del criterio de Hidrología se encuentra el sub-criterio de “Extracción de agua subterránea” el cual posee una alta ponderación con un 40% de participación, esto debido a que existen paños de cultivo muy cercanos a este punto de subsidencia, en donde la extracción de agua podría ser intensiva en los pozos que se encuentren en ese lugar. En segundo lugar, el criterio de Geología con su sub-criterio de “Fallas” posee un porcentaje de 23,5% de incidencia en las subsidencias de este punto, ya que la falla inferida que pasaría por debajo de la cuenca se encuentra muy cercana a la subsidencia de este lugar. En tercer lugar se pondera en un alto valor el sub-criterio de “Tipo de roca” perteneciente al criterio de Geología, donde este sub-criterio obtiene una valoración de 15,7% debido a la posible disolución de la roca caliza que existiría bajo la cuenca del río Copiapó ya que en las

cercanías existen mineras que extraen este tipo de roca delatando la existencia de este tipo de material rocoso.

#### 4.11.2 Patio de una casa



**Figura 75.** Resultados ponderación de la subsidencia en el patio de una casa.

Según la Figura 75, la subsidencia en este punto se estaría produciendo por fallas geológicas, tipo de roca o los factores hidrológicos según las ponderaciones resultantes en el software Expert Choice.

La existencia de un estero al S de la subsidencia en el patio de una casa hizo aumentar la ponderación en este punto, ya que este nuevo antecedente se recopiló al final de esta investigación. Es así que los criterios con mayor ponderación son los geológicos e hidrológicos. En ese sentido, la falla inferida pasaría muy cerca de esta subsidencia, sumado además el tipo de roca que podría existir en el subsuelo que podría corresponder a caliza que es susceptible a disolución por el agua subterránea circundante.

Como se mencionó anteriormente, la existencia de un estero cercana a la subsidencia del patio de una casa podría estar influenciando las subsidencias por una parte a la disolución de la roca susceptible a este proceso, y por otro lado, a la disminución de los niveles subterráneos de agua, y con esto dejar intersticios con vacíos, los cuales podrían hacer colapsar la superficie del terreno o en su defecto producir deformaciones del suelo y



construcciones antrópicas.

El factor de extracción de agua con un 26% de probabilidad se encuentra en un área urbana donde los paños de cultivo se localizan a más de 2 Km de distancia, no obstante la posible disminución del agua subterránea en este sector, posiblemente por largos periodos de sequías, refleja la alta ponderación de este factor. En esta misma línea, la filtración de cañerías de la red hídrica en la casa se descarta, ya que en la visita a terreno de febrero del año 2016 se hicieron las consultas respectivas a los dueños de casa y en donde en aquella visita se comprobó que no existen cañerías actuales que pasen en el suelo donde se produjo la subsidencia.

No existen antecedentes sobre antiguas galerías mineras en el lugar, por lo tanto se le otorgó una baja ponderación a este punto de subsidencia con un 8,6% de ponderación. Los sismos y tronaduras tienen menor ponderación, pero pueden ser ellos detonantes de las subsidencias existentes y además detonantes en el futuro si es que existen cavidades subterráneas que no hayan sido detectadas. Las ponderaciones para estos dos sub-criterios son 2,9 y 2,8% respectivamente.

#### 4.11.3 Caserón minero

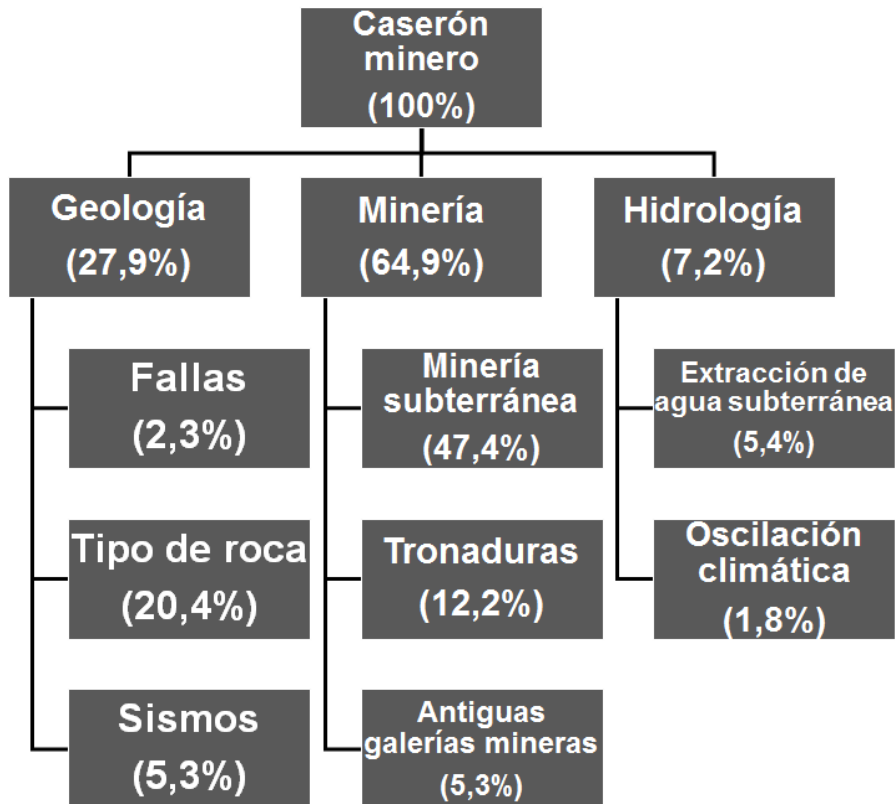


Figura 76. Resultados ponderación de la subsidencia en el Caserón Minero.

En la Figura 76 se observa la ponderación resultante en el punto de subsidencia Caserón minero. La subsidencia en este lugar ocurrió en terrenos de Minera Pucobre. En ese sentido la ponderación en relación al criterio de “Minería” es alto debido a que los técnicos de la minera Pucobre han comunicado que la subsidencia se produjo por “mala calidad de la roca”.

Los porcentajes al criterio de Minería después de haber ponderado según los antecedentes de esta área corresponden a un 64,9%, el cual se compone de un 47,4% al sub-criterio de Minería subterránea, un 12,2% a Tronaduras y un 5,3% a Antiguas Galerías Mineras. El criterio de Geología tiene un peso total de 27,9% que lo componen los sub-criterios de fallas con un 2,3%, el Tipo de roca con un 20,4% y Sismos con un 5,3% de ponderación. Los factores hidrológicos son muy poco probables que estén afectando a este punto de subsidencia. No obstante se le asignó un peso total de un 7,2%, el cual se compone de un 5,4% de Extracción de Agua y un 1,8% de Oscilación Climática (sequías).

## **CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES**

### **5.1 DISCUSIÓN**

En la investigación realizada en esta memoria se estudiaron distintos factores antrópicos y naturales que podrían haber causado las subsidencias en la comuna de Tierra Amarilla durante el año 2013. Luego de haber revisado esta misma problemática en distintos partes del mundo incluyendo Chile, se propusieron factores que podrían estar actuando en el proceso de creación de subsidencias en el área de estudio. En esta investigación ha existido una aproximación sucesiva a las posibles causas de las subsidencias, es así que queda abierta la posibilidad de que existan otras causas a la problemática presentada. No obstante, se encontraron datos de valiosa ayuda para realizar la ponderación de factores y así tener un acercamiento a qué factor o factores podría o podrían estar causando las subsidencias.

Algunos datos encontrados son por ejemplo el perfil geoelectrónico para ver el potencial hídrico de cuenca río Copiapó. En el balance hídrico revisado del área de estudio, se registra una disminución en las recargas y un aumento en la extracción de agua subterránea con lo cual podrían crearse intersticios en el subsuelo causando las subsidencias, no obstante, no se logró obtener el dato sobre los niveles subterráneos de agua. En los mapas geológicos se encontró la posible existencia de una falla que sigue la misma dirección paralela al río Copiapó, la cual pasa muy cerca de las zonas donde se produjeron las subsidencias. En los mapas geológicos nuevos no aparece esta falla. Hoy en día no se aprecia esta falla por la urbanización además debido al aluvión acontecido en la zona norte del país en el año 2015, en donde sobre este último tema, se logró hacer algunos comentarios en relación a las probables incidencias como es el posible relleno del subsuelo y a la falla inferida paralela al río Copiapó, además de recargar los acuíferos y rellenando posibles cavidades que pudieran existir.

Las subsidencias se han presentado sólo en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, siendo esta área bastante menor al área total de esta comuna. Por lo tanto, si las subsidencias han sido solo en el área urbana, cobra una gran relevancia los factores antrópicos en las causas de las subsidencias, ya que las actividades industriales establecidas a pocos metros del área urbana son de alto impacto y escala (minería y agricultura).

En relación a la industria minera, la región de Atacama ha sido históricamente una región minera, y posiblemente puedan existir túneles mineros antiguos antes que empezara la urbanización. En ese sentido, si existieran faenas mineras nuevas, es decir, después de la urbanización, esto sería ilegal por parte de la compañía minera que estuviera extrayendo mineral bajo un área urbanizada, ya que según el Código Minero Chileno que rige hoy en el país hace que cualquier lugar, a excepción de las áreas urbanas, sean susceptibles de concesión minera. En ese sentido, una limitación fue el hermetismo de las minas presentes alrededor del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla para entregar la georreferenciación de sus actividades mineras subterráneas a la comunidad.

## **5.2 CONCLUSIONES**

La ponderación de factores antrópicos y naturales que se han presentado en este trabajo para explicar el proceso que estaría provocando las subsidencias de terreno en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, ha permitido tener un acercamiento a esta problemática que ha mantenido a los habitantes de esta comuna preocupados por la posible ocurrencia de futuros asentamientos de terreno que podrían ocasionar daños a casas, caminos y posiblemente hacia las personas.

Se ha observado que las aguas subterráneas han disminuido resultando un balance hídrico negativo para los últimos años producto del aumento de la extracción por parte de la agricultura y minería presente en el área de estudio, además se agrava esta situación debido a los periodos de sequía vividos en la zona, lo cual ha obtenido una alta ponderación en las subsidencias de la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y en el patio de una casa, ya que este proceso quedaría reflejado en intersticios con aire a nivel subsuperficial del terreno, en donde la superficie podría haber colapsado en forma vertical producto de la gravedad y de los vacíos dejados producto de la pérdida de volumen de agua en el subsuelo.

La roca caliza presente en el área de las subsidencias puede tener una ponderación media en la subsidencia debido a la existencia de acuíferos, riego superficial y el estero Punta del Cobre que se encuentra muy cercana a la subsidencia del patio una casa. La circulación de agua provocaría la disolución de la roca a nivel subterráneo. La roca caliza se encuentra principalmente más cercana a puntos más elevados del área de estudio en la cercanías de la Formación Abundancia después de la gravas de Atacama, no obstante, en la columna estratigráfica revisada de la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla se encuentran estratos de roca caliza los cuales podrían incidir en la subsidencias debido a la posible disolución de este tipo de roca.

La existencia de una falla que sigue de forma paralela al río Copiapó al tener posibles movimientos extensionales entre sus bloques podría dejar espacios los cuales se rellenarían por el material que se encuentra en la parte superior de la cuenca y colapsarían producto de la gravedad, detonado por sismos y/o tronaduras mineras. Además, después de un sismo, el agua almacenada entre los labios de la falla podría filtrarse aguas abajo producto de los movimientos extensionales de la falla.

En relación a las faenas mineras, la subsidencia de terreno con la creación de un socavón en terrenos de minera Pucobre localizada en quebrada de Meléndez, es producto del colapso de un caserón minero, esto ha sido reconocido por técnicos de la minera Pucobre. Para las otras dos subsidencias localizadas a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y la generada en el patio de la casa de calle Manuel Montt, faltan los datos de ubicación subterránea con su correlación superficial vertical de las faenas de Minera Alcaparroza, Mina Santos, Minera Mantos del Cobre y Mina Punta del Cobre, las cuales son las que se encuentran más cercanas a estas dos subsidencias.

Posiblemente las subsidencias de terreno que han sucedido en la comuna de Tierra Amarilla pueden ser una combinación de todos los factores analizados en este trabajo, naturales y antrópicos, ya que por ejemplo la disolución de la roca por parte del agua circundante puede estar relacionado o agravado por la disminución de niveles de agua subterránea debido al bombeo para actividades agrícolas y/o mineras, y con esto, aumentando los volúmenes de intersticios con aire en el subsuelo y con la consecuencia del hundimiento del suelo. Otra combinación puede ser que la disminución de niveles subterráneos de agua, lo cual crearía cavidades en el subsuelo que incidirían en la subsidencia, aumentando así el peligro cuando se combina con sismos de subducción o de tronaduras de la industria minera donde estos dos últimos factores funcionarían como detonadores del colapso repentino de la superficie.

### **5.3 RECOMENDACIONES**

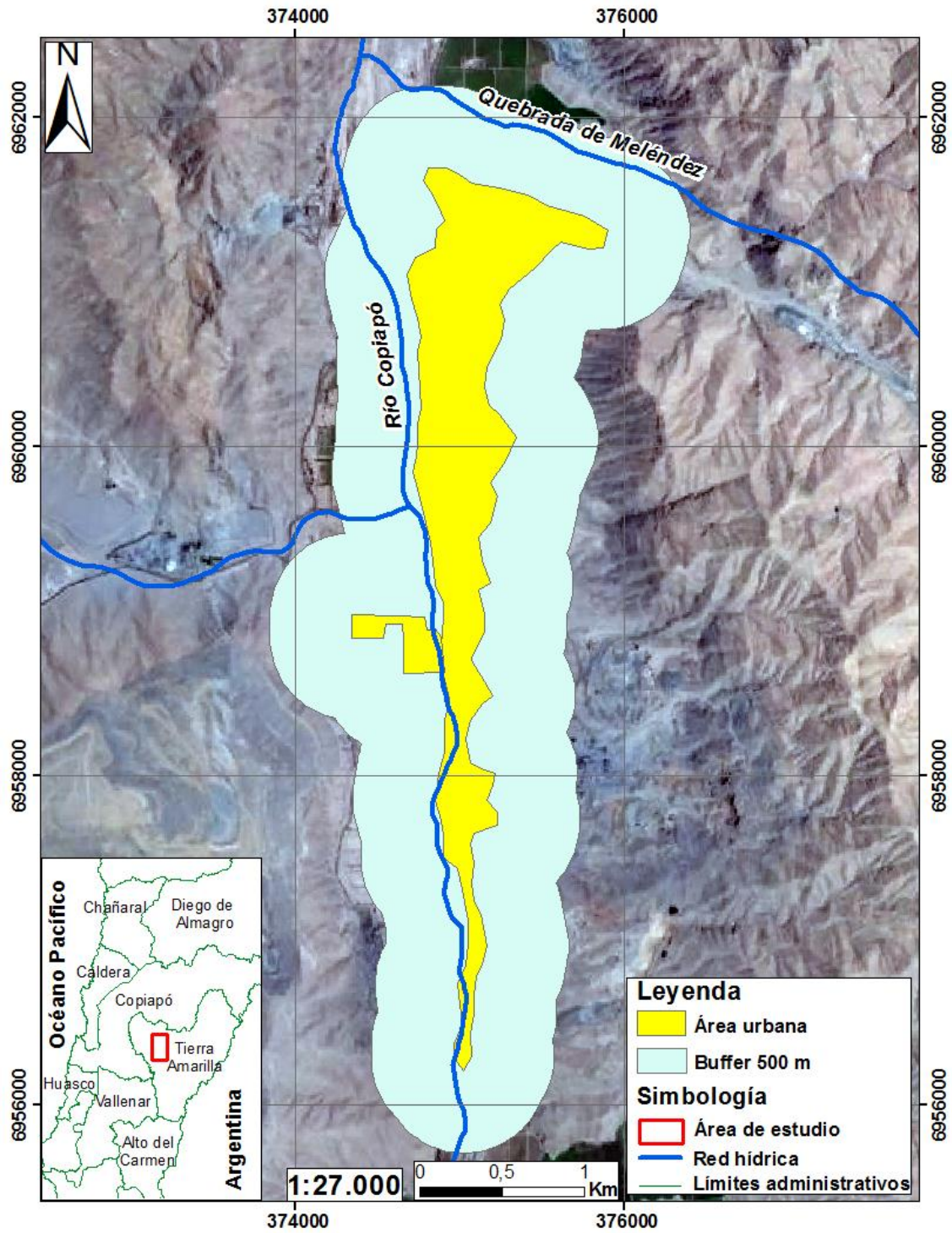
Luego de una mesa de dialogo, en donde participaron los habitantes del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y las autoridades de la comuna, se propuso que se realizaran estudios por parte de la consultora INGEOSAT y la Universidad de Atacama para verificar la existencia de cavidades subterráneas producto de labores mineras llegando a un noventa por ciento de seguridad de que no existen (PALMA, 2014).

En ese sentido, hay diez por ciento de probabilidad de que sí existen cavidades subterráneas, por lo tanto es imprescindible el poder tener una certeza y una seguridad total de que sí existen o no galerías subterráneas no detectadas en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla y para ello se recomienda aplicar al algún método de detección de cavidades y/o imágenes satelitales para verificar la existencia de intersticios subterráneos o tasas de subsidencias respectivamente. A pesar de su alto costo, es necesario aplicar alguna metodología de detección ya que el peligro en que se encuentran las personas sigue latente con aquel diez por ciento de probabilidad de que sí existan cavidades.

Por último, el aporte de esta investigación a través de la metodología aplicada permitió tener posibles explicaciones a las subsidencias que se han producido en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Con estudios geofísicos se podría tener certeza dónde existirían áreas de riesgos producto de cavidades subterráneas. En ese sentido, se propone un área de influencia (buffer) de 500 m alrededor del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla para la realización de estudios geofísicos (Figura 77). Con la información obtenida, se plantea crear mapas de zonificación de posibles áreas susceptibles de colapsos en la superficie producto de cavernas que se puedan detectar y así prevenir a las autoridades y a la población. Esta información referente a la zonificación de riesgos de subsidencias debería integrarse al Plan Regulador Comunal. Por último, se recomienda que las áreas urbanas estén a una distancia no menor a 500 m de faenas mineras.



Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.



**Figura 77.** Mapa con un buffer de 500 m de influencia para indicar una zona alrededor del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla que debería estar libre de socavones.

## **CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA**

AGUIRRE, I., 1999. Hidrogeología del Valle del Río Copiapó entre Tranque Lautaro y Piedra Colgada. Memoria para optar al Título de Geólogo y Tesis para optar al grado de Magister en Geología. Universidad de Chile.

ALANIZ, S., NIETO, A., OROZCO, M., VASSALLO, L., XU, S., 2002. El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: Implicaciones en la deformación post-eocénica del centro de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo lv, núm. 1, 2002, p. 12-29.

ARAYA – VERGARA, J.F. & BÖRGEL, R., 1972. Definición de Parámetros para Establecer un Banco Nacional de Riesgos y Amenazas Naturales. Criterios para su Diseño. ONEMI/PNUD Uchile/92/009/A. Chile. Pp. 219.

ARÉVALO, C., GROCCOTT, J., MARTIN, W.; PRINGLE, M., TAYLOR, G. (2006). Structural setting of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au deposit, Chilean Andes (27°30'S). Economic Geology 101 (4).

ARÉVALO, C. Y MPODOZIS, C., 1991. Tectónica del grupo Chañarcillo: una franja de cabalgamientos con vergencia al Oeste en el valle del río Copiapó, región de Atacama, Chile. En VI Congreso Geológico Chileno, Viña del Mar. P. 81 – 83.

AREVALO, C., 1994. Mapa Geológico de la hoja de los Loros (1.100.000). Región de Atacama. Documento de trabajo N° 6. Sernageomin. Stgo.

AREVALO, C., 1995. Mapa Geológico de la hoja de La Hoja de Copiapó (1.100.000). Región de Atacama. Documento de trabajo N° 8. Sernageomin. Stgo.

BAKALOWICZ, 1982. La genése de l'acuífère karstique vue par un geochimiste. Karst Larra 82; Publ.Serv.Geol.Dip.Navarra: 159-174.

BAUER, R., TRENT, B., DUMTELLE, P., (1993, 2006). Mine Subsidence in Illinois: Facts for homeowners. Illinois Department of Natural Resources. Circular 569, p. 20.

BELL, F., STACEY, T., GENSKE, D., 2000. Mining subsidence and its effect on the environment: some differing examples. Department of Geology and Applied Geology, University of Natal, Durban, 4041, South Africa Environmental Geology 40 (1-2) December 2000 7. Springer-Verlag.

BENSON A. K. Y FLOYD A. R., 2000. Application of gravity and magnetic methods to asses geological hazards and natural resource potential in the Mosida Hills, Utha County, Utha: Geophysics, vol. 65, no. 5, p. 1514-1526.

BIOBÍO, 2013. Atacama: Gran socavón en yacimiento preocupa a habitantes de Tierra Amarilla. [En línea], Radio Bio Bio en Internet. 25 de noviembre 2013. <http://www.biobiochile.cl/2013/11/25/atacama-gran-socavon-en-yacimiento-preocupa-a-habitantes-de-tierra-amarilla.shtml>

(Consulta: 5 de julio 2014)

BÖRGEL, R., 1987. Fotointerpretación: Cajón del río Colorado – un estudio del área de desastre en la Codillera de los Andes Centrales de Chile. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile.

BÖRGEL, R., 2015. Entrevista realizada personal. 15 de marzo 2015.

BURBANK, D. & ANDERSON, R., 2005. Tectonic Geomorphology. 4ª ed. Maiden: Editorial Blackwell Science, 2005.

BUTLER D. K., 1984. Microgravimetric and gravity gradients techniques for detection of subsurface cavities: Geophysics vol. 49, no. 7, p. 1084-1096.

CAMUS, F., 1980. Posible modelo genético para los yacimientos de cobre del Distrito Minero Punt del Cobre. Revista Geológica de Chile, Vol. 11, p. 51 – 76.

CARAMANNA, G. CIOTOLI, G., & NISIO, S., 2008. A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas. Natural Hazards, 45, 145–172.

CARVAJAL, A., 2008. “Fenómeno de Subsistencia en minería subterránea: Análisis del caso Zaruma y Portovelo, Ecuador” Programa Sigma. Escuela de Minas. Universidad de la Serena.

CARVAJAL, J., 2013. Tierra Amarilla: Crónica. Temor desde el bajo suelo. [En línea], 24 Horas (TVN) en Internet. 24 de julio, 2013. <http://www.24horas.cl/regiones/atacama/tierra-amarillacronica-temor-desde-el-bajo-suelo-760728>

(Consulta: 25 agosto 2014).

CARBONEL, C., 2013. Evaluation of trenching, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) for sinkhole characterization. Earth Surf. Process. Landforms 39, 214–227 (2014)

CENTRAL REGIONAL DE ATACAMA, 2013. Tierra Amarilla: Preocupación por nuevo hundimiento de terreno. [En línea] 24 Horas (TVN) en Internet. 25 de noviembre, 2013. <http://www.24horas.cl/regiones/atacama/tierra-amarillapreocupacion-por-nuevo-hundimiento-de-terreno-953339>

(Consulta: 25 agosto 2014).

COKER, A., MARSHALL, R., & THOMSON, N., 1969. Application of computer processed multispectral data to the discrimination of land collapse (sinkhole) prone areas in Florida. Remote Sensing of Environment, VI. (pp. 65).

COMTE, D., 2012. Fallas en superficie: Apuntes de clases. Curso de Formación General: Terremotos usos y abusos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

COMTE, D., HAESSLER H., DORBATH, L., PARDO, M., MONFRET, T., LAVENU, A., PONTOISE, B., HELLO, Y. 2002. Seismicity and stress distribution in the Copiapó, northern Chile subduction zone using combined on- and off-shore seismic observations

CORAPCIOGLU, M.Y. 1984. Land subsidence a state of the art review. Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. En: Bear and M. Y. Corapcioglu (Ed.), NATO ASI Series E.82, Martinus Nijhoff Publishers, 369-444 Chang, L., Hanssen, R. 2014. Detection of cavity migration and sinkhole risk using radar interferometric time series. Remote Sensing of Environment 147 (2014) pp. 58.

DALZIEL, I.W.D., 1981. Back arc extension in the southern Andes, a review and critical reappraisal. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. A300, p. 319 – 335.

DECK, O., 2002. Etude des consequences des affaissements miniers sur le bâti. Doctorate thesis, INPL University, Nancy, France.

DECK, O., VERDEL, T., SALMON, R., 2009. VULNERABILITY ASSESSMENT OF MINING SUBSIDENCE HAZARDS. Risk Analysis, Vol. 29, No. 10, pp. 1382.

DEMANET D., RENARDY F., VANNESTE K., JONGMANS D., CAMELBEECK T. Y MEGHRAOUI M., 2001. The use of geophysical prospecting for imaging active faults in the Roer Graven, Belgium: Geophysics, vol. 66, no. 1, p. 78-89.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad en la cuenca del río Copiapó. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Pp. 4.

FALCÓN M.F., RAMÍREZ P., 2012. "Generación de mapas de licuefacción a partir del sismo de Febrero de 2010". En: VII congreso Chileno de Geotecnia. 28 al 30 de Noviembre de 2012. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción y Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN.

FARACO, C., 1975. Estudio del colapso de la estructura de los limos yesíferos. Revista de Obras Públicas 3127, 776–790. España.

FARRAR, E., CLARCK, A. H., HAYNES, S.J., QUIRT, G., CONN, H., ZENTILLI, M. 1970., K/Ar evidence for the post – Paleozoic migration of granitic intrusion foci in the Andes of Northern Chile. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 10, N° 1, p. 60 – 66.

FAVIER, V., FALVEY, M., RABATEL, A., ESTELLE, P., LÓPEZ D., 2009. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26° – 32° S). Water Resources Research, Vol. 45.

FERRANDO, F., 1992. "Bases Para la Confección de Cartas de Erodabilidad". Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, Universidad de Talca. Pp. 8.

FORD, D., WILLIAMS, P., 2007. Karst hidrogeology and geomorphology: England, John Wiley and Sons, 554 pp.

FRELIH, M., 2003. Geomorphology of karst depressions: polje or uvala –a case of Lucki dol: Acta carsologica, 32(2), 105-119.

FUENZALIDA, P., 1965. Biogeografía. Geografía Económica de Chile: CORFO. Santiago, Chile, Editorial Universitaria S.A.

GAJARDO, H., 1982. Continúan hundimiento de tierras en chanco. El Mercurio, Santiago, Chile, 17 de marzo, 1982.

GALAN, J., 1991. Disolución y génesis del karst en rocas carbonáticas y rocas silíceas: un estudio comparado. Ciencias Naturales - Natur Zientziak, Nº 43. (pp. 43).

GALVE, J., GUTIÉRREZ, F., LUCHA, P., BONACHEA, J., REMONDO, J., CENDRERO, A., ET AL. 2009. Sinkholes in the salt-bearing evaporite karst of the Ebro river valley upstream of Zaragoza City (NE Spain): Geomorphological mapping and analysis as a basis for risk management. Geomorphology, 108, 145–158.

GALVE, J., REMONDO, J., GUTIERREZ, F. 2011. Improving sinkhole hazard models incorporating magnitude–frequency relationships and nearest neighbor analysis. Geomorphology 134 (2011) P. 157–170.

GARREAUD R., VUILLE M., CLEMENTS, A., 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. Palaeogeography, Palaeoclimatology 3054. Pp. 1 -18.

GARREAUD, R., 2015. ¿Por qué se inundó el desértico norte de Chile? [En línea] BBC en Internet. 27 de marzo 2015 [http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150327\\_lluvias\\_chile\\_porque\\_lp](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150327_lluvias_chile_porque_lp)

[Consulta: 12 de abril 2015].

GOBIERNO REGIONAL DE ATACAMA, 2004. Diagnóstico Eje Estratégico: Integración y Conectividad Costera. 2004.

GÓMEZ, D., MARTÍN, T., 2012. Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. Department of Biology and Geology, ESCET, University Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, CP 28933 Móstoles, Madrid, Spain. Engineering Geology 149-150 (2012) 1–12.

GONGYU, L., WANFANG, Z. 1999. Sinkholes in karst mining areas in China and some methods of prevention. Engineering Geology 52 (1999). P. 45–50.

GUTIERRES, J., 2014. Alcalde Tierra Amarilla denuncia Problemas Ambientales por Minera Candelaria. [En línea], Diario La Nación, 15 de mayo 2014. <http://www.lanacion.cl/noticias/regiones/atacama/alcalde-de-tierra-amarilla-denuncia-problemas-ambientales-por-minera-candelaria/2014-05-15/180301.html>

(Consulta: 12 agosto 2014).

CARVAJAL, J. 2013. Tierra Amarilla: Crónica. Temor desde el bajo suelo. terreno [En línea], 24 Horas (TVN) en Internet. 24 de julio, 2013. <http://www.24horas.cl/regiones/atacama/tierra-amarillacronica-temor-desde-el-bajo-suelo-760728>



(Consulta: 25 agosto 2014).

HAUSER, 1988. Informe en relación con el desarrollo de subsidencias abocada a laboreos mineros abandonados, en terrenos ex – mina La Africana, Comuna de Pudahuel, Región Metropolitana. Sernageomin, Subdirección Nacional de Geología.

HAUSER, 1993. Hundimiento Asociado a Laboreos Subterráneas en Mina “Santos”, Tierra Amarilla, III Región. Informe Técnico, Sernageomin. Chile.

HAUSER, 2008. Subsistencia y/o hundimientos conexos a laboreos mineros abandonados o activos. Sernageomin.

HEALY J. H., PRESS, F., 1969. Geophysical studies of basin structures along the eastern front of the Sierra Nevada, California: Geophysics, vol. XXIX, no. 3, p. 337-359.

HEIDARI, M., KHANLARI, G.R., TALEB BEYDOKHTI A.R., MOMENI A.A. 2011. The formation of cover collapse sinkholes in North of Hamedan, Iran. Geomorphology 132. 76 pp.

HENRIQUEZ, C., 2007. Mejora de Terrenos Potencialmente Licuables con Inyecciones de Compactación. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España. 2007. 691p.

HERNÁNDEZ, A., 2013. Modelo drastic-sg: una nueva herramienta para mejorar la gestión del acuífero de la ciudad de México. Academia de Ingeniería, A.C. Ceremonia De Ingreso. México, D.F., 2013. 4 pp.

HOUSTON, J., HARTLEY, A., 2003. The central andean west – slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper – aridity in the Atacama desert . International Journal of Climatology 23. Pp. 1453 – 1464.

ICR CONSULTORES LIMITADA, 1999. Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la ciudad de Copiapó. SECTRA.

IDIEM, 2010. Estudio de Mecánica de suelos – Lineamientos para la determinación de Colapsabilidad de Suelos Salinos por disolución de sales. Informe N° 612.685-A.

INE, 2007. Censo Nacional Agropecuario de 2007. Instituto Nacional de Estadísticas. Gobierno de Chile.

INE, 2012. Resultados Preliminares del XVIII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda 2012. Instituto Nacional de Estadísticas, Chile. [http://www.ineatacama.cl/archivos/files/pdf/Otras%20publicaciones/Minuta\\_Censo\\_2012.pdf](http://www.ineatacama.cl/archivos/files/pdf/Otras%20publicaciones/Minuta_Censo_2012.pdf)

JARA, 2015. ¿Por qué no hay volcanismo activo entre los 27° y 33° Latitud Sur? Sociedad Geológica Chilena.

<http://www.sociedadgeologica.cl/wp-content/uploads/2015/04/Ausencia-de-volcanismo-4-y-5-region.pdf>



(Consulta: 25 de noviembre 2015)

JIMÉNEZ-SALAS, J.A., JUSTO, J.L., ROMANA, M., FARACO, C., 1974. Colapso de limos y arcillas yesíferos de baja plasticidad en climas áridos y semiáridos. Boletín de Información de Transporte y Mecánica del Suelo 105, 13–20.

JULIÁ, C., MONTECINOS, S., MALDONADO, A., 2008. Características climáticas de la región de Atacama. Ediciones Universidad de la Serena, La Serena, Chile. Pp. 25 – 42.

KAY, S. M., GODOY, E., KURTZ, A., 2005. Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. Geological Society of America Bulletin 117(1-2), 67–88.

KWIATEK J. 1998. Protection of constructions on surface ground mine. (Traduction in poland “Ochrona obiektow budowlanych na terenach gorniczych”). GIG, Katowice

LAMOREAUX, P. E., & NEWTON, J. 1986. Catastrophic subsidence: An environmental hazard, Shelby County, Alabama. Environmental Geology and Water Sciences, 8, 25–40.

LANGER, W.H. 2001. Potential environmental impacts of quarrying stone in karst — a literature review. U.S. Geological Survey Open-File Report 0 F-01-0484.

LARA, N. 2013. Susceptibilidad de licuefacción en la comuna de Doñihue. Memoria para optar al título de Geólogo. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. P. 25.

LEYTON, F., RUIZ, S., SEPÚLVEDA, S. A. 2010. Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. Andean geology, 37(2), 455-472.

LUZ, C. 2016. Los agujeros de Alto Hospicio. [En línea] El Mercurio en Internet. 8 de febrero 2016. <http://diario.elmercurio.com/detalle/index.asp?id={783030ff-4972-49b6-b0e0-b8c4103f837e}>

(Consulta: 9 de febrero 2016)

MANGIN, 1982. L'approche systemique du karst, consequences concept tuelles et methodologiques. Karst Larra 82, Publ. Serv. Geol. Dip. Navarra, 141-157.

MARCHIK, R., FONTBOTÉ, L. 2001. The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre – Candelaria área, northern of Chile. Journal of South American Earth Sciences 14 (2001). P. 401 – 433.

MARDONES, M., JARA, J., VARGAS, J. 2007. El patrón hidrográfico de la cuenca del río Blanco: control tectónico y geomorfológico. Revista de Geografía Norte Grande, 38: 79-98 (2007). Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción.

MARÍN, 2016. Av. Providencia será vía exclusiva para transporte público mientras dure reparación de socavón. [En línea] El Mercurio en Internet. 9 de junio 2016. <http://www.emol.com/noticias/Nacional/2016/06/09/807015/Reparacion-de-socavon-en-Av-Providencia-podria-demorar-semanas-y-via-sera-solo-para-el-transporte-publico.html>

(Consulta: 16 de junio 2016)

MARQUARDT, R., MARINOVIC, S., MUÑOZ, V., 2008. Geología de las ciudades de Iquique y Alto Hospicio. Región de Tarapacá. Carta Geológica de Chile. Serie Geología básica. No. 113.

MARTÍNEZ, J., REY, J., SANDOVAL S., RODRÍGUEZ, M. 2007. La tomografía eléctrica: una herramienta para la detección de huecos mineros (concesión de Arrayanes, Linares-Jaén). Departamento Ingeniería Mecánica y Minera. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén, 23700 Linares (Jaén). Geogaceta, 42 (2007), 43-46.

MILLER R. D. Y STEEPLES D. W. 1991. Detecting voids in a 0.6 m coal seam, 7 m deep, using seismic reflection: Geoexploration, 28, p. 109-119.

MOP, 2005. Plan de Obras Públicas para Copiapó. Versión actualizada. Noviembre 2005. Gobierno de Chile. P. 4

MPODOZIS, C., RAMOS, V. A. 1990. The Andes of Chile and Argentina. Circum Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Earth Sciences Series, Vol. 11, p. 59 – 90.

MUSEO CHILENO DE ARTE PRECOLOMBINO, 2005. Joyas de los Andes. Metales para los dioses. Morgan Impresores. Santiago de Chile. 95 pp.

NEWTON, J. G., COPELAND, C. W., & SCARBROUGH, L. 1973. Sinkhole problem along proposed route of Interstate Highway 459 near Greenwood. Alabama: Geological Survey of Alabama, Division of Paleontology and Stratigraphy.

NIEMEYER, H. 1981. Descripción de la hoya hidrográfica del río Copiapó. Contribución Arqueológica Nº 2. Ministerio de Educación Pública. Museo Regional de Atacama. Ediciones Kultrún Ltda. Ahumada 312, of. 218, Stgo. P. 27 – 142.

NUÑEZ, M. P. 2016. Excavación de Línea 3 del Metro produce socavón en avenida Independencia. [En línea] La Tercera en internet. 15 de marzo 2016. <http://www.latercera.com/noticia/nacional/2016/03/680-672320-9-excavacion-de-linea-3-del-metro-produce-socavon-en-avenida-independencia.shtml>

(Consulta: 9 de abril 2016)

OVANDO-SHELLEY, E., OSSA, A., SANTOYO, E. 2013. Effects of regional subsidence and earthquakes on architectural monuments in Mexico City. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 65, núm. 1, 2013, p. 157-167.

OWENS, P. & SLAYMAKER, O. 2004. Mountain Geomorphology. London: Owens & Slaymaker, 2004.

PACHECO, J. 2007. Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. Tesis para optar a Doctor en Ciencias de la Tierra. Centro de Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. P.

PALACIOS, S., GOYCOCHEA, F. 2013. Peligros geológicos de licuefacción de suelos asociado a suelos. Taller CUIM 13 "Lifting académico" CTE – UNSJ. I Jornadas Internacionales de Educación con Tecnologías, San Juan, Argentina (2013).

PALMA, C. 2014. Estudio Derrumba El Mito: No Hay Socavones Bajo Tierra Amarilla. [En línea], La Nación en Internet. 10 de noviembre 2014. <http://www.lanacion.cl/noticias/regiones/atacama/estudio-derrumba-el-mito-no-hay-socavones-bajo-tierra-amarilla/2014-11-10/143745.html>

(Consulta: 26 septiembre 2015).

PICCINI, 2008. Estructura y Morfología de los sistemas Kársticos. Societa Speleología Italiana.

POLAND, J.F., LOGFREN, B.E. Y RILEY, F.S. 1972. "Glossary of selected terms useful in studies of the mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal". U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2025. USGS, Wash. D.C.

PROKOPOVICH, N.P. 1979. "Genetic classification on land subsidence". 'Evaluation and Prediction of Subsidence'. ASCE. 389-399.

PUEYO, Ó. ZAMORA, S., POCOVI, J. 2005. Aplicación de la prospección geofísica por georradar (GPR) a la delimitación y caracterización de estructuras arqueológicas. Ejemplo de las ruinas del convento agustino de Fraga (Huesca). Área de Geodinámica Interna. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, nº 12. CP. 50.009 (Zaragoza). Geogaceta, 38 (2005), 131-134

QUEZADA, J., JAQUE, E., FERNÁNDEZ, A., VÁSQUEZ, D. 2012. Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. Revista de Geografía Norte Grande, 53: 35-55 (2012).

QUIRANTES, J., 1978. Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros. Instituto Fernando el Católico, CSIC, Zaragoza.

RANA, A. 2008. Cavities Detection and Treatment at a Residential Area Under Development in the State of Kuwait. Civil Engineering Department, College of Engineering & Petroleum, Kuwait University. P: 612 – 621.

RIVERA, O., Y MPODOZIS, C. 1991. Volcanismo explosivo del Terciario Inferior En La Precordillera de Copiapó, Región de Atacama. Las Calderas de Lomas Bayas y El Durazno. En VI Congreso Geológico Chileno, Viña del Mar. P. 213 – 216.

ROMO, S., 2014. Socavones Bajo Tierra Amarilla: Estudios Sincerarán Si Son Mito O Realidad. [En línea], Diario La Nación en Internet, 23 de junio 2014. <http://www.lanacion.cl/noticias/regiones/atacama/socavones-bajo-tierra-amarilla-estudios-sinceraran-si-son-mito-o-realidad/2014-06-23/105628.html>

(Consulta: 25 agosto 2014).

SAEIDI, A., DECK, O., VERDEL, T. 2013. Comparison of Building Damage Assessment Methods for Risk Analysis in Mining Subsidence Regions. *Geotech Geol Eng* (2013) pp. 1074.

SAATY, T. L. & KEARNS, K. 1991. "Analytical Planning. The Organization of Systems". The Analytic Hierarchy Process Series Vol. IV. RWS Publications. Pittsburgh, PA, EE.UU. Pp. 208.

SÁNCHEZ, L., AGUILAR, G., BÖRGEL, R., COMTE, D., ORTEGA, F., REGARD, V. 2015. Estudio de la interrelación entre procesos aluvionales y la inundación de Tierra Amarilla asociado a las lluvias torrenciales de marzo de 2015. Resumen realizado para XIV Congreso Geológico Chileno, la Serena 2015.

SCHEUBER, E., ADRIESSEN, P. 1990. The kinematic and geodynamic significance of the Atacama fault zone, northern Chile. *Journal of Structural Geology*, Vol. 12, Nº 2, p. 243 – 257.

SEPÚLVEDA, S., REBOLLEDO, S., MCPHEE, J., LARA, M., CARTES, M., RUBIO, E., SILVA, D., CORREIA, N., VÁSQUEZ, J. 2014. Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapacá, Atacama Desert, northern Chile. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014. *Landslides* (2014) 11:481–491.

SERGERSTROM, K., RUIZ, C., 1962. Geología del cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Carta Geológica de Chile, 3. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago de Chile p. 115.

SERGERSTROM, K., 1967. Geology and Ore Deposits of Central Atacama Province, Chile. *Geological Society of America Bulletin* 1967;78, no. 3:305-318

SERGERSTROM, K., 1968. Geología de las hojas Copiapó y Ojos del salado. Boletín Nº 24. Informe IIG. Stgo. p. 58.

SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile. Versión digital. Publicación geológica digital, Nº 4, 2003.

SERNAGEOMIN, 2011. Atlas de Faenas Mineras, regiones de Atacama y Antofagasta en Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras Nº 7, Servicio Nacional de Geología y Minería. 2011.

SERNAGEOMIN, 2014. Información geológica de la comuna de Alto Hospicio. Geología y suelos salinos. Servicio Nacional de Geología y Minería. 2014.

THOMAS, C. 1980. Microzonificación sísmica de La Serena y Coquimbo. Memoria (título profesional de Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Obras Civiles. 1980. 118p.

TOMÁS, R., HERRERA, G., DELGADO, J., PEÑA, F. 2009. Subsistencia del Terreno. Departamento de Ingeniería de la Construcción, OO.PP. e Infraestructura Urbana, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2009. (17.3) 295-302

TVN, 2013. Tierra Amarilla: Preocupación por nuevo hundimiento de terreno, reportaje 24 Horas. [En línea]. <http://www.24horas.cl/regiones/atacama/tierra-amarillapreocupacion-por-nuevo-hundimiento-de-terreno-953339>

(Consulta: 25 de noviembre del 2014).

UYEDA, S., KANAMORI, H. 1979. Back – arc opening and the mode of subduction. *Jornal Geophysical Research*, Vol. 84, p. 1049 – 1061.

UYEDA, S. 1982. Subduction zones: an introduction to comparative subductology. *Tectonophysics*, Vol. 81, p. 133 – 139.

VARGAS, C., 2013. Actualización del Modelo Hidrogeológico de La Cuenca del Río Copiapó para El Acuífero Entre La Puerta y Angostura. Memoria Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Pp. 82.

WAGNER H, S. 1991. Surface effect of total coal seam extractions by underground mining methods. *J S Afr Inst Min Metal* 91:221–231.

WOO, E. 2013. Atacama: Gran socavón en yacimiento preocupa a habitantes de Tierra Amarilla. [En línea] Radio BIOBIO en Internet. 25 de noviembre, 2013. <http://www.biobiochile.cl/2013/11/25/atacama-gran-socavon-en-yacimiento-preocupa-a-habitantes-de-tierra-amarilla.shtml>

(consulta: 30 agosto 2014).

YOUNG, A. 1977. “Slopes”. Longman Group Limited. London, United Kingdom. Pp. 288.

ZHANG, J., HUANG, H., BI, H. 2014. Land subsidence in the modern Yellow River Delta based on InSAR time series analysis. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (CAS), 7 Nanhai Road, Qingdao 266071, Shandong, China. Nat Hazards (2015) 75:2385–2397.*

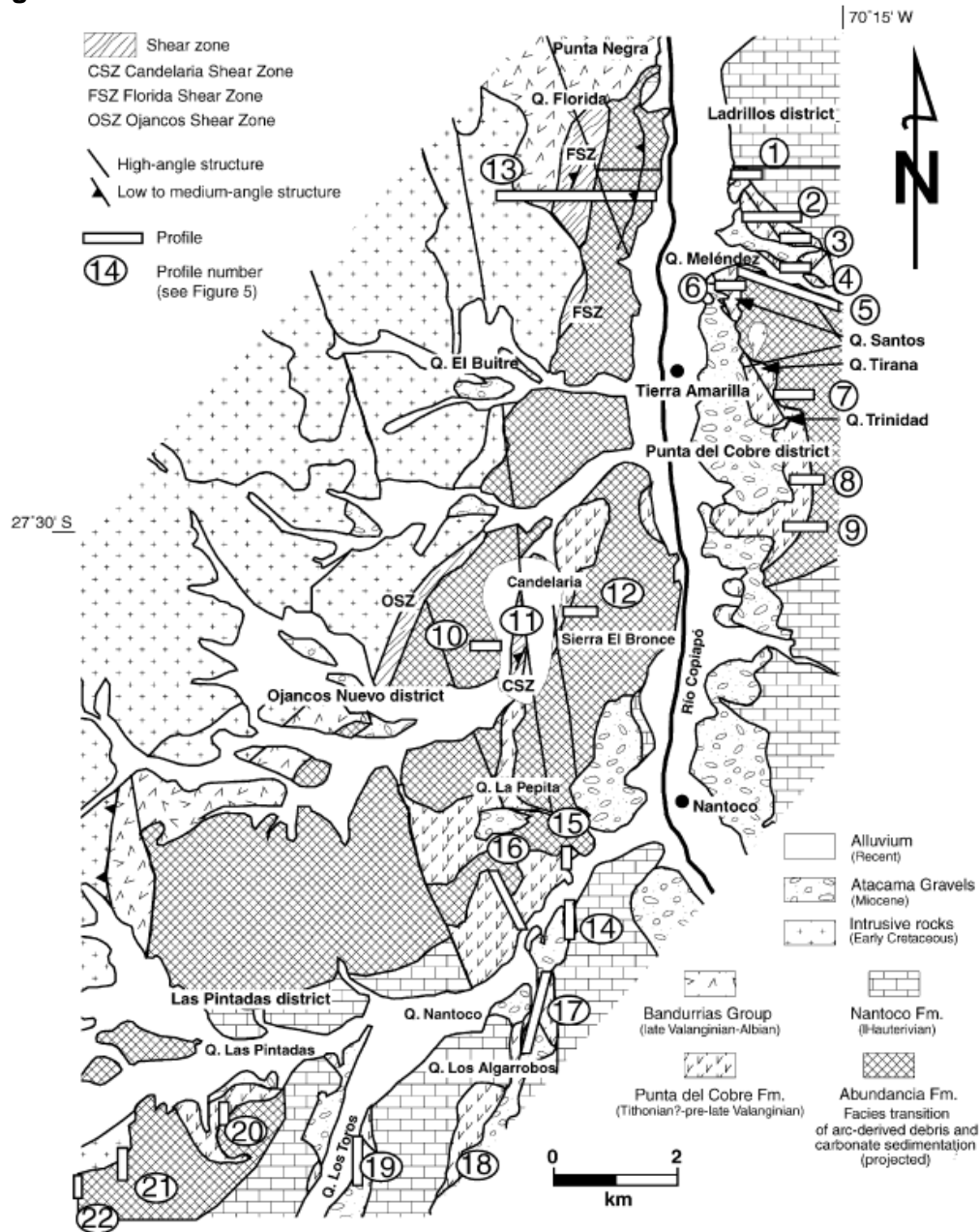
ZENTELLI, M. 1974. Geological evolution and metallogenic relationships in the Andes of Northern Chile between 26° and 29°. PhD. Thesis. Queen University, Kingston, Canada. 446 p.

ZERMEÑO, M., ESQUIVEL, R., HERNÁNDEZ, A., MENDOZA, E. 2004. Influencia de la Extracción de agua en la Subsistencia de la ciudad de Aguascalientes. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Pp. 15.

ZUÑIGA, F., 2005. Constitución y Dominio Público (Dominio Público de Minas y Aguas Terrestres). *Revista Ius et Praxis*, 11 (2): 65 - 101, 2005

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1 Anexo N° 1: Mapa de localización de áreas donde se han realizado perfiles estratigráficos

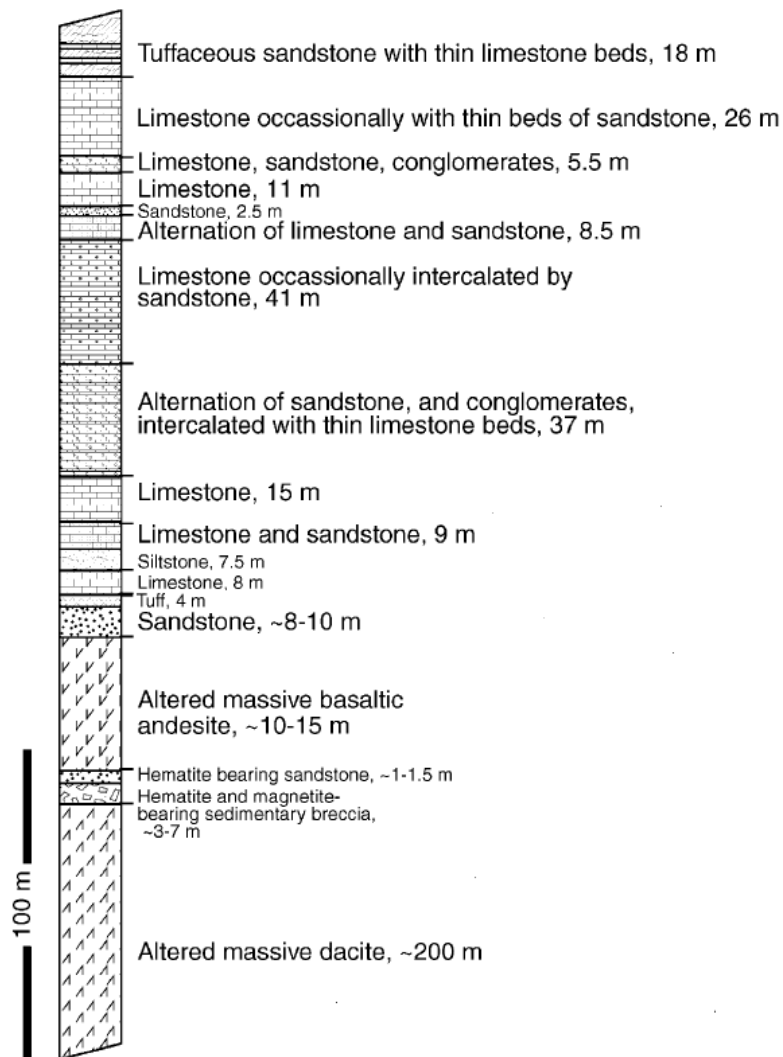


**Figura 78.** Cartografía que localiza la distribución de la transición entre facies arco volcánico continental (derivación clástica) y sedimentación superficial marina carbonatada conocida como la formación abundancia (MARSCHIK, 2001). Las estratigrafías N° 3, 4 y 5 de este mapa se indica en las Figuras 79, 80 y 82 respectivamente. Otra columna cercana estratigráfica a la subsistencia de la quebrada de Meléndez se visualiza en la Figura 81 según SEGERSTROM & RUIZ (1962).

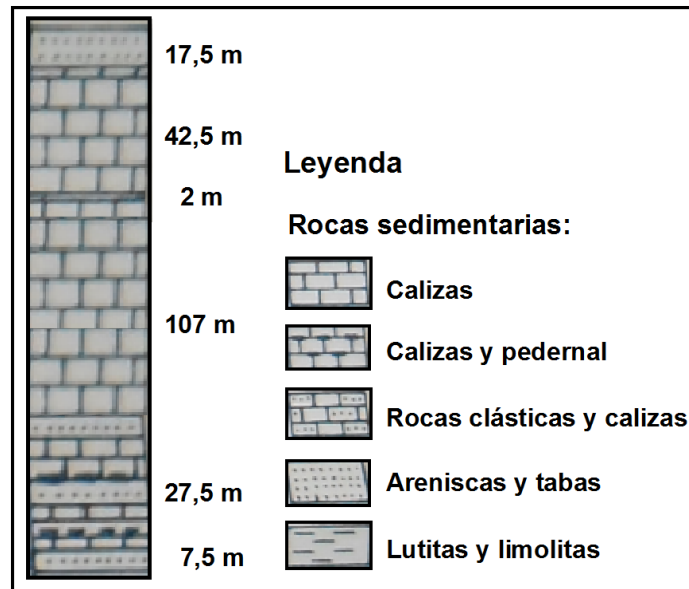




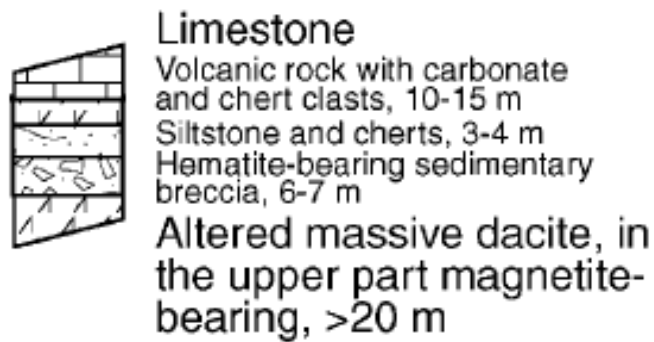
**Figura 79.** Columna estratigráfica en la posición N° 3 del Anexo N° 1 (Figura 78) localizada en la quebrada de Meléndez.



**Figura 80.** Columna estratigráfica en la posición N° 5 del Anexo N° 1 (Figura 78) localizada en la quebrada de Meléndez.

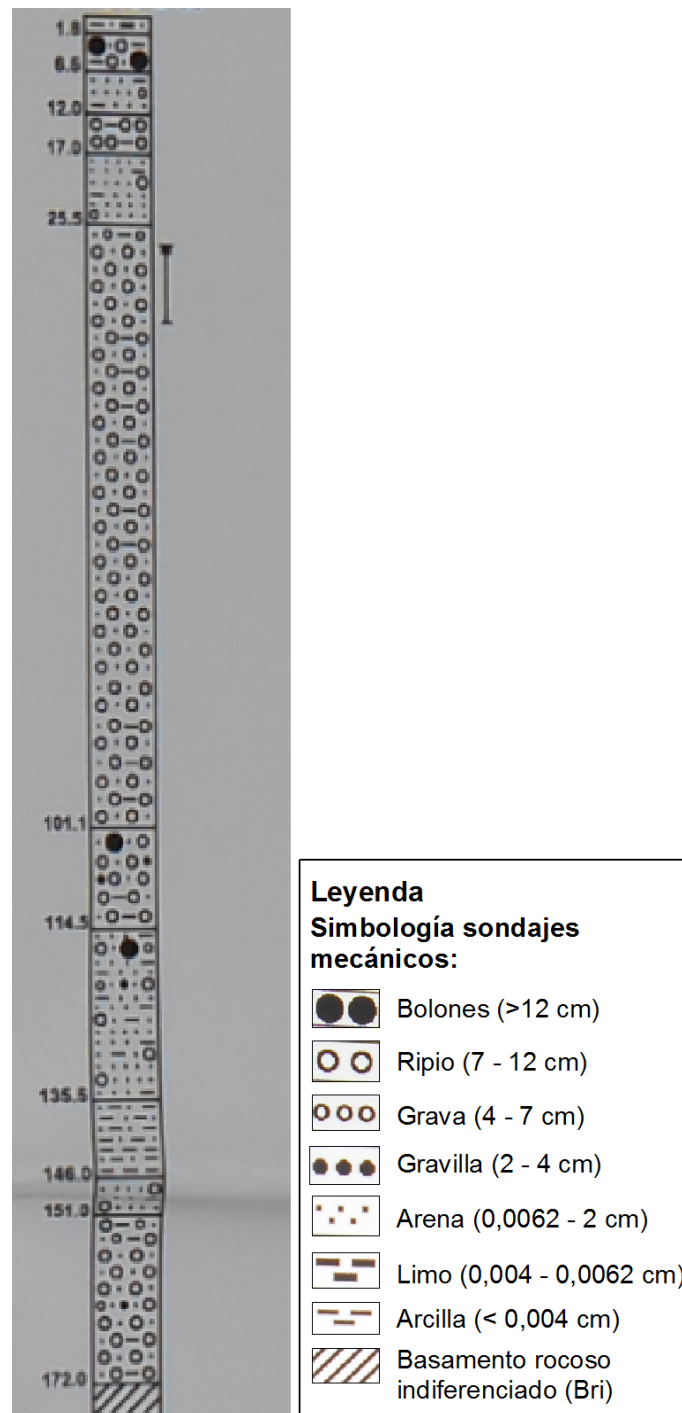


**Figura 81.** Columna Estratigráfica de la quebrada de Meléndez (SEGERSTROM & RUIZ, 1962).



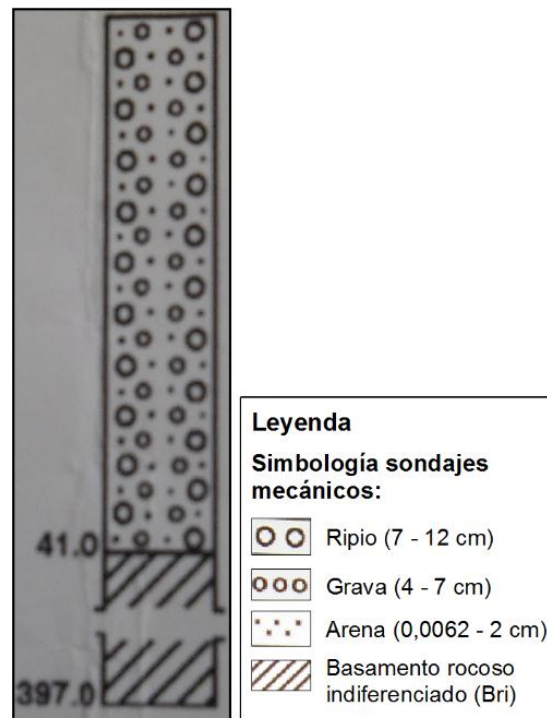
**Figura 82.** Columna estratigráfica en la quebrada de Meléndez según MARSCHIK (2001). Otras columnas se presentan en el Anexo N° 1 (Figuras 79 y 80) cercanas a la subsistencia del Caserón Minero en la quebrada de Meléndez.

## 7.2 Anexo N° 2: Perfiles geomecánicos a la entrada del área urbana y en el patio de una vivienda

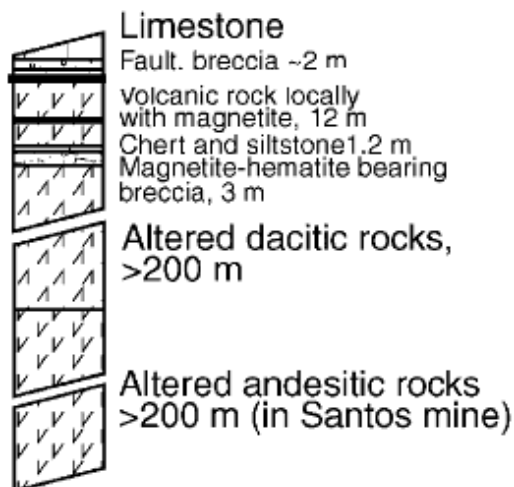


**Figura 83.** Perfil Geomecánico según AGUIRRE (1999). Este perfil es el más cercano a las subsidencias que se encuentran a la entrada del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.

### 7.3 Anexo N° 3. Perfil geomecánico y estratigrafía del patio de una vivienda en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla



**Figura 84.** Perfil Geomecánico según AGUIRRE (1999). Este perfil es el más cercano a la subsistencia que se encuentra en el patio de una vivienda en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla.



**Figura 85.** Columna estratigráfica del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla cercana a la subsistencia del patio de una casa.

7.4 Anexo N° 4: Mapa de la geología del área de estudio localizando el perfil A – A' correspondiente al presentado en la Figura 65

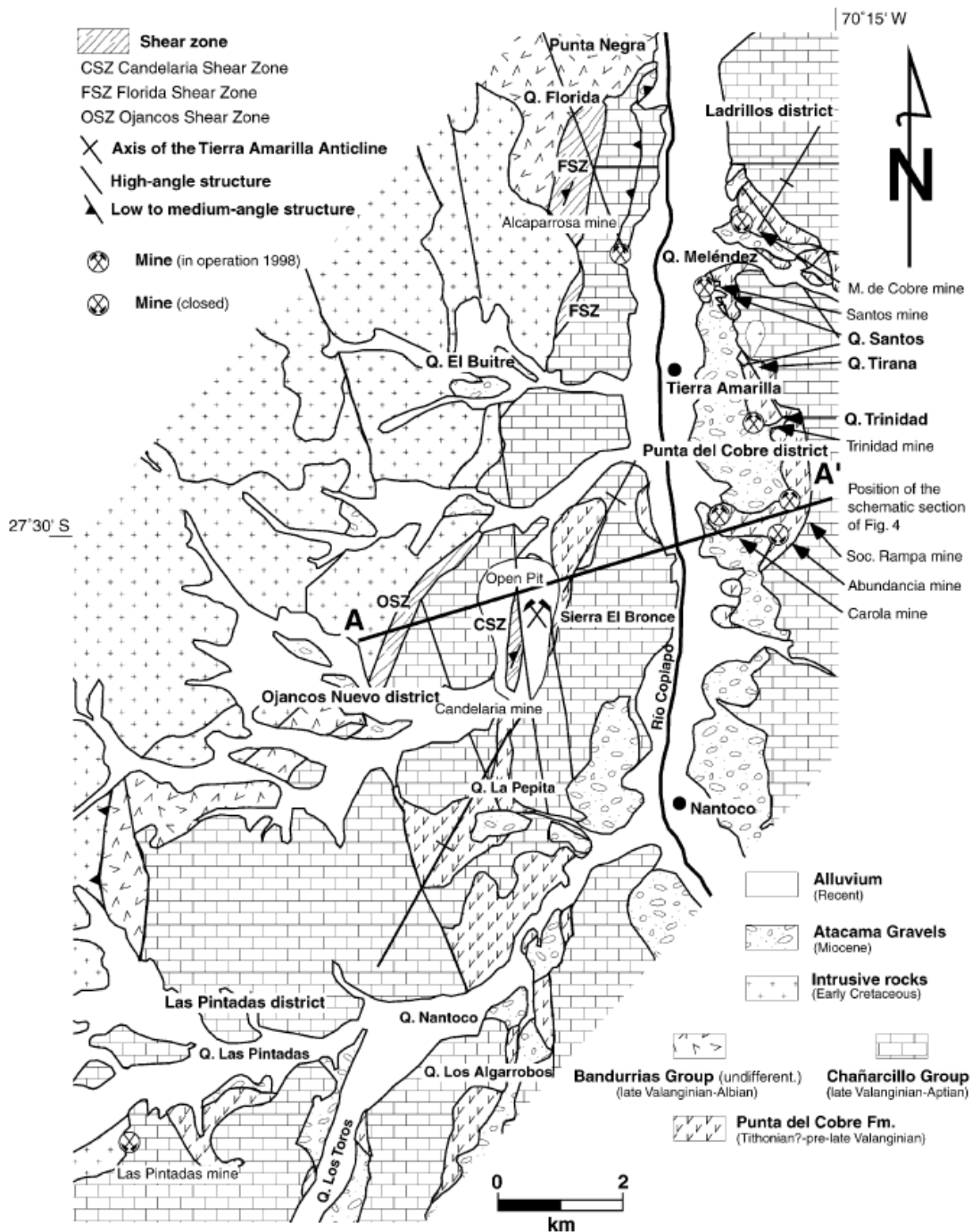


Figura 86. Mapa de la geología del área de estudio. El perfil A – A' corresponde al presentado en el perfil de la Figura 68. (MARSCHIK, 2001).

### 7.5 Anexo N° 5: Propiedades Físicas, Químicas y Físico–Químicas del Suelo del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla

SERIE: APACHETA	0 - 11	11 - 48	48 - 60	61 - 80	80 - 91	91 - 120
<b>PROFUNDIDAD Cm</b>						
<b>DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS POR TAMAÑO %</b>						
2 - 0,05	23	31	19	33	5	37
0,05 - 0,002	51	31	63	43	84	41
< 0,002	26	38	18	24	11	22
TEXTURA	FA	FA	Fa	F	aF	F
HUMEDAD RETENIDA 0,33 bar %	17,2	22,8	11,5	19	6,4	18,7
HUMEDAD RETENIDA 15,0 bar %	8,4	12,6	5,7	8,3	2,9	7,7
HUMEDAD APROVECHABLE %	8,4	10,2	5,8	10,7	3,5	11
pH H <sub>2</sub> O	7,7	8,2	8,5	8,5	8,6	8,6
CARBONO ORGÁNICO %	1,33	1,22	0,17	0,17	0,12	0,29
MATERIA ORGÁNICA %	2,3	2,1	0,3	0,3	0,2	0,5
Carbonato de calcio equivalente	4,3	6	2	3,8	1,5	2,6
Yeso	0,12	0	0	0	0	0
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (dS/m a 25° C)	8,1	1,8	1,3	1,3	0,7	1
CACIONES DISUELTOS Ca mmol+L <sup>-1</sup>	42,9	10,5	6,9	7,7	3,6	5,3
Mg mmol + L <sup>-1</sup>	22,6	3,6	2,3	2,5	1,2	1,9
K mmol + L <sup>-1</sup>	3,1	1	0,4	0,4	0,2	0,2
Na mmol + L <sup>-1</sup>	38	4,5	3,4	3,7	2,3	2,9
RAS	6,6	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5
PSI (calculado de la RAS)	8,8	2,4	2,3	2,3	2,1	2,1
SATURACIÓN DE AGUA %	37,4	44,5	24,7	34,9	25,9	33,4
<b>EXTRACCIÓN CON ACETATO DE AMONIO</b>						
Ca cmol + kg <sup>-1</sup>	30,8	23,8	14,7	23,5	8,5	23,5
Mg cmol + kg <sup>-1</sup>	5,42	4,11	2,17	3,19	1,48	3,39
Na cmol + kg <sup>-1</sup>	2,48	0,61	0,3	0,41	0,23	0,43
K cmol + kg <sup>-1</sup>	1,35	1,31	0,43	0,52	0,24	0,49
<b>CACIONES INTERCAMBIABLES</b>						
K cmol + kg <sup>-1</sup>	1,2	1,26	0,42	0,51	0,24	0,48
Na cmol + kg <sup>-1</sup>	1,06	0,41	0,22	0,28	0,17	0,33
CAPACIDAD TOTAL DE INTERCAMBIO CIC	16,8	18,9	9,6	11,8	3,9	13,5
SATURACIÓN DE BASES %	100	100	100	100	100	100
SATURACIÓN DE Na %	6,3	2,2	2,2	2,4	4,4	2,5

**Tabla 6.** Propiedades Físicas, Químicas y Físico–Químicas del Suelo Fuente: CIREN, 2007.

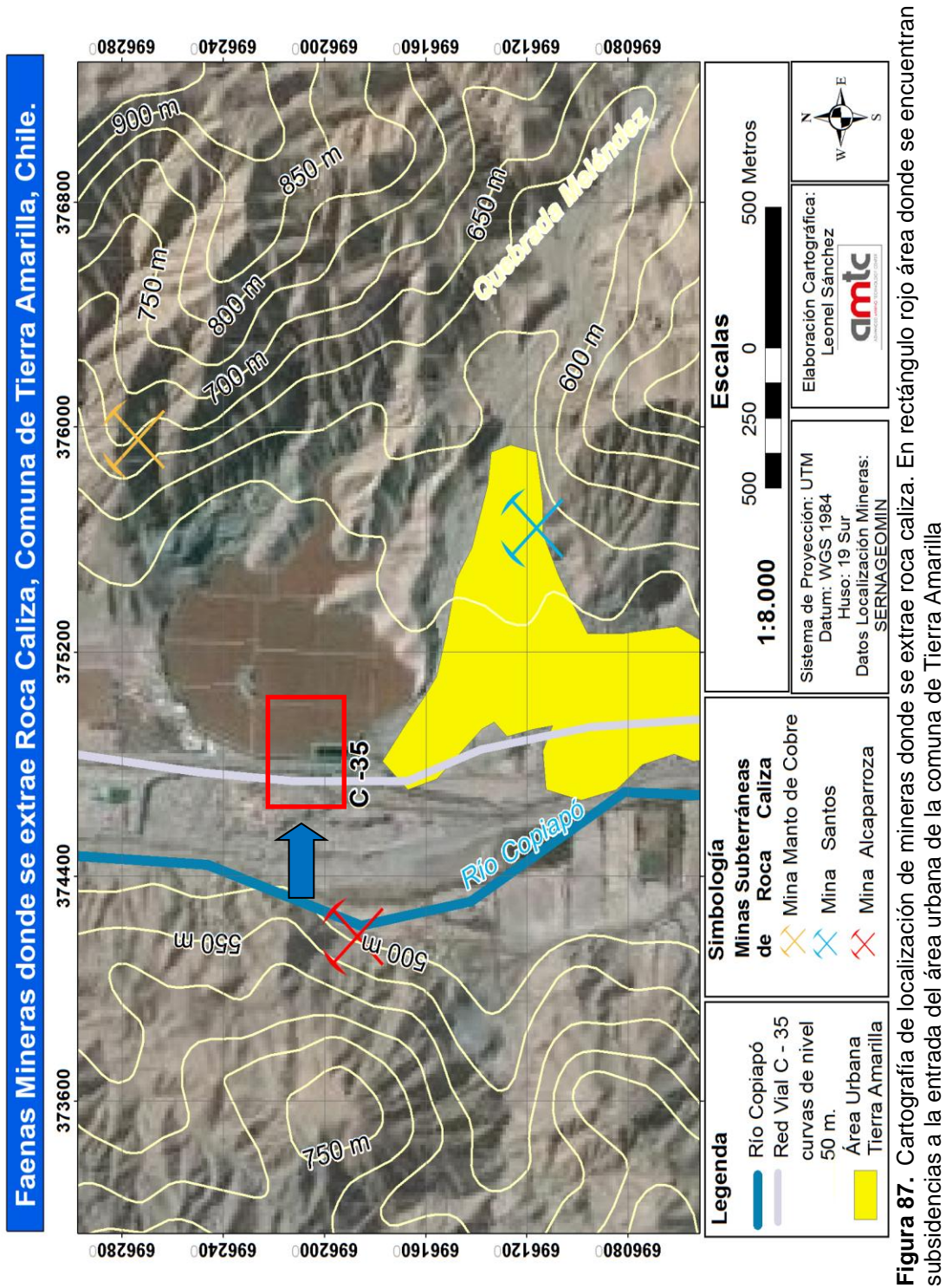


### 7.6 Anexo N° 6: Balance hídrico del acuífero del sector 4

Año	Entradas (l/s)		Salidas (l/s)			Entrada Total (l/s)	Salida Total (l/s)	Almacenamiento (l/s)
	Recarga	Flujo Subterráneo	Caudal Bombeo	Caudal Dren	Flujo Subterráneo			
1993	775	251	731	0	250	1.027	981	46
1994	724	235	873	0	262	959	1.135	-176
1995	713	224	1.013	0	260	937	1.274	-337
1996	652	249	1.083	0	262	901	1.345	-444
1997	777	249	863	0	266	1.025	1.129	-104
1998	1.014	261	438	0	274	1.274	712	562
1999	804	280	1.359	0	287	1.083	1.646	-562
2000	661	260	872	0	283	921	1.155	-234
2001	798	265	1.169	0	286	1.063	1.456	-392
2002	747	260	972	0	285	1.006	1.257	-251
2003	961	269	974	0	284	1.230	1.259	-28
2004	754	265	1.129	0	288	1.020	1.417	-398
2005	827	256	1.260	0	286	1.082	1.546	-464
2006	756	269	1.207	0	284	1.024	1.491	-467
2007	708	252	1.304	0	270	960	1.574	-614
2008	707	236	1.454	0	259	943	1.714	-771
2009	696	220	1.435	0	249	916	1.684	-768
2010	664	198	1.545	0	237	862	1.782	-920

**Tabla 7.** Balance hídrico del acuífero del sector 4. Fuente: Vargas, 2013

7.7 Anexo N° 7: Cartografía de localización de mineras donde se extrae roca caliza





### 7.8 Anexo N° 8: Mapa geológico de la cuenca del río Copiapó

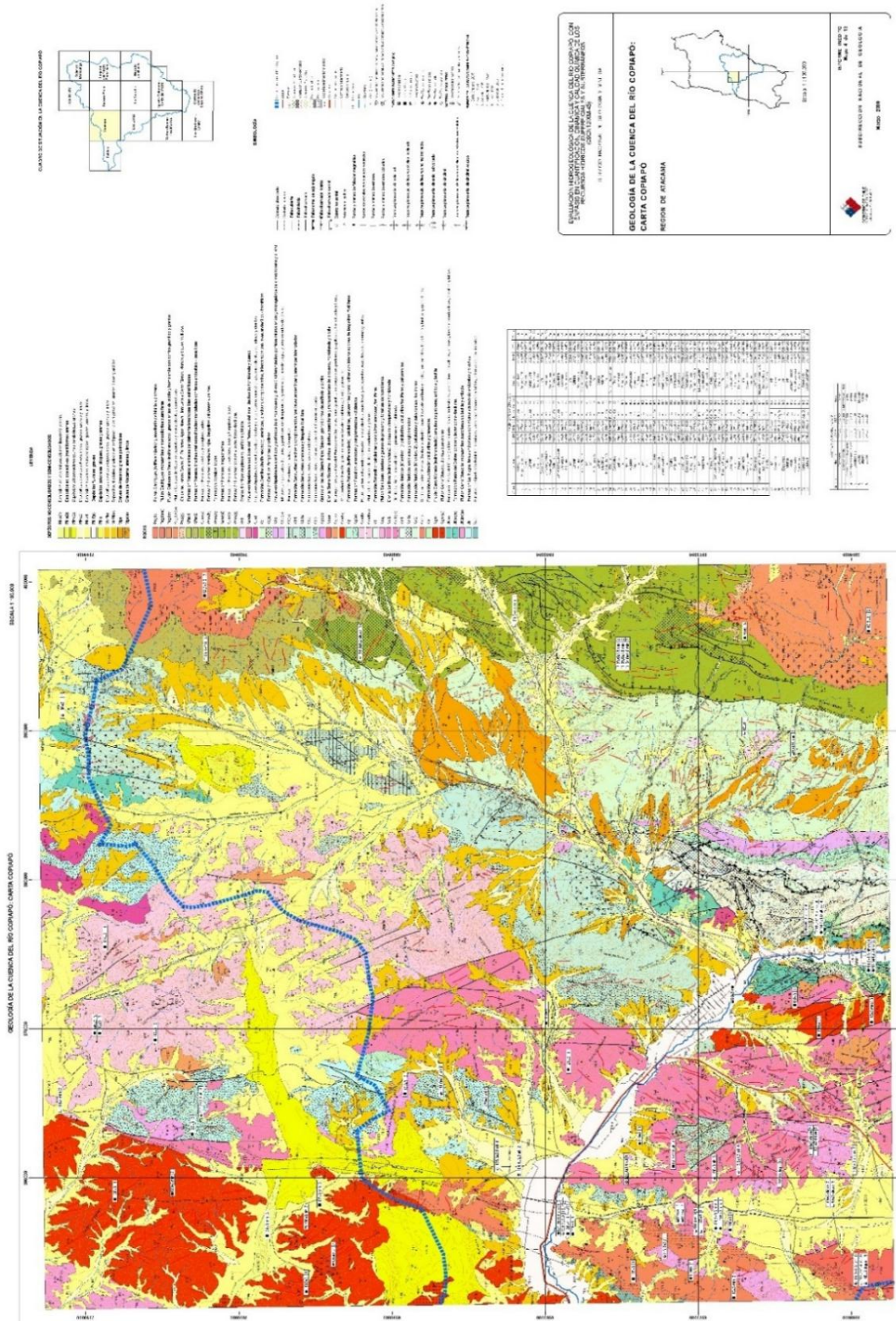


Figura 88. Mapa geológico de la cuenca del río Copiapó. Fuente: SERNAGEOMIN

## 7.9 Anexo N° 9: Estudio de la interrelación entre procesos aluvionales y la inundación de Tierra Amarilla asociado a las lluvias torrenciales de marzo de 2015 (Resumen extendido)

Leonel Sánchez<sup>1,2\*</sup>, Germán Aguilar<sup>1,3\*</sup>, Reinaldo Börgel<sup>4</sup>, Diana Comte<sup>1,5</sup>, Francisco Ortega<sup>5</sup>; Vincent Regard<sup>6</sup>

(1) *Universidad de Chile, Advanced Mining Technology Center, Santiago, Chile.*

(2) *Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Santiago, Chile.*

(3) *Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile.*

(4) *Universidad Academia Humanismo Cristiano, Departamento de Geografía, Santiago, Chile.*

(5) *Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Santiago, Chile.*

(6) *Géosciences Environnement Toulouse, OMP, UPS, CNRS, Université de Toulouse, France.*

\*Email de contacto: [lsanchezc@ug.uchile.cl](mailto:lsanchezc@ug.uchile.cl), [german.aguilar@amtc.cl](mailto:german.aguilar@amtc.cl)

**Resumen.** El siguiente trabajo está orientado al análisis de los flujos de detritos provenientes de la quebrada Carrizalillo y su distribución geomorfológica. Estos flujos produjeron un entrapamiento del Río Copiapó y luego una post – apertura del cauce provocando varios puntos de desborde del río e inundación en la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla, todo esto asociado al evento de lluvias intensas del 24 - 26 de marzo del presente año en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo.

**Palabras claves:** flujos de detritos, inundación de zonas urbanas, planificación territorial, cuenca del río Copiapó.

### 1. Introducción

Los aluviones e inundaciones en el norte de Chile están generalmente asociados a periodos de lluvias cortos e intensos de verano que se desarrollan en la alta cordillera de los Andes (Sepúlveda et al, 2014). El evento aluvional ocurrido en la cordillera de la Región de Atacama en el mes de marzo de 2015, no se habría generado por este tipo de fenómeno; según Garreaud (2015) dicho fenómeno correspondió a un tipo de tormenta que no es tan frecuente y que se denomina baja segregada. Esto se desarrolla esencialmente debido a un núcleo de aire frío en altura que se desprende del flujo principal de los vientos del Oeste y que se enfrenta con masas de aire cálido y cargadas de mucha humedad que vienen desde la cuenca amazónica (Garreaud, 2015).

Las cuencas de drenaje afectadas durante este evento abarcan desde el Río Salado por el Norte hasta el Río Elqui por el Sur. Una de las zonas más afectadas fue la cuenca del Río Copiapó. En las riveras de sus afluentes se emplazan importantes ciudades, como Copiapó, además de pueblos de menor tamaño pero que concentran una importante actividad minera y agrícola, como es el caso de la comuna de Tierra Amarilla. Entre estos afluentes, la Quebrada Carrizalillo es una de las de mayor área drenada. Tiene más de 40 km de largo

abarcando sectores precordilleranos y cordilleranos de los Andes.

Entre el 24 y 26 de marzo se desarrolló un nivel de precipitaciones que llegó a superar los 70 mm en los sectores altos de la Quebrada Carrizalillo (Figura 1d). A raíz de estas lluvias se desataron una serie de flujos de detritos que se acumularon en la confluencia de esta quebrada con el río Copiapó, distante 6,6 km aguas arriba de la comuna de Tierra Amarilla. Este trabajo muestra resultados preliminares del estudio de los flujos de detritos asociados a la quebrada Carrizalillo, con el objetivo de caracterizar el rol de ellos en el entrapamiento del Río Copiapó e inundación de la comuna de Tierra Amarilla.

### 2. Metodología

La distribución espacial de los flujos de detritos y barro fue foto-interpretada con imágenes mosaico SAF 2015 e imágenes Worldview Post-evento, del área afectada por la inundación en la localidad de Tierra Amarilla y Nantoco. El resultado fue una cartografía geomorfológica de los flujos de detritos y barro, así como de la inundación desarrollada en la zona.

En terreno se tomaron medidas de máxima inundación y depositación entre la confluencia de la Quebrada Carrizalillo con el Río Copiapó y el término del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. El volumen de depósito en el área urbana

de la comuna de Tierra Amarilla fue calculado con los datos del área de inundación total en esta zona, con el promedio de la altura de los puntos donde se tomaron medidas de depósito en esta misma zona.

Fue caracterizada la morfometría de la Quebrada Carrizalillo en base a un modelo de elevación digital. Las pendientes de la Quebrada Carrizalillo se dividieron según el trabajo de Araya – Vergara & Börgel (1972), Young (1972) y Ferrando (1993).

### **3. Resultados**

#### **3.1. Morfometría de la Quebrada Carrizalillo**

Los niveles de altura en la Quebrada Carrizalillo van desde los 585 m en la parte baja de la cuenca llegando en la parte alta a alturas superiores de 4.000 m (Figura 1a). En los sectores altos de la quebrada destacan pendientes 10° a 30° las cuales presentan un umbral geomorfológico que se traduce en una posible erosión intensa, remociones en masa y en coluviamiento (Figura 1b). En el entorno de la divisora de aguas se encuentran pendientes sobre 45° los cuales provocarían desprendimientos, derrumbes y corredores de derrubios. Lo anterior sumado a la espesa cobertura de coluvios en las laderas que denota la geología (Figura 1c), predisponen un escenario propicio para el desarrollo de flujos de detritos.

#### **3.2. Cartografía de aluviones e inundación**

El proceso geomorfológico producido temporalmente fue en primer lugar la llegada de un flujo de detrito que llegó al Río Copiapó desde la Quebrada Carrizalillo. Luego un flujo de barro descendió desde la misma quebrada depositándose sobre el depósito del flujo de detritos (Figura 2a). Esto marca una zona de acumulación en el Río Copiapó a la altura de la confluencia de la Quebrada Carrizalillo. Finalmente se desarrolló la incisión de los depósitos acumulados en la confluencia, por el caudal del Río Copiapó, lo que determinó la exportación de este material aguas abajo a través de un canal rectilíneo. Aguas abajo de la confluencia, específicamente en la zona urbana de la comuna de Tierra Amarilla, se depositó el material exportado lo que fue acompañado por la inundación las zonas más bajas de esta ciudad.

#### **3.3. Calculo de caudales sedimentarios**

El volumen de material transportado por el Río Copiapó y depositado en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla fue de 1.125.082 m<sup>3</sup>, el cual taponeó puentes donde luego el escurrimiento del agua y barro se dirigió hacia las calles inundando casas llegando el nivel del agua a alturas entre 10 a 75 cm excepto en zonas altas, donde existieron islas no afectadas por la inundación (Figura 2b). Los niveles de depósito de

sedimentos fluctuaron entre 30 y 65 cm medidos en referencia al nivel de las calles y las alturas del depósito demarcado en las paredes de las casas afectadas.

### **Discusión y conclusiones**

La inundación del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla tiene una implicancia natural y antrópica. En relación a lo natural, las intensas lluvias en un corto lapso de tiempo, la cual se asocia a la activación de quebradas tributarias de la Quebrada Carrizalillo. Por otra parte, el espesor de las coberturas de coluvios en las laderas de alta pendiente, tienen la característica de ayudar a detonar procesos erosivos. Lo anterior fomentado debido al clima árido y al largo tiempos de exposición de las unidades geológicas a la meteorización, predisponen un escenario propicio para el transporte de un gran volumen de material.

Los caudales sedimentarios produjeron un flujo con un volumen que superó el área del talweg y originó una acumulación en la intersección de la Quebrada Carrizalillo y el Río Copiapó. Este flujo de barro y detritos también se le unieron la basura acumulada en las cercanías de las quebradas y del río Copiapó. Ante esto el Puente Cerrillos, ubicado en la intersección del río Copiapó y la Quebrada Carrizalillo, se taponeo con el flujo de detritos, en donde estos entrampamientos según Börgel (1987), generan lagos de barrera los que prontamente se rompen reiniciando la marcha del aluvión, con lo cual el escurrimiento de los flujos fue hacia los caminos y casas.

La Planificación Territorial en relación a obras civiles o asentamientos humanos, especialmente cuando éstas están ubicadas en zonas de cordillera o pre-cordillera, debe anteceder al proyecto y diseño, el estudio de prevención de riesgos o catástrofe, razón que justifica en demasía los estudios de esta índole.

### **Referencias**

Araya – Vergara, J.F. & Börgel 1972. Definición de Parámetros para Establecer un Banco Nacional de Riesgos y Amenazas Naturales. Criterios para su Diseño. ONEMI/PNUD Uchile/92/009/A. Chile. Pp. 219.

Börgel, R., 1987. Fotointerpretación: Cajón del río Colorado – un estudio del área de desastre en la Codillera de los Andes Centrales de Chile. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Ferrando, F. 1993. Bases Para la Confección de Cartas de Erodabilidad. Anales de la Sociedad



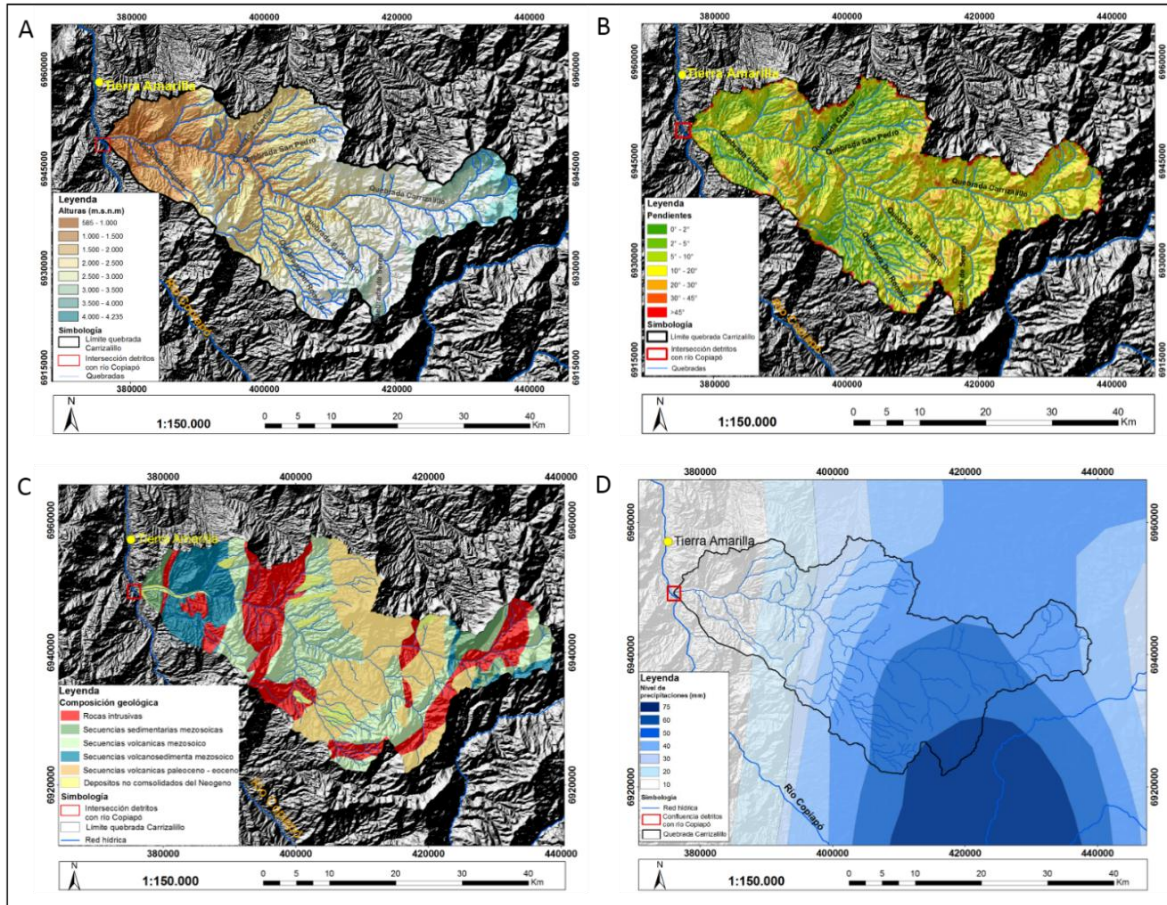
Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.

Chilena de Ciencias Geográficas, Universidad de Talca. Pp. 8.

Garreaud, R.2015. ¿Por qué se inundó el desierto norte de Chile?. [En línea] BBC en Internet. 27 de marzo 2015. [http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150327\\_lluvias\\_chile\\_porque\\_lp](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150327_lluvias_chile_porque_lp) [Consulta: 12 de abril 2015].

Sepúlveda, S., Rebolledo, S., McPhee, J., Lara, M., Cartes, M., Rubio, E., Silva, D., Correia, N., Vásquez, J. 2014. Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapacá, Atacama Desert, northern Chile. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014. Landslides (2014) 11:481–491.

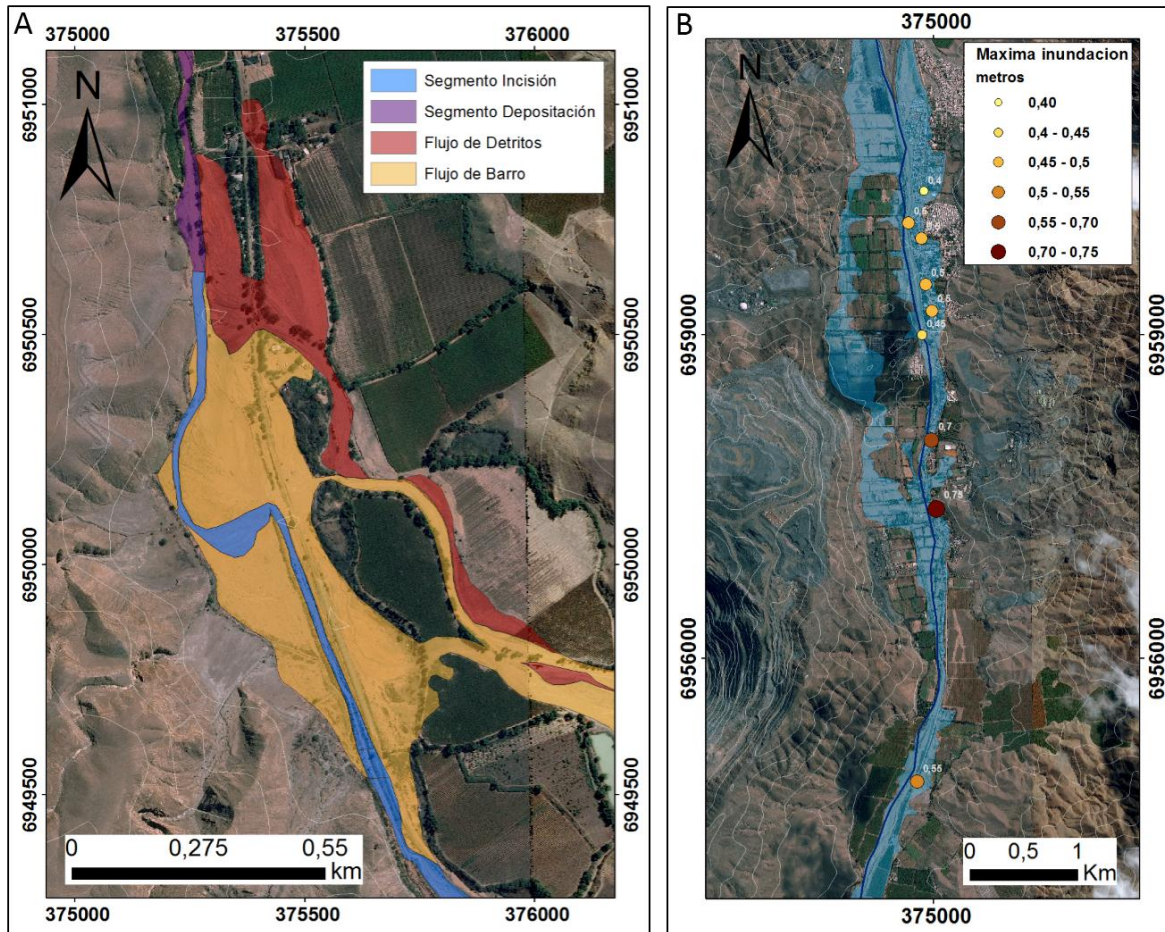
Young, A. 1977. "Slopes". Longman Group Limited. London, United Kingdom. Pp. 28



**Figura 1:** Factores y variables de la quebrada Carrizalillo. A: Distribución de altitudes obtenidas de modelos digitales de elevación SRTM 1 Arc - Second Global. B: Distribución de pendientes subdivididas de acuerdo a la metodología de Araya – Vergara & Börgel (1972), Young (1972) y Ferrando (1993). C: Geología (Fuente: SERNAGEOMIN). D: Distribución espacial de las precipitaciones acumuladas durante el evento (Fuente: imágenes Multi Satellite Retrievals for GPM IMERG). En recuadro rojo se señala la zona de deposición de los flujos provenientes de la Quebrada Carrizalillo.



Ponderación de Factores Antropogénicos y Naturales que causarían La Subsistencia de Terreno en La Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile.



**Figura 2:** A: Distribución espacial del flujo de detritos y barro; ubicación en recuadro rojo de la Figura 1. B: Mapa de inundación y puntos de máxima inundación en el área urbana de la comuna de Tierra Amarilla; ubicación en recuadro rojo de la Figura 1.