



MUNICIPALIDAD DE LEBU
SECRETARIA COMUNAL DE PLANIFICACIÓN



ESTUDIO FUNDADO DE RIESGOS PARA LA TERCERA MODIFICACIÓN DEL PRC, LEBU



Tomás Sepúlveda R.
18.665.789-6
Geólogo
Mg. Análisis Geográfico

Tomás Pablo Sepúlveda Rivera
GEÓLOGO

LEBU, 2022

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1.1. ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y PELIGROS SOCIO NATURALES	1
1.2. UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO	6
1.3. OBJETIVOS	7
1.3.1. Objetivo General	7
1.3.2. Objetivos Específicos	7
1.4. CONCEPTOS PREVIOS	7
1.4.1. RIESGOS SOCIONATURALES	7
1.4.1.1. TIPOS DE PELIGROS	8
1.4.1.1.1. REMOCIONES EN MASA	8
1.4.1.1.2. TERREMOTOS	11
1.4.1.1.3. LICUEFACCIÓN	12
1.4.1.1.4. FALLAS GEOLÓGICAS	13
1.4.1.1.5. INCENDIOS FORESTALES	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. MARCO GEOLÓGICO	16
2.1.1. PALEOGENO	17
2.1.1.1. Formación Boca Lebu	17
2.1.1.2. Formación Trihueco	17
2.1.1.3. Formación Millongue	17
2.1.2. NEOGENO	18
2.1.2.1. Formación Ranquil	18
2.1.3. CUATERNARIO	18
2.1.3.1. Terrazas Marinas	18

2.1.3.2. Depósitos litorales, y de remoción en masa	18
2.2. MARCO TECTÓNICO	18
2.3. MARCO GEOMORFOLÓGICO	19
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. GEOLOGÍA Y RESERVAS DE YACIMIENTO CARBONÍFERO EN LEBU	24
3.2. EVALUACIÓN DE RESERVA MINA LEBU	26
3.2.1. Estructuras	26
3.3. EFECTOS GEOLÓGICOS DEL SISMO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010: OBSERVACIONES EN LA CIUDAD DE LEBU, COSTA Y RÍO LEBU, PROVINCIA DE ARAUCO, REGIÓN DEL BIOBÍO	27
3.3.1. Cerro los Filtros	27
3.3.2. Cerro Hospital	27
3.3.3. Cerro La Cruz	29
3.4. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE PELIGROS GEOLÓGICOS: ÁREA DE LEBU, REGIÓN DEL BÍOBÍO	31
3.4.1. PELIGRO DE REMOCIÓN EN MASA	31
3.4.2. PELIGRO DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI	33
3.4.3. PELIGRO DE LICUEFACCIÓN	35
3.5. ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS SECTOR SANTA FÉ, HOSPITAL SANTA ISABEL DE LEBU	37
3.6. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA GEOLÓGICA E HISTORIA DE LAS EXPLOTACIONES CARBONÍFERAS DEL SUBSUELO, LOTE 1 27E, SECTOR SANTA FE, COMUNA DE LEBU	38
3.7. CONDICIONES GEOLÓGICAS, GEOMORFOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DEL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO DEL FUTURO HOSPITAL DE LEBU	40
3.7.1. ANTECEDENTES	40
3.7.2. MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO GENERAL DEL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO	40
3.7.3. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS GENERALES DEL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO	43
3.7.4. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS Y LABORES MINERAS EN EL ÁREA	43
3.8. INFORME DE MECÁNICA DE SUELOS. NORMALIZACIÓN HOSPITAL SANTA ISABEL DE LEBU	44
3.8.1. DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA DEL SITIO DEL PROYECTO	44

3.8.2. CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN Y RESULTADOS DE TERRENO Y LABORATORIO	45
3.8.2.1. CALICATAS	46
3.8.2.2. SONDAJE	48
3.9. ESTUDIO GEOLÓGICO GEOFÍSICO DEL PROYECTO NORMALIZACIÓN HOSPITAL SANTA ISABEL DE LEBU. SERVICIO DE SALUD ARAUCO	50
3.9.1. GEOLOGÍA Y USO DE DRON PARA MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D	50
4. ANÁLISIS DE PELIGROS SOCIONATURALES	52
4.1. ANÁLISIS DE INUNDACIÓN	52
4.2. ANÁLISIS DE REMOCIONES EN MASA	59
4.3. ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN	65
4.4. ANÁLISIS DE SISMICIDAD Y FALLAS GEOLÓGICAS	66
4.5. ANÁLISIS DE INCENDIOS FORESTALES	70
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
6. REFERENCIAS	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Plan regulador Comunal año 2009	2
1. 2. Modificación Plan Regulador comunal año 2015	3
1. 3. Área de estudio ZB7 y principales vías de acceso.	6
1. 4. Principales tipos de remociones en masa	9
1. 5. Caída de bloques registrada en Lebu Norte	10
1. 6. Deslizamiento rotacional registrado en la ruta 160.	10
1. 7. Embarcaciones afectadas por el terremoto del año 2010	12
1. 8. Partes de una falla	13
1. 9. Tipos de fallas geológicas	14
2. 1. Mapa Geológico de la comuna de Lebu y sectores aledaños.	16
2. 2. Mapa Geomorfológico de la ciudad de Lebu	20
2. 3. Carta geomorfológica costera de Chile,	21
3. 1. Corte transversal cuenca tectónica región carbonífera de Arauco.	24
3. 2. Zonas de fallas en plano de situación faenas carboníferas de Lebu	25
3. 3. Fotografía de deslizamiento en área del Cerro Los Filtros.	28
3. 4. Fotografía de grietas localizadas en la parte superior del escarpe en área del Cerro Hospital.	28
3. 5. Fotografía de detalle de juego de grietas en Cerro La Cruz	29
3. 6. Mapa de los principales puntos visitados por SERNAGEOMIN (2010)	30
3. 7. Mapa de peligro de remoción en Masa y relación con ZB7	32
3. 8. Mapa de peligro de inundación y relación con ZB7	34
3. 9. Mapa de peligro de licuefacción y relación con ZB7	36
3. 10. Plano Topográfico Sector Santa Fe Lote 1-27 E.	39
3. 11. Imagen superficial del área de emplazamiento del futuro hospital de Lebu	41
3. 12. Material de relleno que cubre el área de emplazamiento del proyecto	42
3. 13. Unidad arenosa correspondiente a la unidad predominante en el área.	42
3. 14. Labores mineras y fallas reconocidas en el área del futuro hospital	44
3. 15. Unidad geológica del sitio de estudio	45
3. 16. Ubicación de Calicatas	47
3. 17. Descripción estratigráfica de calicatas	47
3. 18. Ubicación del Sondaje	48
3. 19. Modelo estratigráfico del sitio del proyecto	49
3. 20. Modelo 3D con las principales características de la falla de Santa Fe	51
4. 1. Mapa de peligro de inundación para la comuna de Lebu.	53
4. 2. Carta de inundación por tsunami.	54
4. 3. Serie de precipitaciones máximas anuales modeladas según distribución Log - Normal	56
4. 4. Hidrogramas de crecidas determinados para distintos periodos de retorno	57

4.	5.	Resultados modelación para distintos periodos de retorno en torno al análisis de inundación por desborde del río Lebu	58
4.	6.	Deslizamiento rotacional registrado en la ruta 160 dentro de la zona B7	59
4.	7.	Mapa de peligro de remoción en masa para la comuna de Lebu	60
4.	8.	Factores utilizados en la elaboración de mapa de peligro de remoción en masa	63
4.	9.	Mapa de peligro de remoción en masa zona B7	64
4.	10.	Mapa de peligro de licuefacción en zona B7	65
4.	11.	Fallas presentes en la ciudad de Lebu	67
4.	12.	Sismicidad instrumental cortical registrada en la ciudad de Lebu	68
4.	13.	Mapa de peligro asociado a la falla Santa Fe	69
4.	14.	Parámetros utilizados en la determinación del riesgo de incendios	72
4.	15.	Mapa de peligro de incendios para la comuna de Lebu	73
4.	16.	Interpolación de superficies afectadas según registro histórico	74
4.	17.	Peligro de incendios forestales para la zona B7	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página	
3. 1.	Principales estudios realizados en los últimos años, y que contienen el área de estudio ZB7	22
4. 1.	Precipitaciones máximas anuales y probabilidad de ocurrencia durante el período 2000- 2020	55
4. 2.	Resultados análisis de frecuencia: test χ^2	56
4. 3.	Pp máximas anuales en 24 horas determinadas para distintos periodos de retorno	56
4. 4.	Factores utilizados para evaluación del peligro de remoción en masa	61
4. 5.	Categorización de unidades geológicas según importancia en la generación de procesos de remoción en masa	61
4. 6.	Categorización de unidades geomorfológicas según importancia en la generación de procesos de remoción en masa	61
4. 7.	Categorización de pendientes según importancia en la generación de procesos de remoción en masa	62
4. 8.	Categorización de coberturas de suelo según importancia en la generación de procesos de remoción en masa	62
4. 9.	Categorización de precipitaciones según importancia en la generación de procesos de remoción en masa	62
4. 10.	Categorización de distancias a fallas geológicas según importancia en la generación de procesos de remoción en masa	63
4. 11.	Parámetros utilizados y fuentes de información para la determinación del grado de riesgo ante incendios forestales	70
4. 12.	Factores y ponderaciones para evaluación del riesgo de incendios	71
4. 13.	Factores y peso porcentual normalizado para la evaluación del riesgo de incendios	73

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y PELIGROS GEOLÓGICOS

El ordenamiento territorial puede definirse como un gran objetivo o fin social, caracterizado por un conjunto de acciones públicas orientadas a generar un (re) equilibrio territorial (especialmente entre regiones) y una organización del espacio según una concepción definida. En el marco normativo chileno, la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE, 2011:7), a partir de la Carta Europea de Ordenación del Territorio, define el ordenamiento territorial como “la expresión espacial de las políticas económicas, sociales, culturales y **ecológicas** de la sociedad cuyo objetivo es un desarrollo equilibrado de las regiones y la organización física del espacio según un concepto rector”.

Por su parte, Gómez Orea (2008:52) en su texto clásico de ordenamiento territorial, lo define como aquel proceso que permite “identificar, distribuir, organizar y regular las actividades humanas en ese territorio, de acuerdo a **determinados criterios y prioridades**”.

Lo anteriormente definido, se materializa a través de una gama de instrumentos de planificación Territorial (IPT) que norman y orientan el desarrollo de los espacios urbanos. A nivel comunal, uno de estos IPT corresponde al Plan Regulador Comunal (PRC), que se define como: “instrumento constituido por un conjunto de normas sobre usos adecuados, permitidos o restringidos, infraestructuras, espacios públicos, equipamiento y esparcimiento, entre otros”. Este IPT, está directamente relacionado con el municipio respectivo, en comunicación con la SEREMI MINVU, quien tiene la responsabilidad técnica sobre el instrumento.

Específicamente, en la comuna de Lebu, el vigente plan regulador corresponde al PRC promulgado el año 2009 (Figura 1.1), el que, a su vez, se ha modificado dos veces, siendo la última modificación la del año 2015 (Figura 1.2). Actualmente, el PRC de la comuna, se encuentra en proceso de una tercera modificación, enmarcada únicamente en la zona B7



Figura 1.1: Plan regulador Comunal año 2009

Fuente: MINVU

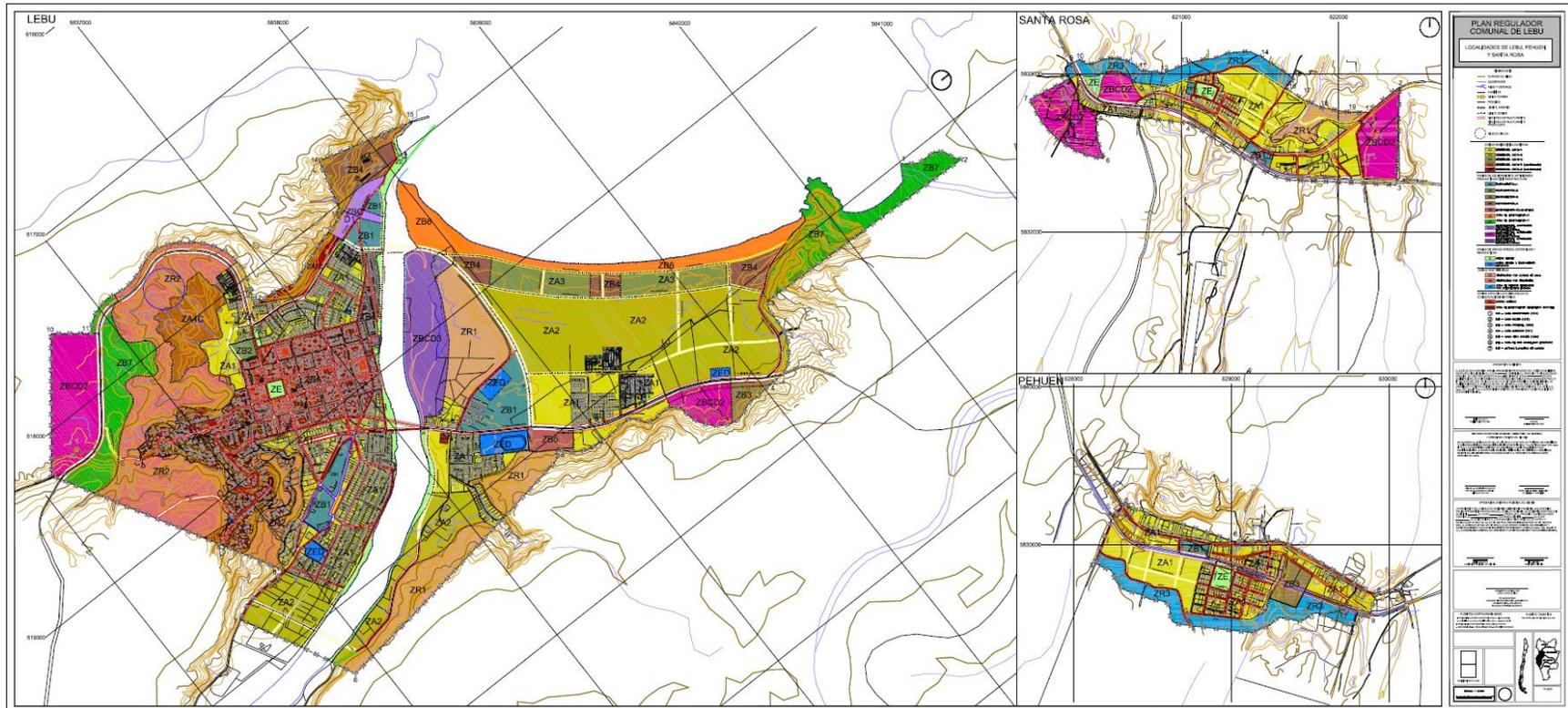


Figura 1.2: Modificación Plan Regulador comunal año 2015
Fuente: MINVU

Por otro lado, se entiende como peligro natural, a cualquier fenómeno de origen natural que puede tener efectos negativos en el territorio (personas, infraestructura, medio ambiente, etc.). Dentro de estos peligros se encuentran amenazas como terremotos, erupciones volcánicas, anegamientos, remociones en masa, aluviones, inundaciones, etc.

A nivel nacional, en los últimos años, han ocurrido todo tipo de catástrofes asociadas a peligros geológicos: terremotos de subducción (Maule 2010, Iquique-Pisagua 2014 e Illapel 2015), terremotos corticales (Aysen 2007), erupciones volcánicas (Copahue 2013, Calbuco 2015, Villarrica 2015), deslizamientos (Concepción 2006, Santa Lucía 2017), aluviones (Cajón del Maipo 2013, Norte de Chile 2015), inundaciones por desborde de cauce de río (Río Biobío 2006, Río Mataquito 2008), anegamientos por acumulación de aguas de lluvias, entre otros, que han producido la muerte de cientos de chilenos y pérdidas millonarias (Fock y otros., 2015).

La comuna de Lebu, no ha estado ajena a este tipo de peligros. En los últimos años, se ha visto vinculada con procesos de derrumbes (2010, 2017, 2018), terremotos (1960, 1985, 2010), anegamientos (2017, 2018) y desbordes del cauce del río. Es por esto, que desde la ocurrencia del terremoto del Maule 2010 (Mw 8.8), los peligros geológicos han tomado un interés importante dentro de la planificación territorial comunal.

Considerando lo expuesto, resulta manifiesta la incidencia que tienen los peligros geológicos en el éxito que pueden tener los planes reguladores comunales, es más, en la normativa chilena actual, existe una Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), vigente desde 1992, que en el artículo 2.1.17 indica que: “...*En los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un riesgo potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas, se denominarán “zonas no edificables” o bien, “áreas de riesgo”, según sea el caso...*”. La OGUC define los siguientes peligros a ser considerados en la planificación urbana:

- Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos
- Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas
- Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o **fallas geológicas**

- Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana

Como se menciona previamente, el plan regulador de la Comuna de Lebu se mantiene en vías de modificación, específicamente en la zona ZB7 (Figuras 1.1 y 1.2). Es por esto que resulta imprescindible conocer los peligros geológicos que pueden afectar dicha zona, como para establecer planes de acción y medidas de mitigación.

El presente documento, enmarcado en la zona Zb7, reúne los diferentes estudios geológicos que se han realizado en la comuna, que contribuyen al entendimiento de una posible amenaza geológica, y que, a su vez, entregan información histórica sobre la ocurrencia de algunos eventos. Asimismo, se realiza una zonificación de aquellos riesgos que se determinan presentes en la zona, con el fin de realizar una propuesta integrada de zonificación de los riesgos analizados.

1.2. UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

La zona ZB7 se ubica entre los $37^{\circ}36'51.77''$ S - $73^{\circ}40'6.49''$ W y los $37^{\circ}37'22.92''$ S - $73^{\circ}39'29.49''$ W, en la comuna de Lebu de la Provincia de Arauco en la Región del Biobío. El principal acceso¹ a la zona ZB7, desde la comuna, es recorriendo 2 km por la salida a la ruta 160. Otra vía de acceso² es por calle Saavedra hasta el sector los Filtros, y acceder por la calle Claudio Matte. Finalmente, también se puede acceder³ por calle Latorre hasta tomar la ruta P40 y en el sector “Piedra Negra” dirigirse por la ruta 160 hacia el Oeste.



Figura 1.3: Área de estudio ZB7 y principales vías de acceso. En rojo se señala la ruta principal de acceso, en amarillo la ruta por calle Saavedra y en rosado el acceso por “Piedra Negra”

Fuente: Elaboración propia

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar los riesgos asociados al artículo 2.1.17, con el fin de realizar una zonificación integrada de riesgos para la zona B7.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Discutir algunos aspectos de los antecedentes obtenidos, contrastando la información obtenida según diferentes estudios
- En base al objetivo general, determinar los principales peligros geológicos asociados a la ZB7

1.4. CONCEPTOS PREVIOS

1.4.1. RIESGOS SOCIONATURALES

Asociados a los peligros socionaturales se reconocen cuatro conceptos principales: **susceptibilidad**, **vulnerabilidad**, **amenaza** o peligrosidad (hazard) y **riesgo** (risk).

La **susceptibilidad** corresponde a una estimación cualitativa o cuantitativa de la distribución espacial de un fenómeno dado que existe o que potencialmente podría ocurrir en un área. Aunque se espera que un cierto fenómeno peligroso ocurra con mayor frecuencia en las áreas de mayor susceptibilidad, debe tenerse en cuenta que el análisis de susceptibilidad no considera el período de retorno de los eventos, es decir, el factor tiempo. La susceptibilidad depende directamente de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, como la geomorfología o factores intrínsecos de los materiales geológicos, y de factores externos que pueden actuar como desencadenantes (por ejemplo, precipitaciones intensas, vientos, sismos, etc.).

El concepto de **amenaza o peligrosidad** (hazard en inglés, cuya traducción literal corresponde a peligro, aunque se recomienda usar amenaza o peligrosidad para evitar confusiones) corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un proceso, con una magnitud determinada dentro de cierto período de tiempo y en un área específica (Varnes, 1984).

La **vulnerabilidad** corresponde al grado de pérdidas o daños potenciales de un elemento o conjunto de elementos afectados por la ocurrencia de un fenómeno de magnitud determinada. Puede expresarse cualitativamente o en una escala de 0 (sin daños) a 1 (pérdida o destrucción total del elemento) o entre 0% y 100% de daños (Varnes, 1984; González de Vallejo y otros., 2002; JTC1, 2008).

Por otro lado, el concepto de **riesgo** (risk) incorpora consideraciones socio-económicas, y se define como las potenciales pérdidas debidas a un fenómeno natural determinado, por ejemplo, vidas humanas, pérdidas económicas directas o indirectas, daños en infraestructura, etc. (González de Vallejo y otros., 2002).

1.4.1.1. TIPOS DE PELIGROS

A continuación, se definen los principales tipos de peligros geológicos que han afectado a la comuna, siendo los principales: procesos de remoción en masa y terremotos. Asimismo, asociados a eventos tectónicos se encuentran los procesos de licuefacción e inundación por tsunami.

1.4.1.1.1. REMOCIONES EN MASA

Los fenómenos de remoción en masa son procesos de transporte de material definidos como procesos de ‘movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores (Hauser,1993). Estos movimientos tienen carácter descendente ya que están fundamentalmente controlados por la gravedad (Cruden, 1991).

Existen numerosas clasificaciones para los distintos tipos de eventos de remoción en masa, las cuales han sido proporcionadas, entre otros, por (Varnes., 1978; Hauser, 1993; y Cruden y Varnes 1996). Las remociones en masa han sido clasificadas por estos últimos autores en las siguientes categorías principales (Figura 1.4):

- A) Desprendimientos o caídas
- B) Deslizamientos (rotacionales y traslacionales)
- C) Toppling o volcamientos

D) Extensiones laterales

E) Flujos

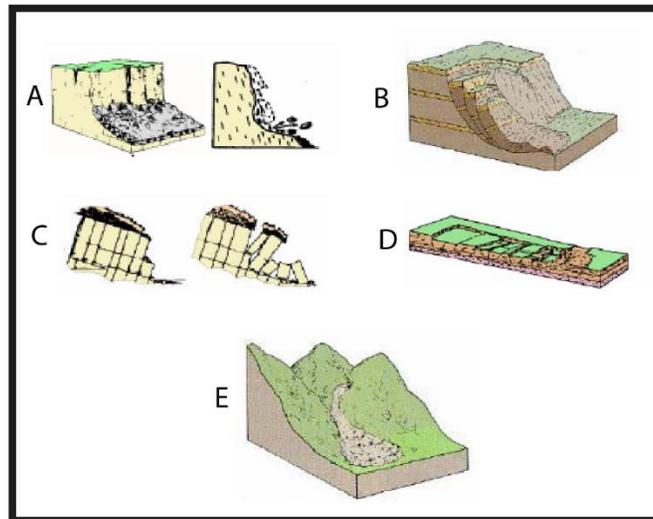


Figura 1.4: Principales tipos de remociones en masa. A: Desprendimientos o caídas. B: Deslizamientos. C: Volcamientos. D: Extensiones laterales. E: Flujos

Fuente: Repositorio Universidad de Concepción

Estas clasificaciones consideran diversos factores, como, por ejemplo, los tipos de materiales involucrados (suelo o roca), el mecanismo de ruptura y/o el grado de saturación que alcanza. Estos factores, junto con las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas del entorno, condicionan la potencial generación de remociones en masa, así como las velocidades de desplazamiento y el volumen de material desplazado.

Múltiples episodios de remociones en masa han sido reconocidos a lo largo de los últimos años en la comuna de Lebu, asociados principalmente a quebradas y barrancos, y generados, a su vez, por movimientos tectónicos o por intensas lluvias. A modo de ejemplo, en las figuras 1.5. y 1.6. se documentan dos tipos de remociones en masa: Caída de bloques (figura 1.5) y deslizamientos rotacionales (Figura 1.6)

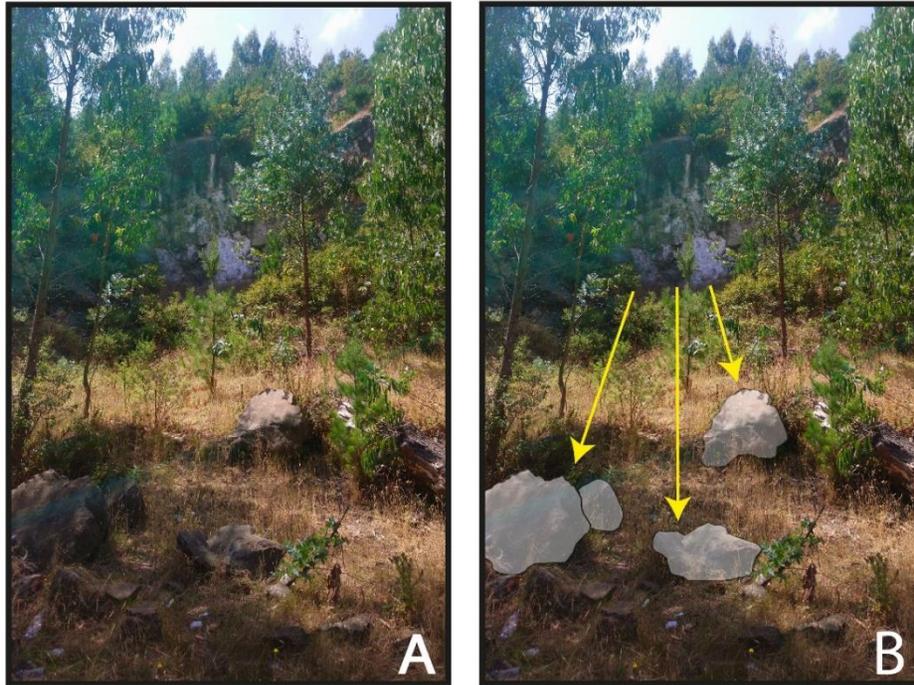


Figura 1.5: Caída de bloques registrada en Lebu Norte. Las Flechas indican dirección de los bloques, los que se desprenden de la ladera del fondo.

Fuente: Elaboración propia

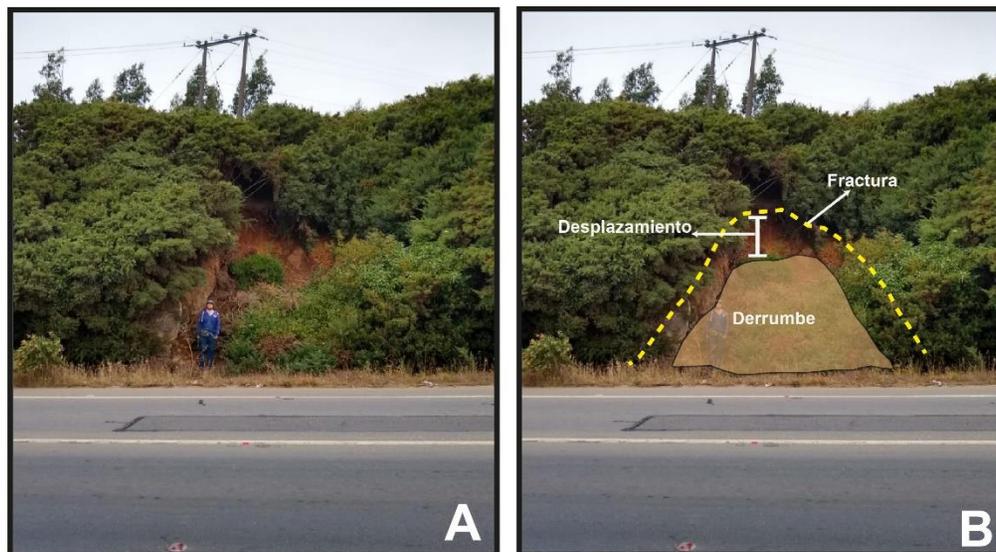


Figura 1.6: Deslizamiento rotacional registrado en la ruta 160. En la figura B se indican la zona de fractura, derrumbe y también el espesor del desplazamiento. Este derrumbe se encuentra dentro de la zona B7.

Fuente: Elaboración propia

1.4.1.1.2. TERREMOTOS

Un terremoto es el movimiento brusco de la Tierra, causado por la brusca liberación de energía acumulada durante un periodo de tiempo. La corteza de la Tierra está conformada por una docena de placas tectónicas que se están acomodando en un proceso que lleva millones de años y han ido dando la forma que hoy conocemos a la superficie de nuestro planeta, originando los continentes y los relieves geográficos en un proceso que está lejos de completarse.

Habitualmente estos movimientos son lentos e imperceptibles, pero en algunos casos estas placas chocan entre sí por lo que una placa comienza a desplazarse sobre o bajo la otra originando lentos cambios en la topografía. Pero si el desplazamiento es dificultado comienza a acumularse una energía de tensión que en algún momento se liberará y una de las placas se moverá bruscamente contra la otra rompiéndola y liberándose entonces una cantidad variable de energía que origina el Terremoto.

El borde occidental chileno, corresponde a un margen de tipo convergente en el que la placa continental Sudamericana es subductada por la placa oceánica de Nazca. La interacción de estas placas es la que produce los principales terremotos en el país, viéndose afectado cada diez años por un terremoto $M_w > 8.0$ de este tipo en algún sector del margen (Madariaga, 1998).

En la comuna, el último terremoto que la afectó fue el del Maule 2010 $M_w = 8.8$ (Moreno y otros., 2010), que generó 4 víctimas fatales y múltiples daños infraestructurales, siendo las embarcaciones asociadas a la pesca artesanal (Figura 1.7), las mayores afectadas, dado que el tsunami producido por el terremoto se encausó por el río, dañando botes y lanchas. Asimismo, el terremoto produjo en la comuna, un alzamiento del borde costero de 1.5 m, con el consecuente aumento del área de playa y alzamiento del nivel de base del río Lebu (Quezada y otros., 2012).



Figura 1.7: Embarcaciones afectadas por el terremoto del año 2010

Fuente: Material fotográfico municipalidad de Lebu

1.4.1.1.3. LICUEFACCIÓN

La licuefacción es un proceso natural mediante el cual determinados tipos de suelo pierden bruscamente su resistencia mecánica ante una carga dinámica rápida como puede ser un sismo o en menor medida una tronadura. La pérdida de resistencia mecánica del suelo implica que este se comporta momentáneamente de modo similar a un fluido, siendo capaz de migrar generando importantes deformaciones.

El sismo de magnitud 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010, en la ciudad de Lebu, provocó numerosos casos de deformación cuyas causas probablemente corresponden a procesos de licuefacción, ocasionando la destrucción de viviendas e infraestructura pública, principalmente sobre la ribera del río Lebu y a sectores muy puntuales dentro de la llanura fluvio-marina en la que se emplaza hoy la ciudad. Sin embargo, se debe tener en cuenta, que debido a que el 27 de febrero de 2010 ocurrió dentro de los meses más secos del año y, por lo tanto, el nivel freático debió estar en una posición de máxima depresión, es muy probable que la ocurrencia de este fenómeno puede abarcar una magnitud mayor, si ocurriera en los meses más húmedos del año (SERNAGEOMIN, 2010).

1.4.1.1.4. FALLAS GEOLÓGICAS

Una falla geológica es una fractura en la corteza terrestre a lo largo de la cual se mueven los bloques rocosos que son separados por ella. Las fuerzas terrestres actúan sobre la zona de falla, y, por ello, los bloques rocosos a ambos lados de ella tienden a desplazarse.

Generalmente, las fallas están asociadas con, o forman, los límites entre las placas tectónicas de la Tierra. En una falla activa, las piezas de la corteza de la Tierra a lo largo de la falla, se mueven con el transcurrir del tiempo. El movimiento de estas rocas puede causar terremotos. Las fallas inactivas son aquellas que en algún momento tuvieron movimiento a lo largo de ellas pero que ya no se desplazan.

Una falla puede componerse de varias partes o zonas tal y como se muestra en la figura 1.8.

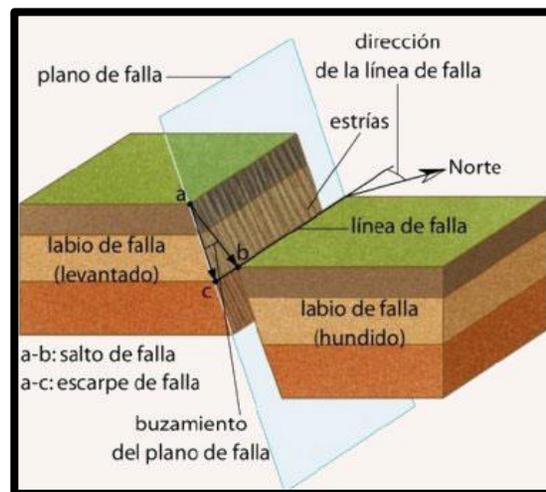


Figura 1.8: Partes de una falla

Fuente: Tomada de página web: www.geotecniafacil.com

El bloque superior se denomina bloque levantado, así como al bloque inferior, bloque hundido.

El plano que separa ambos bloques y por el cual se produce el movimiento se denomina plano de falla. Si la superficie del plano de falla está pulida se le denomina espejo de falla. En ocasiones, si hay elementos más resistentes en el plano de falla se pueden observar estrías de falla las cuales indican la dirección de movimiento. El resalte que forman ambos bloques se llama escarpe de falla mientras que la distancia que separa ambos puntos que antes estaban

unidos se denomina salto de falla. Por último, el ángulo que forma la superficie de ruptura respecto a la horizontal se denomina buzamiento del plano de falla

El tipo de movimiento a lo largo de una falla depende del tipo de falla. Los tres principales tipos de fallas son: normales, inversas y transformantes (Figura 1.9).

Las **fallas normales** ocurren cuando el bloque de techo se desplaza hacia abajo en comparación al bloque de muro, quedando por debajo del mismo. Las fallas normales suelen tener una inclinación de unos 60° disminuyendo con la profundidad. La mayoría de estas fallas se desplazan solo unos metros, con algunas excepciones de decenas de kilómetros. Las fallas normales se deben a movimientos extensivos y pueden dar lugar a zonas deprimida

Por su parte, en una **falla inversa**, el bloque de techo se mueve por encima del bloque de muro, y dependiendo de su inclinación o buzamiento, cuando este es menor a 45 grados, podemos hablar de cabalgamiento. Las fallas inversas tienden a ser de pequeña escala, mientras que las fallas por cabalgamiento, son mucho más extensas y pueden extenderse por cientos de kilómetros. Las fallas inversas y cabalgamientos se generan por fuerzas compresivas por lo que suelen dar lugar a elevaciones montañosas.

Finalmente, hablamos de **fallas transformantes** cuando el movimiento entre fallas se da de forma paralela a la superficie de las mismas. Este tipo de desplazamiento es mucho mayor, y por lo general se da en el marco de un subsistema de fallas que se desplazan simultáneamente.

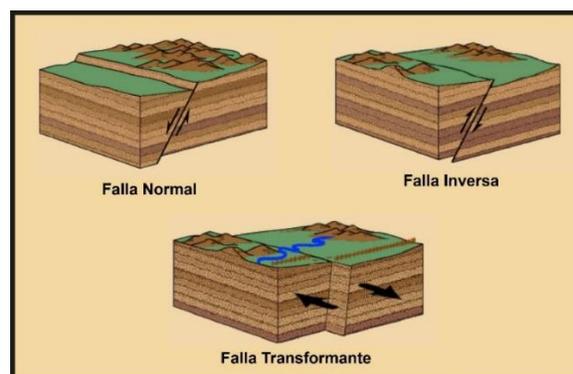


Figura 1.9: Tipos de fallas geológicas

Fuente: Tarbuck y otros., 2005

1.4.1.1.5. INCENDIOS FORESTALES

Un incendio forestal es un fuego que, cualquiera sea su origen y con peligro o daño a las personas, la propiedad o el ambiente, se propaga sin control en terrenos rurales, a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta. Es decir, es un fuego injustificado y descontrolado en el cual los combustibles son vegetales y que, en su propagación, puede destruir todo lo que encuentre a su paso.

El origen de los incendios, recae en la acción humana. El 99,7% de los incendios se inician ya sea por descuidos o negligencias en la manipulación de fuentes de calor, o por prácticas agrícolas o por intencionalidad, originada en motivaciones de distinto tipo, incluso la delictiva.

Sin embargo, en ciertas áreas del mundo, los rayos también han ocasionado incendios, contribuyendo al desarrollo de algunas formaciones vegetales, eliminando individuos sobremaduros, estimulando la semillación, abriendo espacios y creando condiciones para la regeneración natural. Pero este no es el caso de Chile, donde toda la vegetación es sensible al fuego y en la cual el daño no sólo es su quema y destrucción, sino que, además, afecta al suelo, a la fauna, al aire, al ciclo del agua y, en general, al entorno del ser humano y en ocasiones a las propias personas.

Estos daños, tanto económicos, como ambientales y sociales provienen de los 6.000 a 7.000 incendios forestales que se inician en Chile cuando las condiciones ambientales, tales como la carencia de lluvias, la mayor temperatura del aire y los flujos de viento Sur, condiciones que se dan desde la primavera de un año hasta el otoño del siguiente, favorecen la ignición de la vegetación combustible a causa de una fuente de calor aportada por el ser humano.

La superficie afectada en cada período de incendios forestales promedia las 52.000 hectáreas quemadas, pero con valores extremos que han ido desde 10.000 y 101.000 hectáreas. El mayor daño corresponde a praderas y matorrales. En menor escala arbolado natural y plantaciones forestales, principalmente de pino insigne.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO GEOLÓGICO

En la figura 2.1. se muestra un mapa geológico de las principales unidades que afloran entre las latitudes 37.20°S-37.40°S. Este mapa ha sido modificado del mapa geológico nacional (SERNAGEOMIN, 2003). Asimismo, se destaca el área de estudio correspondiente a la ZB7, la que, como se observa en la figura, se dispone en depósitos de terrazas marinas plio-pleistocenas, y en su mayoría, sobre la Formación Trihueco.

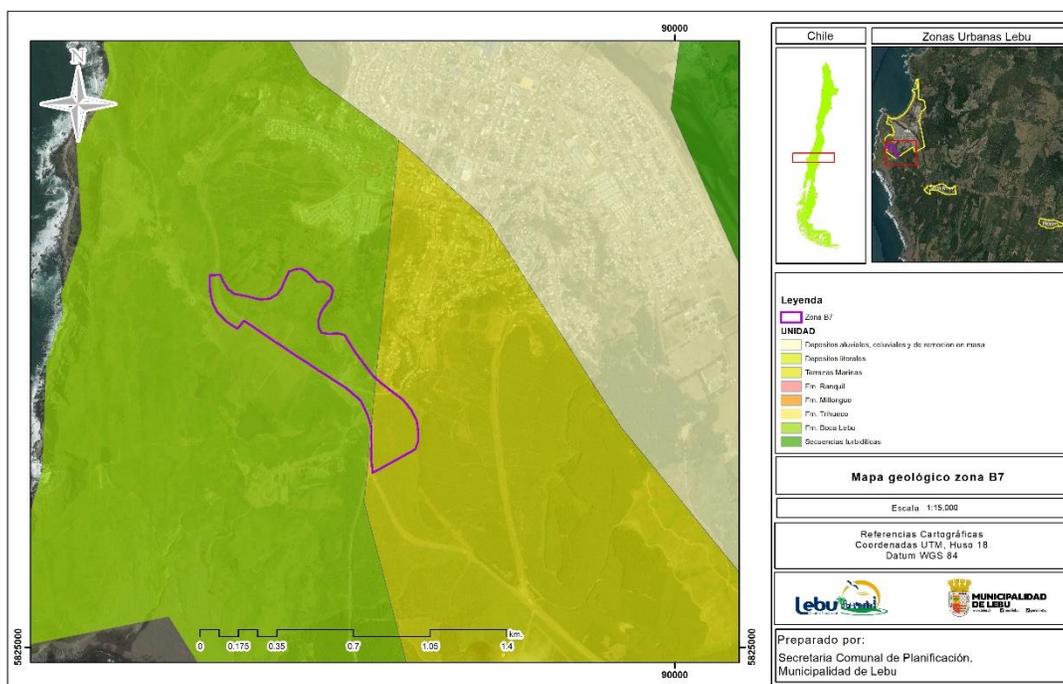


Figura 2.1: Mapa Geológico de la comuna de Lebu y sectores aledaños. Se destaca el área de estudio (ZB7).

Fuente: Elaboración propia en base a mapa SERNAGEOMIN (2003)

En la zona, se identifican como unidad más antigua a la Formación Boca Lebu, de edad Paleoceno Sup. – Eoceno Inf. Sobreyace a esta unidad la Formación Trihueco de origen marino, la que a su vez infrayace a la Formación Millongue, que tiene como localidad tipo a la caleta Millongue, al sur de la ciudad de Lebu. La última formación sedimentaria y que se deposita sobre las demás mencionadas es la Formación Ranquil, correlacionable en otros sectores del país con la formación Navidad. Las últimas rocas reconocidas en el área corresponden a las asociadas a terrazas marinas de origen cuaternario, y los depósitos

fluviales dispuestos en el valle correspondiente al límite urbano de la ciudad, los que se mezclan con los depósitos de remoción en masa asociados a deslizamientos y derrumbes de las formaciones más antiguas.

2.1.1. PALEÓGENO

2.1.1.1. Formación Boca Lebu

Definida por Muñoz-Cristi (1956) como una secuencia de areniscas grises verdosas, con contenidos moderados de fósiles marinos; hacia la base, areniscas grises con guías onduladas de arcilla y tiene espesor medio de 268 metros. Su localidad tipo se encuentra en el sector Boca Lebu. En el sector oriental de la provincia de Arauco, su base corresponde a la Formación Curanilahue e infrayace, concordantemente, a la formación Trihueco; al occidente esta formación, se encuentra sobreyaciendo discordantemente a la Formación Quiriquina e infrayaciendo concordantemente a la Formación Trihueco. La edad de esta Formación se define como Paleoceno Superior alto – Eoceno Inferior bajo.

2.1.1.2. Formación Trihueco

De edad Eoceno Inferior, Muñoz-Cristi (1956) la define como una secuencia continental, con intercalaciones de unidades marinas formadas por areniscas con intercalaciones de arcillolitas, su potencia general es de 292 m de espesor, sobreyace concordantemente a la Formación Boca Lebu e infrayace concordantemente a la Formación Millongue. Su localidad tipo se ubica en la antigua localidad minera de Trihueco

2.1.1.3. Formación Millongue

Definida por Muñoz-Cristi (1946) como una secuencia de arcillolitas (lutitas) limosas, gris claro a gris verdoso, algo glauconíticas, con macro y microfauna, con intercalaciones de areniscas finas, algo calcáreas y glauconíticas, y tiene un espesor promedio de 270 metros. Su localidad tipo se encuentra en Punta Millongue y aflora en la provincia de Arauco en dos franjas paralelas: una Oriental (Trongol, Curanilahue, Estero Chupalla, Río Cupaño y Quebrada Ranquilco) y una Occidental (Punta Lavapié, Punta Carnero, Caleta Viel, Punta

Millongue, Punta Bocarripe, Chimpe y Punta Morguilla). Para esta formación se estima una edad Eoceno Medio.

2.1.2. NEÓGENO

2.1.2.1. Formación Ranquil

La Formación Ranquil, de edad Mioceno, fue definida por García (1968) como una secuencia marina de carácter transgresivo compuesta por conglomerados finos, areniscas, limolitas y lutitas tobáceas, con una potencia general de 100 m. Su localidad tipo se encuentra en caleta Ranquil y se distribuye, ampliamente, a lo largo de la costa de la provincia de Arauco (Tavera, 1942; García, 1968; Pineda, 1983; Padilla, 1990; Elgueta y Arcos, 1993)

2.1.3. CUATERNARIO

2.1.3.1. Terrazas Marinas

Corresponden a depósitos de terrazas marinas Plio-Pleistocenas con diferentes niveles de elevación, siendo la terraza o superficie Cañete, la que presenta una mayor extensión areal. Estas terrazas, han sido divididas por (Kaizuka y otros., 1973) en tres tipos: Terrazas de baja, media y alta elevación.

2.1.3.2. Depósitos litorales, fluviales y de remoción en masa

Corresponden a depósitos Pleisto-Holocenos, continentales y marino-fluviales, que se disponen principalmente en los valles de la cuenca de Arauco.

En la comuna, se disponen en el valle generado por el Río Lebu, a lo largo de casi la totalidad del límite urbano.

2.2. MARCO TECTÓNICO

No cabe duda que los esfuerzos regionales asociados a la tectónica cumplen un rol muy importante en el modelamiento de las cuencas que dan lugar posteriormente a la depositación de las sucesiones sedimentarias (Henriquez, 2006).

Para Pineda (1983), la tectónica de bloques de los terrenos pre-pliocénicos se habría desarrollado, probablemente, en 2 fases sucesivas: una etapa eocena y otra post-miocena, cuyos sistemas de fallas mayores presentan las siguientes direcciones, ordenadas de más antigua a más joven:

- Fallas NNE (20° – 25°) correspondiente a la fase 1 (Eoceno)
- Fallas NW (340° – 345°) correspondiente a la fase 1 (Eoceno)
- Fallas NE (70° – 75°) correspondiente a la fase 2 (post-Mioceno)

Las fallas serían coincidentes con las direcciones principales de los lineamientos registrados en la zona.

Numerosas son las fases tectónicas identificadas a lo largo de la historia depositacional de la cuenca de Arauco: Fase subhercínica (Aptiano-Albiano), Fase Larámica (Cretácico-Paleoceno), Fase Incaica (post-Eoceno), Fase Quechua o Diaguita (Mioceno) y finalmente una Fase Plio-Pleistocena.

La Fase Incaica se manifiesta por movimientos “epirogenéticos” del área, conllevando un sollevamiento responsable del hiatus oligoceno y la correspondiente discordancia eocena-miocena.

La Fase Quechua, caracterizada por altas tasas de subducción hasta principios del Plioceno (Pardo-Casas y Molnar, 1987) habría producido un suave plegamiento y alzamiento de los depósitos miocenos, permitiendo la formación de la discordancia existente entre las formaciones Ranquil y Tubul.

Finalmente, la Fase Plio-Pleistocena se habría caracterizado por el desarrollo de una tectónica extensiva, generando un sistema de fallas que dan origen a estructuras tipo horst y graben, modelándose pequeñas cuencas de subsidencia con depósitos sintectónicamente afectados por el sistema de fallas descrito anteriormente (Pineda, 1983).

2.3. MARCO GEOMORFOLÓGICO

A rasgos generales, la ciudad de Lebu posee una geomorfología (Figura 2.2) modelada por procesos litorales en la cual se observan formas de erosión como acantilados litorales

generados por el choque de las olas, además se observan formas de depositación como las playas generadas por la depositación de los sedimentos erosionados del batolito granítico.

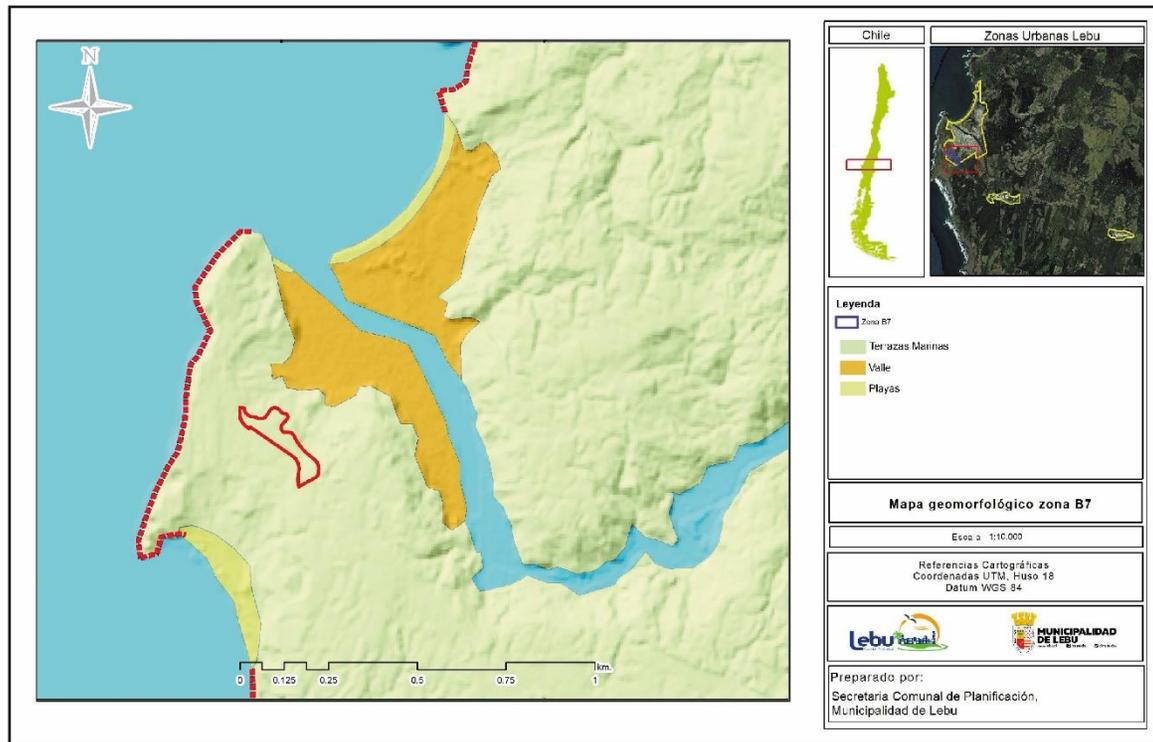


Figura 2.2: Mapa Geomorfológico de la ciudad de Lebu. Se destaca la zona de estudio ZB7, donde se observa que esta se circunscribe únicamente a la unidad geomorfológica Terraza Marina

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, la comuna se asienta en un valle formado por la erosión fluvial rodeado de plataformas o terrazas marinas cuaternarias que se han alzado recientemente en relación con las áreas aledañas. Para la ZB7, en la figura 2.2, se observa que la zona de estudio se ubica únicamente en la geoforma: “Terrazas Marinas”, aunque, se observa que para el sector Este del área, el nivel de la terraza aumenta.

Utilizando el principio propuesto por Guilcher (1954), una línea de costa puede ser paralela, oblicua o transversal a los lineamientos estructurales costeros, que son comúnmente líneas de fallas o de fracturas.

Para la costa chilena, que es tectónica, este factor explica esencialmente la configuración costera. En la descripción de los rasgos asociados se usa elementos de las clasificaciones de

(Araya-Vergara, 1976). Su selección se basa en su carácter de formas regionales típicas, criterio usado en la clasificación de Valentín (1969). En el mapa adjunto (Figura 2.3), se presenta una carta geomorfológica de la costa chilena y en ella se indican sus características.

En el caso de Lebu, podemos apreciar que presenta terrazas marinas importantes, junto con una división en dos áreas:

- Zona con estructuras oblicuas paralelas (Dichato - Lebu): El complejo de fracturas oblicuas y paralelas ha producido un fuerte desalineamiento con ensenadas en forma de zeta, que contienen grandes playas.
- Zona alineada en rocas sedimentarias blandas: La línea de costa es suave, porque ha sido regularizada por acción del oleaje, ya que la terraza costera principal está compuesta de sedimentos blandos. Entre el acantilado y el mar, el litoral está ocupado por extensas playas, mares de dunas y lagunas litorales.

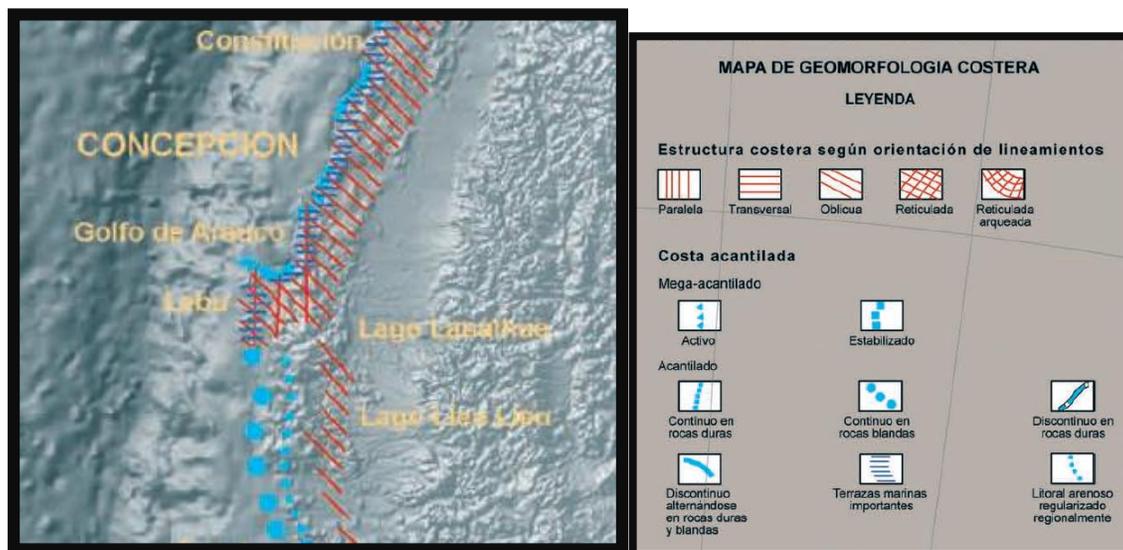


Figura 2.3: Carta geomorfológica costera de Chile, donde se observan las características de la zona de Lebu.

Fuente: Carta geomorfológica de Chile

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, se presentan los principales estudios geológicos realizados durante los últimos años, asociados a la zona ZB7, o que contienen el área de estudio (tabla 3.1).

Año	Nombre Estudio	Autor	Solicitado por
1960	Los movimientos sísmicos del mes de mayo de 1960 en Chile	Takeo Watanabe y Juan Karsulovic Kokot	
1973	<i>“Quaternary tectonic and recent seismic crustal movements in the Arauco peninsula and its environs, central Chile”</i>	Sohei Kaizuka Tokihiko Matsuda, Michio Nogami, Nobuyuki Yonekura	
1974	<i>“The Geology of Continental Margins”</i>	C.A. Burk C.L. Drake	
1982	Geología y reservas de yacimiento cabonífero en Lebu	Osvaldo Wenzel	Empresa Nacional del Carbón
2001	Estudio de evaluación de reserva Mina Lebu	Abraham Gonzalez	Empresa Nacional del Carbón
2006	Variaciones locales del nivel del mar en las cuencas neógenas de Caldera, III región y Arauco, VIII región: deducción de tasas de alzamiento y subsidencia tectónica	Álvaro Henríquez Salazar	
2009	<i>“Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile”</i>	Daniel Melnick Bodo Bookhagen Manfred R. Strecker Helmut P. Echtler	
2010	<i>“Thermal basin modelling of the Arauco forearc basin, south central Chile — Heat flow and active margin tectonics”</i>	Philipp P. Kuhn Helmut Echtler Ralf Littke Guillermo Alfaro	
2010	Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Observaciones en la ciudad de Lebu, costa y río Lebu, provincia de Arauco, región del Biobío (inf-biobío-12)	Paul Duhart, Hugo Moreno, Daniel Páez y Alejandro Ramos	Municipalidad de Lebu
2010	Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: Observaciones en el río Lebu, vertiente occidental de la Cordillera de Nahuelbuta e Isla	Felipe Espinoza, Fernando Sepúlveda Patricio Derch	Capitán de Navío Sr. Renato Navarro

	Mocha, Provincia de Arauco, región del Biobío (inf-biobío-20)		
2010	Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Lebu, Región del Bío-bío.	Daniel Paez Patricio Derch	SERNAGEOMIN
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	Jorge Quezada Edilia Jaque Alfonso Fernández Daniela Vásquez	
2014	Estudio de Mecánica de Suelos Sector Santa Fé, Hospital Santa Isabel de Lebu	Consultora LIEM	Servicio de Salud Arauco
2015	Estudio de la estructura geológica e historia de las explotaciones carboníferas del Subsuelo, lote 1 27e, sector Santa Fe, comuna de Lebu	Patricio Andrade	Municipalidad de Lebu
2019	Condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del área de emplazamiento del futuro hospital de Lebu	SERNAGEOMIN	Municipalidad de Lebu y SSA
2020	Informe de mecánica de suelos. Normalización Hospital Santa Isabel de Lebu	Carvajal Casariego Riesco Rivera Arquitectos	SSA
2021	Estudio geológico geofísico del proyecto normalización Hospital Santa Isabel de Lebu Servicio de Salud Arauco	Ramiro Bonilla Abraham Gonzalez Luis Quinzio Lucas Torres Eduardo Carvacho	Universidad de Concepción

Tabla 3.1: Principales estudios realizados en los últimos años, y que contienen el área de estudio ZB7

Como se observa en la tabla 3.1, en la última década, los estudios principalmente tienen relación con el terremoto del Maule del año 2010 Mw = 8.8; e investigaciones solicitadas por el SSA y la Municipalidad de Lebu, dado que, parte de la ZB7 corresponde a un gran porcentaje del área del futuro hospital de la comuna, por lo que, considerando lo expuesto en los capítulos anteriores, es de suma importancia integrar la mayor cantidad de factores que pueden contribuir a una correcta instalación del hospital.

A continuación, se resumen los principales estudios de la última década enmarcados en la zona ZB7. A su vez, y por fines prácticos, no se detallan todos los estudios mencionados en

la tabla 3.1. pero si se han utilizado para la construcción de los capítulos previos, y se utilizarán para el capítulo 4 correspondiente a la discusión.

3.1. GEOLOGÍA Y RESERVAS DE YACIMIENTO CARBONÍFERO EN LEBU

En el mes de septiembre del año 1982, y por encargo de la empresa nacional del Carbón, el Ingeniero Civil en Minas Osvaldo Wenzel realiza un estudio en la cuenca de Arauco y en la comuna de Lebu. En este estudio, realiza dos perfiles estructurales, siendo uno el de importancia dado que pasa por la comuna de Lebu (Figura 3.1). En este perfil, se da cuenta de múltiples fallas a lo largo de la transecta, y a su vez, en un mapa realizado también para el informe, se detalla la presencia de 3 zonas de fallas geológicas, destacando la denominada Falla Santa Fe (Figura 3.2), con orientación NNE-SSW, que pasa por la comuna, y que constituye el lineamiento de mayor tamaño en la ciudad de Lebu.

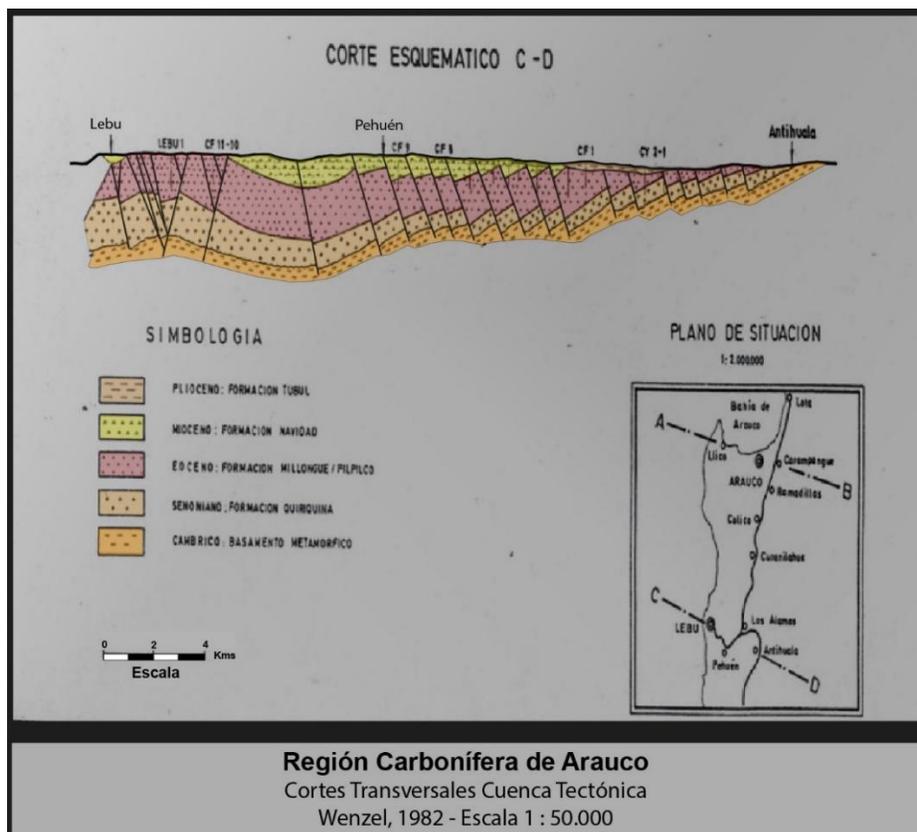


Figura 3.1: Corte transversal cuenca tectónica región carbonífera de Arauco.

Fuente: Modificado de Wenzel, 1982.

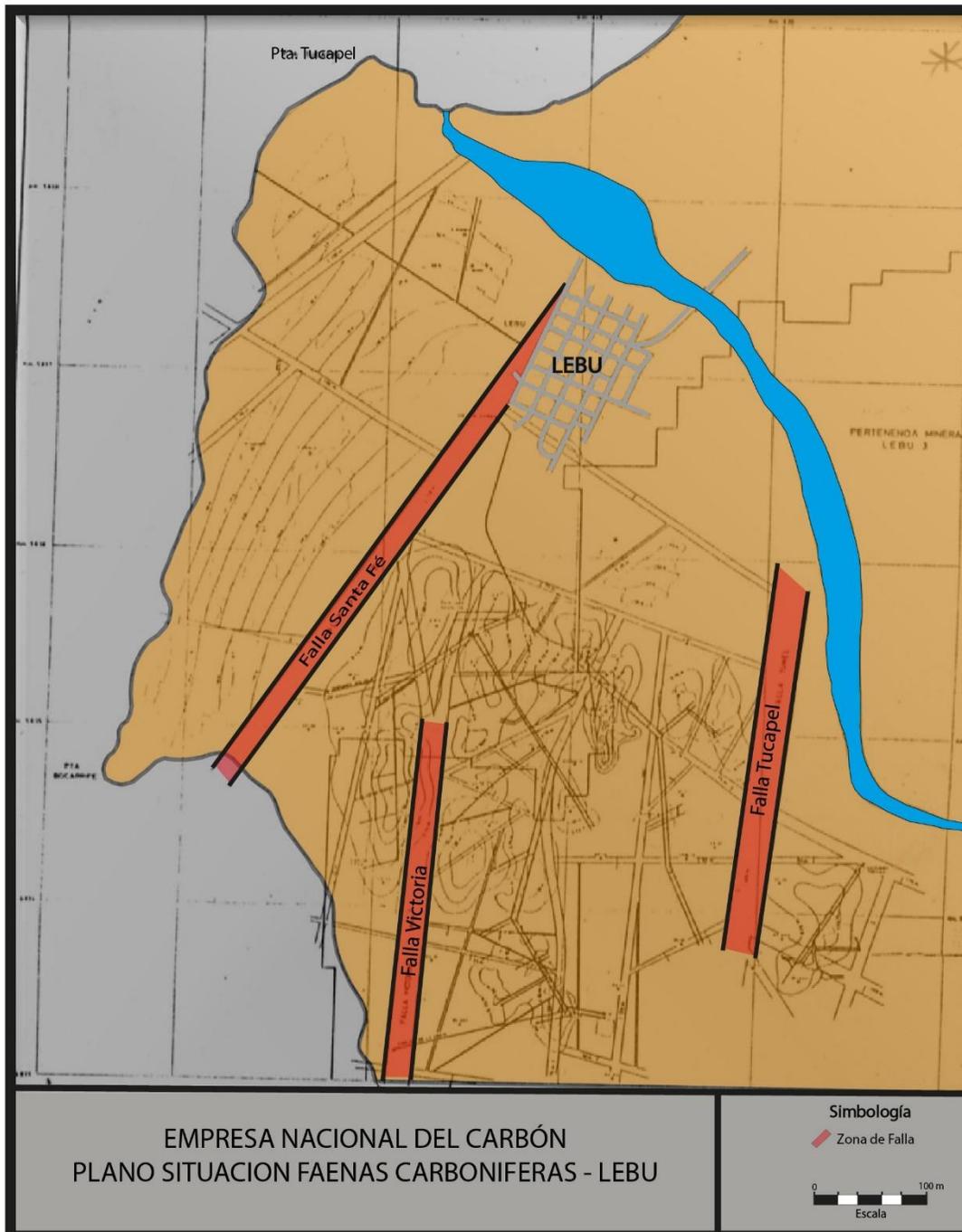


Figura 3.2: Zonas de fallas en plano de situación faenas carboníferas de Lebu.

Fuente: Modificada de Wenzel, 1982

3.2. EVALUACIÓN DE RESERVA MINA LEBU

Estudio de Evaluación de Reserva Mina Lebu realizado en agosto del año 2001 por Abraham González, geólogo, y Profesor de geología de la Universidad de Concepción.

Este informe menciona principalmente que los mantos de carbón explotados en la comuna se encuentran dentro de la formación Trihueco de edad Eoceno medio, y se describe una columna estratigráfica de aproximadamente 290 mts, caracterizada por una alternancia de bancos de areniscas gruesas, media a finas azulosas. En las areniscas finas se observan replemarks, bioturbaciones (alteraciones producidas en el sedimento por la actividad de los seres vivos) y piritas alteradas (oxidadas), con intercalaciones de limolitas de ambiente marino. En estas limolitas se pueden observar fósiles marinos y, también, se encuentran intercaladas lutitas carbonosas y ocho mantos de carbón de los cuales se explotan dos: mantos Chico y mano Alto.

3.2.1. ESTRUCTURAS

En cuanto a las estructuras principales a escala comunal, se menciona que estas siguen una tendencia general N-S, entre las cuales destacan las fallas de Santa Fe, Victoria y de Túnel. Estas fallas, serían de tipo normal con desplazamientos verticales.

3.3. EFECTOS GEOLÓGICOS DEL SISMO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010: OBSERVACIONES EN LA CIUDAD DE LEBU, COSTA Y RÍO LEBU, PROVINCIA DE ARAUCO, REGIÓN DEL BIOBÍO

El día 13 de marzo del año 2010, luego del terremoto del Maule y por solicitud de la municipalidad de Lebu, los geólogos del Servicio Nacional de Geología y Minería Paul Duhart, Hugo Moreno, Daniel Páez y Alejandro Ramos se dirigen a la ciudad de Lebu para visitar distintos puntos afectados en la comuna y alrededores. En consecuencia, la asistencia técnica prestada contempló la visita de los sectores poblados de los cerros Los Filtros, Hospital y La Cruz, además de las riberas norte y sur de la desembocadura y curso inferior-medio del río Lebu. Los sectores visitados por SERNAGEOMIN y que se encontraron más cerca de la ZB7 corresponden a Cerro los Filtros, Hospital y La Cruz

3.3.1. CERRO LOS FILTROS

Se visitó un deslizamiento ocurrido en el Cerro Los Filtros (UTM N 5.836.056; UTM E 618.613, Datum Prov. Sud 56), el cual habría sido detonado por condiciones de pluviosidad intensa en el invierno del año 2009. Efectivamente, se observó un deslizamiento de suelo de tipo traslacional hacia el oeste (Fig. 3.3), con un escarpe de colapso de dirección N-S de 20 m, aproximadamente. El escarpe de colapso manifestaba relación con un juego de grietas hacia el norte, también de dirección norte-sur, activadas por el sismo. Este juego de grietas, seguía la dirección del escarpe de la ladera y constituía un elemento que pone en peligro las viviendas situadas inmediatamente en el borde superior del escarpe. La presencia de colapsos anteriores y de una vertiente al pié del talud, constituyen argumentos y contribuyen, respectivamente, a un alto nivel de amenaza para las viviendas localizadas tanto en la parte alta como en los pies del escarpe.

3.3.2. CERRO HOSPITAL

Se visitó un sector con laderas de altas pendientes (50-60°) en el Cerro Hospital (UTM N 5.836.254; UTM E 618.556, Datum Prov. Sud 56), que exhibía agrietamientos en la parte alta de la ladera producto del sismo. Este juego de grietas, presentaba direcciones NW-SE y NE-SW, siguiendo la dirección curvada del escarpe de la ladera, con aberturas máximas de

hasta 30 cm, aunque en promedio tenían entre 2 a 4 cm y se prolongaban por más de 100 m. Un bloque de orden métrico, afectado por agrietamiento, presentaba una evidente amenaza de colapso (Fig. 3.4).



Figura 3.3: Fotografía de deslizamiento en área del Cerro Los Filtros. La flecha indica sentido del deslizamiento.

Fuente: SERNAGEOMIN, 2010



Figura 3.4: Fotografía de grietas localizadas en la parte superior del escarpe en área del Cerro Hospital.

Fuente: SERNAGEOMIN, 2010

3.3.3. CERRO LA CRUZ

Se visitó la parte alta del Cerro La Cruz (Fig. 3.5), donde se verificó la existencia de un juego de grietas (UTM N 5.836.472; UTM E 619.268, Datum Prov. Sud 56) de orientación aproximada E-W, las cuales exhibían aberturas máximas de entre 6 y 10 cm, aunque en promedio tenían entre 1 y 4 cm. Este juego de grietas se prolongaba hacia el oeste en 100 m aproximadamente, aunque con aberturas menores (1 a 2 cm) y, aunque provocan algunas deformaciones y daños, no afectaban en forma significativa a las viviendas ubicadas en sus inmediaciones.



Figura 3.5: Fotografía de detalle de juego de grietas con aberturas de hasta 4 cm, que atraviesan la parte superior del Cerro La Cruz

Fuente: SERNAGEOMIN, 2010

La figura 3.6 presenta un mapa donde se ubican según las coordenadas geográficas explicitadas en los capítulos 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 los puntos visitados y la dirección principal identificada del deslizamiento o grieta.

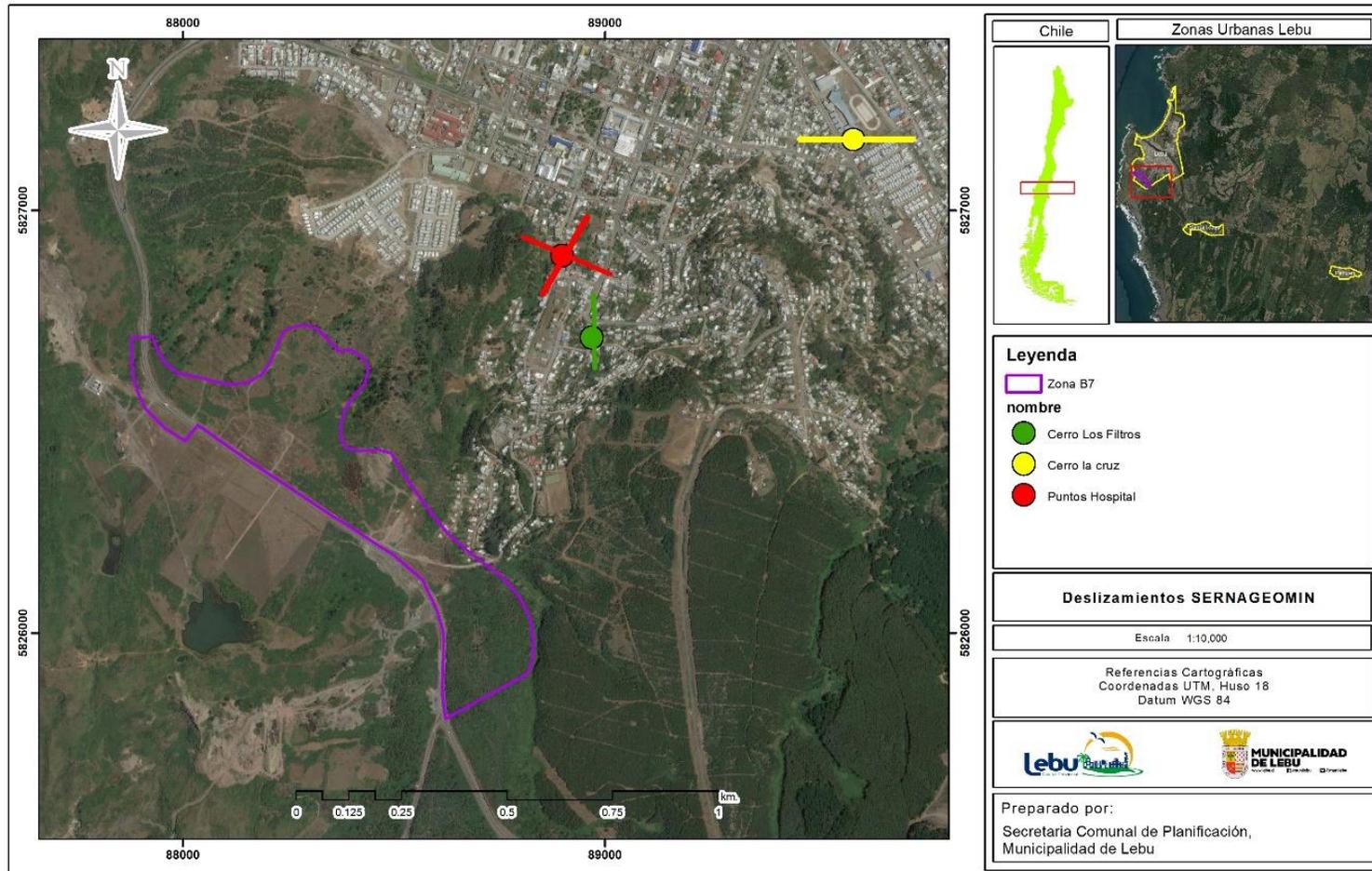


Figura 3.6: Mapa de los principales puntos visitados por SERNAGEOMIN. En el mapa se indican también las direcciones de las grietas o escarpes identificados.

Fuente: Elaboración propia basada en SERNAGEOMIN, 2010

3.4. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE PELIGROS GEOLÓGICOS: ÁREA DE LEBU, REGIÓN DEL BÍO BÍO

A raíz del terremoto del Maule 2010, SERNAGEOMIN comienza a realizar a lo largo de toda la zona afectada, distintos mapas de evaluación de peligros geológicos, donde para Lebu, evalúan los peligros de remoción en masa, licuefacción e inundación por tsunamis. A continuación, se mencionan los rasgos generales de los distintos mapas, y cuál es la situación de la ZB7, en cuanto a determinado peligro

3.4.1. PELIGRO DE REMOCIÓN EN MASA

Este mapa presenta una zonificación preliminar del peligro de remociones en masa en la ciudad de Lebu. Se identifican zonas con distinto grado de peligro, y se entregan recomendaciones generales tendientes a orientar la planificación territorial. Dentro de esta zonificación se incluyen todas aquellas remociones en masa que fue posible identificar, tanto de ocurrencia previa al evento sísmico del 27 de febrero de 2010 (Mw 8.8°), así como todas aquellas generadas como consecuencia del sismo.

Las remociones en masa ocurridas durante el sismo del 27 de febrero de 2010, corresponden en su gran mayoría a desplazamientos de propagación lateral en la ribera del río Lebu. Un deslizamiento de suelo y rocas se observó en la entrada del sector Las Cuevas. En menor medida, se constataron algunos deslizamientos de suelo, de baja magnitud y corto desplazamiento, los cuales afectaron a casas particulares situados en laderas de alta pendiente. Otro fenómeno ampliamente observado, y que puede condicionar la ocurrencia de remociones en masa futuras, correspondieron a grietas de diferente envergadura, generadas sobre la línea de escarpes pre existentes, como ocurrió en el sector Cerro Hospital y sector Cerro Los Filtros. En el sector Cerro La Cruz se generó un juego de grietas semi-paralelas de orientación predominante EW, espaciadas cada 3 a 5 m, y con abertura máxima de 2,5 cm. De manera puntual, se constató la emanación de agua subterránea desde la entrada de un piquén, en el sector Junquillo, la cual, según testimonios, habría sido gatillada por el sismo. En la figura 3.7 se presenta el mapa, identificando la zona ZB7, y se observa que la zona presenta un grado de peligro bajo a medio, con algunas zonas de peligro alto, y también, en su sector este, se ve afectada por una falla de orientación NNE-SSW.

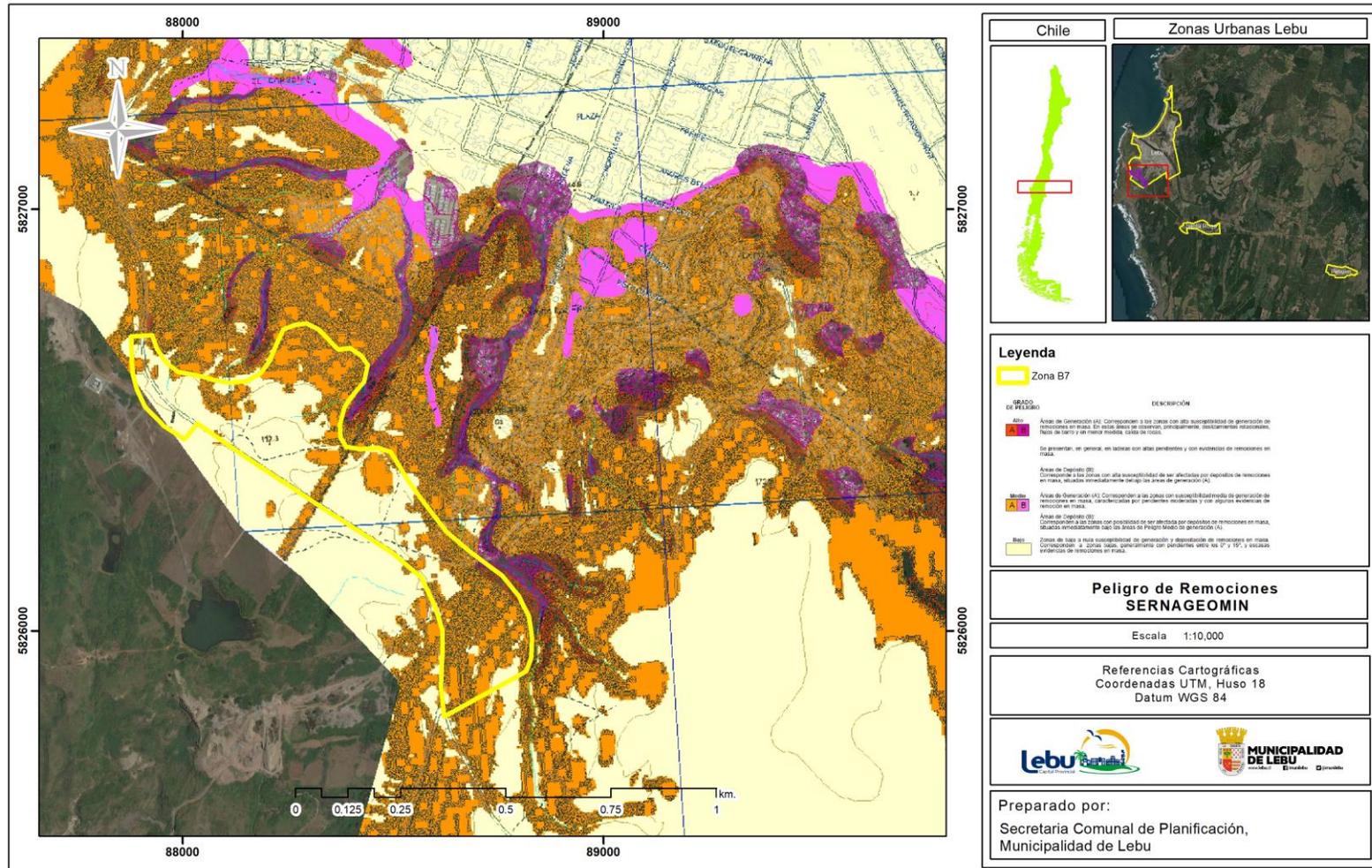


Figura 3.7: Mapa de peligro de remoción en Masa y relación con ZB7

Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN (2010)

3.4.2. PELIGRO DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI

Este mapa (Figura 3.8) muestra las zonas de peligro y de seguridad frente a una amenaza de tsunami de gran intensidad en la ciudad de Lebu e identifica aquellas superficies inundadas por los eventos de tsunami de los años 1960 y 2010.

En el caso de las áreas históricamente inundadas por tsunami, se reconoce que las ondas han ingresado, principalmente, a través del río Lebu, desbordando solo en aquellas áreas más bajas (Departamento de Navegación e Hidrografía de la Armada, 1961). En el caso particular del tsunami del 22 de mayo de 1960, se reconoce el ingreso de tres olas, con una altura promedio del orden de 3 a 4 m, las cuales remontaron río arriba hasta 5 km de su desembocadura (Departamento de Navegación e Hidrografía de la Armada, 1961). Específicamente, para el caso del tsunami del de mayo de 1960, se reconoce que una ola principal de altura estimada de 5 m, proveniente del N-NW habría impactado el muelle localizado en la desembocadura sur del río Lebu, traspasándolo levemente y alcanzando hasta los pies de los cerros de Punta Tucapel. Esta ola remontó aguas arriba del río, con una altura estimada de 4 m, la cual no alcanzó sectores poblados y se habría internado por poco más de 3 km aguas arriba (SERNAGEOMIN, 2010). Es importante aclarar que aquellas zonas no inundadas durante tsunamis ocurridos en el pasado, no constituyen en modo alguno zonas seguras, debido a que cada evento de tsunami posee características propias que determinan su capacidad para ingresar tierra adentro. Por esta razón, en este mapa las zonas consideradas como vulnerables y como seguras frente a una amenaza de tsunami, consideran una situación extrema en cuanto al ingreso máximo esperable para un flujo de tsunami y no únicamente los registros históricos locales. Las zonas de seguridad aquí identificadas corresponden a aquellos terrenos con elevaciones superiores a los 20 m s.n.m. Esta altura fue determinada mediante los antecedentes de tsunamis históricos en todo el territorio nacional, modelos numéricos elaborados por el SHOA y recomendaciones de organismos mundiales (ITIC, IOC).

Específicamente para la zona ZB7, se observa que, al estar circunscrita en un nivel topográfico alto, no se reconoce un peligro de inundación por tsunami y se engloba en la catalogación de zona de seguridad.

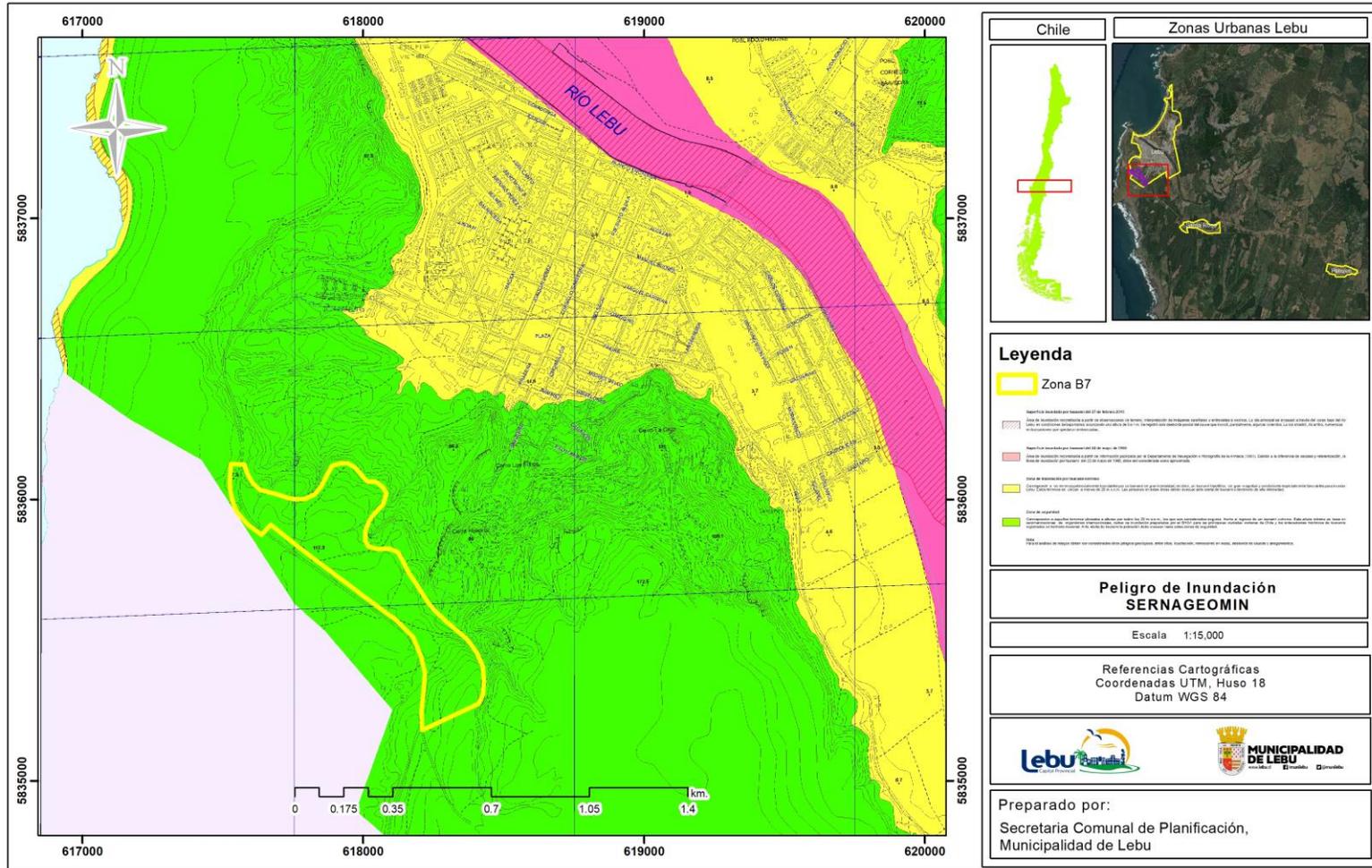


Figura 3.8: Mapa de inundación por tsunami y relación con ZB7

Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN 2010

3.4.3. PELIGRO DE LICUEFACCIÓN

Este mapa (Figura 3.9) presenta una zonificación preliminar del peligro de licuefacción en la ciudad de Lebu. Se identifican zonas con distinto grado de peligro, indicando para cada una de ellas recomendaciones generales tendientes a orientar la planificación territorial.

Los efectos de licuefacción reconocidos se limitan a las áreas de ribera del río Lebu y a sectores muy puntuales dentro de la llanura fluvio-marina en la que se emplaza hoy la ciudad. Sin embargo, se debe tener en cuenta, que debido a que el del 27 de febrero de 2010 ocurrió dentro de los meses más secos del año y, por lo tanto, el nivel freático debió estar en una posición de máxima depresión, es muy probable que la ocurrencia de este fenómeno puede abarcar una magnitud mayor, si ocurriera en los meses más húmedos del año. A lo largo de ambas de riberas del río Lebu se observaron numerosas grietas y remociones en masa de tipo propagación lateral, las que, se estima, tienen su causa en el fenómeno de licuefacción. Estas afectaron gran parte de la infraestructura de defensas de ribera, embarcadero, puerto pesquero artesanal, mercado gastronómico, sector habitacional José Miguel Carrera, más áreas verdes y de esparcimiento aledañas a ellas. En todas estas áreas se generaron franjas de deformación, paralelas a la línea de costa que alcanzan un ancho medio aproximado de 20 m, en las que se observan basculamiento y colapsos de la estructura de defensa de ribera, grietas escalonadas, algunas de ellas con aberturas de hasta 0.5 m, y hundimientos diferenciales del terreno. En la ruta costanera, al lado norte del río Lebu, se observaron grietas escalonadas, a veces concéntricas, con hundimientos asociados, sobre terrenos constituidos por depósitos arenosos de origen eólico y sobre rellenos antrópicos situados en la periferia de humedales.

Los efectos de deformación reconocidos, que se asocian típicamente a fenómenos de licuefacción del terreno, deben ser analizados atendiendo las características particulares de cada sitio, considerando que el presente estudio no contó con datos estratigráficos, hidrogeológicos ni geomecánicos que permitan definir cuáles son las capas del subsuelo, susceptibles de sufrir licuefacción ni tampoco si causas de la deformación pueden encontrarse en otro tipo de factores de inestabilidad.

En el mapa se observa que la zona de estudio no constituye un área de peligro dado que corresponde a un terreno compuesto por roca que poseen nula capacidad de licuefacción

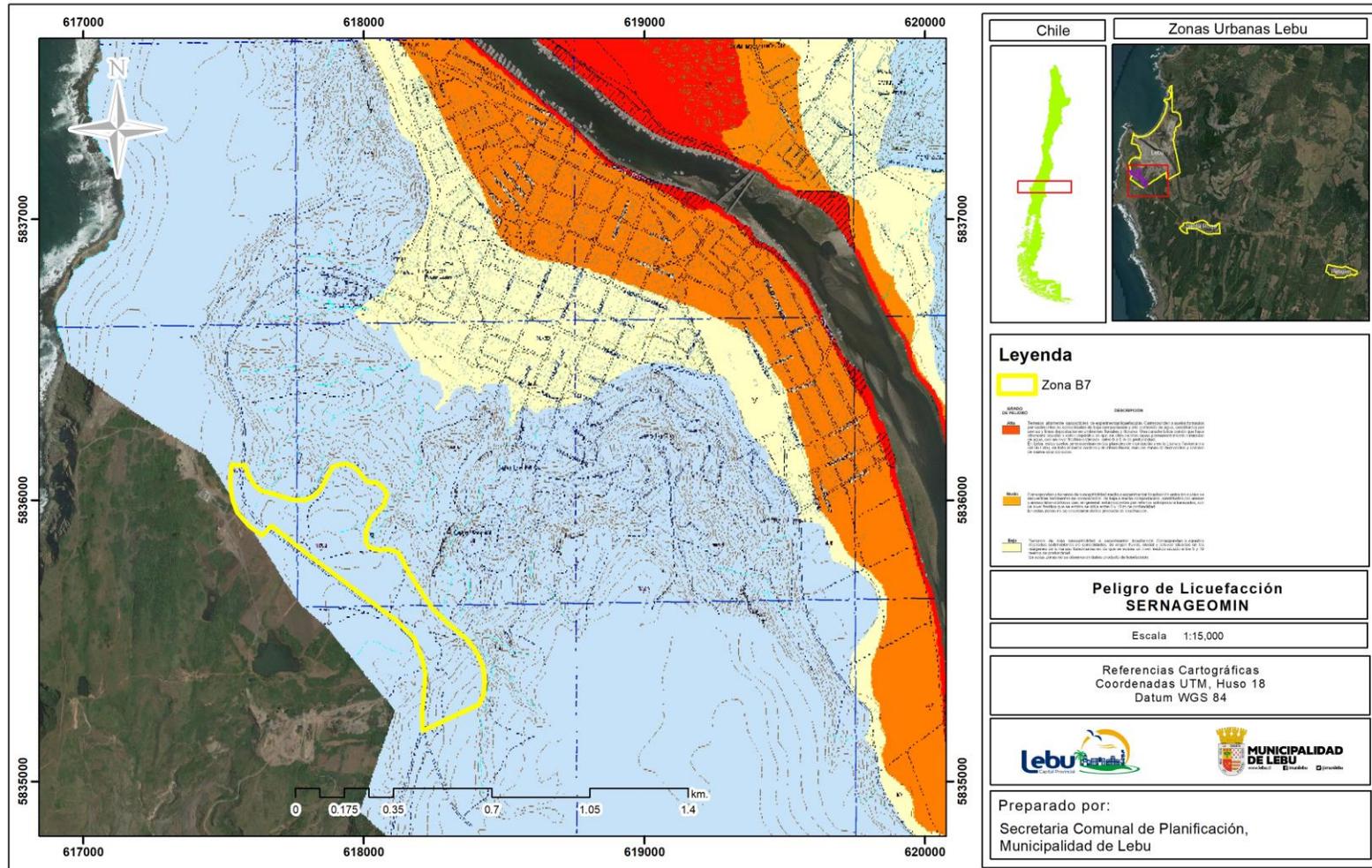


Figura 3.9: Mapa de licuefacción y relación con ZB7
Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN 2010

3.5. ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS SECTOR SANTA FÉ, HOSPITAL SANTA ISABEL DE LEBU

En el mes de diciembre del año 2014, y en relación al proyecto provincial: "Proyecto normalización hospital Santa Isabel de Lebu", el SSA solicitó una serie de estudios sobre la mecánica de suelos para el área donde se emplazará el futuro hospital. Los resultados del estudio se resumieron en un informe, que corresponde específicamente al informe N°521-14, con nombre: "Estudio de Mecánica de Suelos Sector Santa Fé, Hospital Santa Isabel de Lebu"

Este informe destaca en el apartado 3.2.2. algunas conclusiones geológicas (Informe V1 N° 521/14-A, Hoja 3 de 17), determinadas según la evaluación de un sondaje y un reconocimiento de terreno por parte de un geólogo consultor de LIEM. El informe menciona lo siguiente:

"La Roca proviene de una unidad litológica denominada Formación Ranquil de edad Mioceno (20-6 millones de años), y forma parte de rocas de la Cuenca sedimentaria terciaria de Arauco, siendo la Formación Millongue la unidad lito-estratigráfica superior y más joven"

3.6. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA GEOLÓGICA E HISTORIA DE LAS EXPLOTACIONES CARBONÍFERAS DEL SUBSUELO, LOTE 1 27E, SECTOR SANTA FE, COMUNA DE LEBU

Este estudio se realiza con el fin de determinar la interacción que pueden haber tenido las explotaciones de los mantos carboníferos, desde el inicio de estas faenas, hasta la actualidad, ya sea, por parte del sector formal (minería estatal) como por parte del sector informal llámese mediana y pequeña minería (sector de pirquineros); en el Estudio del subsuelo del Lote 1-27E (Figura 3.10) y sectores aledaños.

Ha sido realizado por Patricio Andrade Alegría, Técnico de Nivel Superior en Topografía, ex Jefe del Departamento de Planificación y Topografía de la antigua Empresa Carbonífera Victoria de Lebu, (Carvile S.A.).

Este informe, acredita y señala, que los subsuelos aledaños al Lote 1-27E, son de una conformación geológica, que provocan un rápido asentamiento entre el techo y el piso de las galerías, lo que permiten una rápida y natural compactación del terreno ya explotado, lo cual hace que por el tiempo transcurrido en las explotaciones realizadas, tanto en el Chiflón Santa Fe, como en el Socavón Victoria, estos terrenos cuentan con las compactaciones adecuadas para evitar posibles socavamientos de ello.

Asimismo, en el capítulo 4 que se denomina: “Aspectos Geológicos” se menciona la existencia de una Falla, que corresponde a la Falla de Santa Fe que no afecta a dicho Lote, por la distancia de 140 mts. que se produce entre la falla y el lote 1-27 (Figura 3.10).

Utilizando lo descrito en el informe y con el fin de identificar las características y peligros geológicos relacionados al área ZB7, se identifica a la Falla Santa Fe, como un factor geológico a considerar en la discusión (Capítulo 4) de este mismo estudio.

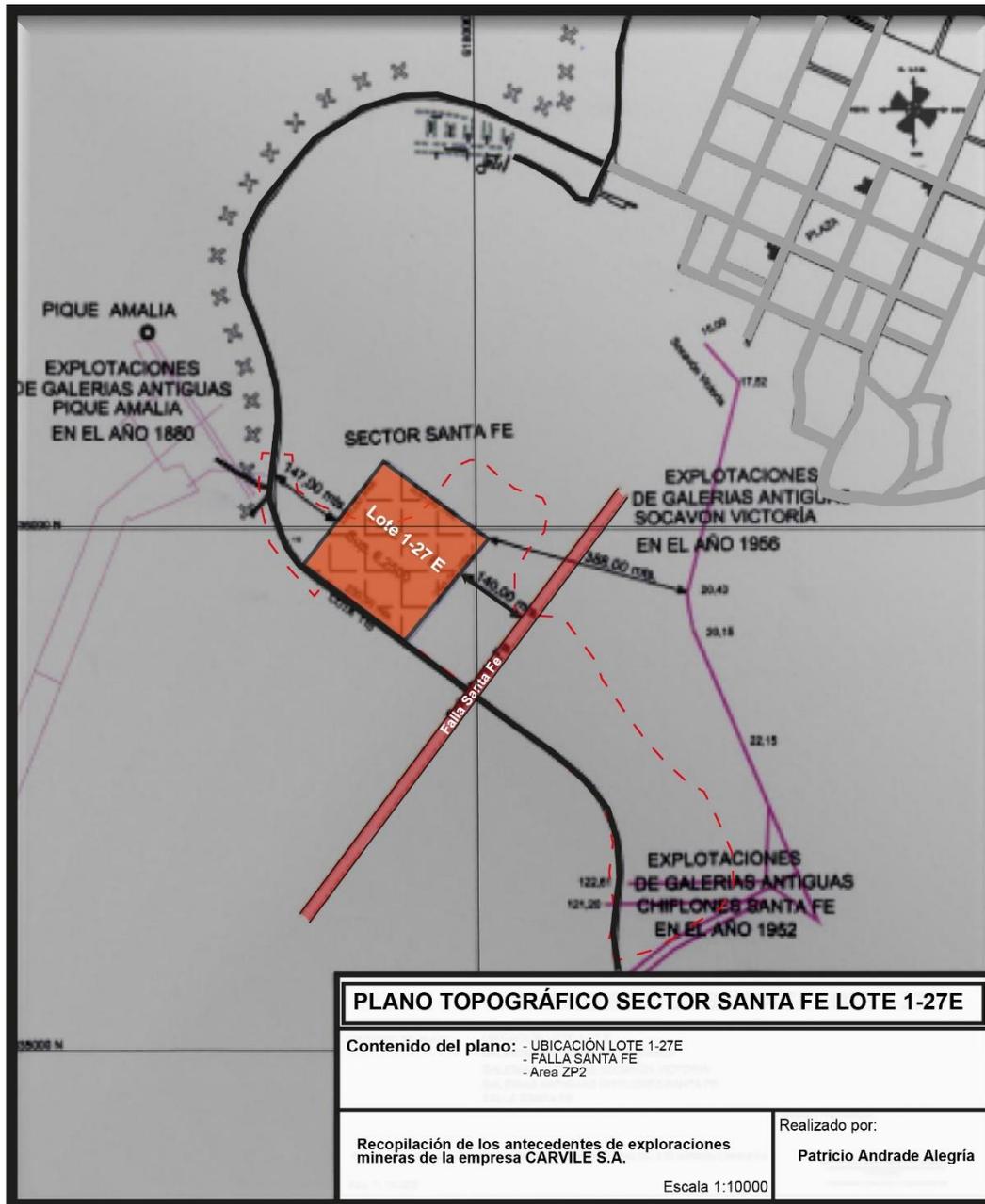


Figura 3.10: Plano Topográfico Sector Santa Fe Lote 1-27 E. En la figura se observa la ubicación del Lote 1-27 E y de la Falla Santa Fe, además de la ZB7 delimitada por la línea segmentada roja.

Fuente: Modificada del plano realizado por Patricio Andrade Alegría.

3.7. CONDICIONES GEOLÓGICAS, GEOMORFOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DEL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO DEL FUTURO HOSPITAL DE LEBU

Este informe, realizado por el SERNAGEOMIN, se realiza a petición del Servicio de Salud Arauco y la Municipalidad de Lebu, dada la vigente iniciativa de la construcción del nuevo complejo hospitalario, ubicado dentro de la zona B7. A continuación se mencionan los datos más importantes por subcapítulos.

3.7.1. ANTECEDENTES

Con fechas 20 de mayo de 2013 en Ord. N° 1038 de la dirección de Salud Arauco y 09 de enero de 2018 en Ord. N°30, se solicita información al servicio nacional de geología y minería relativa al suelo y subsuelo del terreno donde se emplazara la construcción del nuevo complejo hospitalario, sector Sta. Fe de la comuna de Lebu. Se menciona como antecedente que la información geológica con la que se realiza el informe, solo se remite a la levantada para algunos hechos puntuales de remoción en masa en el poblado de Lebu y diversos mapas de carácter preliminar levantados como consecuencia del terremoto y posterior tsunami del 27 de febrero de 2010, en los cuales no se encuentra el área en la cual se pretende emplazar el nuevo hospital. Se explicita, además, que la información geológica y geomorfológica solo se limita a las observaciones realizadas en una visita a terreno en conjunto con personal municipal al sector en enero de 2018, más la topografía entregada por el Servicio de Salud.

3.7.2. MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO GENERAL DEL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO

En general, el sector de Sta. Fe se ubica en la parte alta de una terraza que rodea la localidad de Lebu. Esta terraza corresponde a unidades de rocas principalmente sedimentarias compuestas por areniscas de origen marino. Estructuralmente, el golfo de Arauco se encuentra controlado por fallas principales de orientación preferencial NS. Estas fallas se han podido reconocer debido a los trabajos realizados durante la actividad minera carbonífera desarrollada en casi todo el sector costero de la provincia de Arauco. Para estas fallas, es posible reconocer el movimiento de los bloques con una componente tanto en la horizontal

como vertical, los cuales han influido en la morfología del sector con el alzamiento y descenso de bloques.

En el área en la cual se emplazaría el nuevo hospital corresponde a una planicie ubicada en el margen SW de la localidad de Lebu, junto a la ruta de acceso. En el sector es posible reconocer superficies planas o con muy baja pendiente, delimitadas por dos pequeñas quebradas al W y E del sector. El área se encuentra cubierta parcialmente con vegetación del tipo matorral (Figura 3.11), pero es posible observar en varios sectores el suelo en su estado natural. En general, se observa como cobertura del terreno o parte más superficial de este la existencia de relleno antrópico cuya potencia se pudo estimar en no más de 10 cm (Figura 3.12).

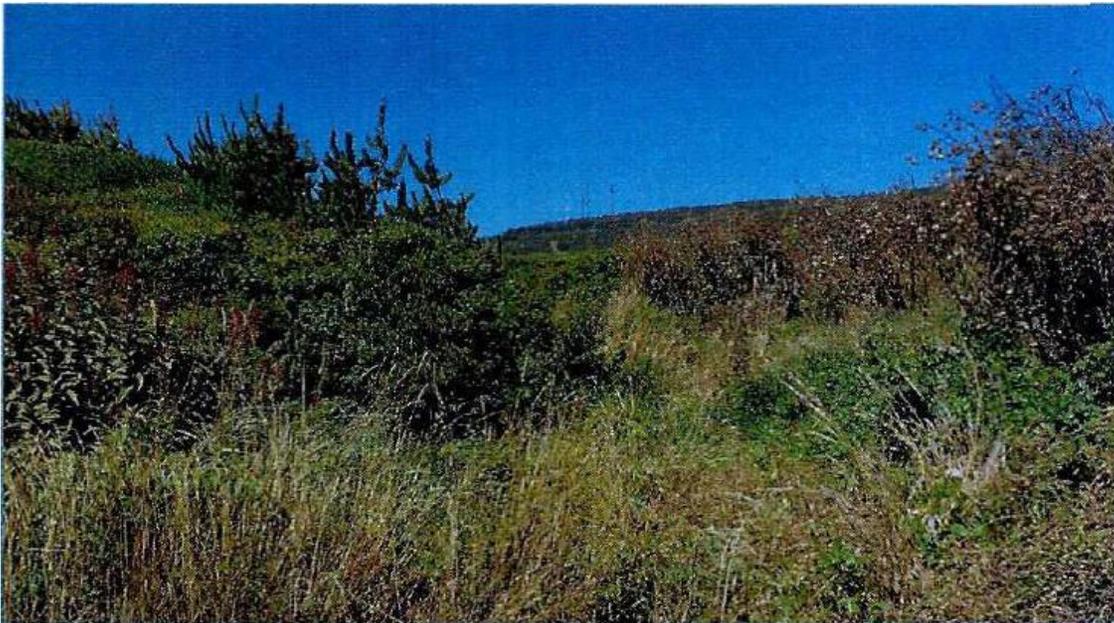


Figura 3.11: Imagen superficial del área de emplazamiento del futuro hospital de Lebu

Fuente: SERNAGEOMIN (2018)

En la quebrada ubicada inmediatamente al este del área de emplazamiento del proyecto, fue posible reconocer que subyace al material de relleno una unidad de características arcillo-arenosa de no más de un metro de potencia. Bajo esta, se reconoce una roca sedimentaria (arenisca) con una potencia indeterminada. Esta unidad, correspondería a las rocas sedimentarias de origen marino reconocidas en gran parte de la provincia de Arauco. En la figura 3.13, se observa el corte en la quebrada que permite reconocer las arenas con un moderado grado de alteración subyaciendo a la pequeña unidad de arcillas arenosas. Estas

arenas con un leve componente arcilloso son las que predominan en el sector tanto arealmente como en profundidad.



Figura 3.12: Material de relleno que cubre el área de emplazamiento del proyecto
Fuente: SERNAGEOMIN (2018)

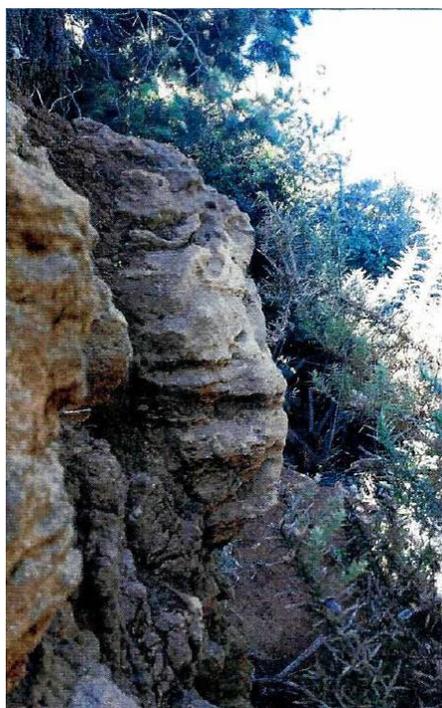


Figura 3.13: Unidad arenosa correspondiente a la unidad predominante en el área.
Fuente: SERNAGEOMIN (2018)

3.7.3. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS GENERALES DEL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO

El emplazamiento del hospital, se planifica en una terraza de características sedimentarias con pendientes moderadas, las cuales han sido suavizadas por la intervención antrópica. Superficialmente, la formación de áreas planas se realizó con la depositación de material principalmente arcilloso, que no supera los 10 cm de espesor. Le subyace un horizonte de suelo natural producto de la meteorización de la roca sedimentaria con una potencia estimada de 1 a 2 metros. Finalmente, se reconoce una roca sedimentaria (arenisca) moderadamente alterada de potencia indeterminada.

3.7.4. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS Y LABORES MINERAS EN EL ÁREA

El área se reconoce como un distrito minero carbonífero, correspondiente a una minería vetiforme subhorizontal con manteo hacia el Oeste, los que se encuentran controlados, principalmente, por fallas geológicas con desplazamientos tanto en la vertical como en la horizontal. En algunos casos, se han identificado desplazamientos de hasta 100 m en la vertical. Las fallas geológicas existentes en el sector corresponden a fallas **inversas** y de **rumbo**.

Para el caso del área de estudio, se reconoce una falla de tipo inversa con dirección NW-SE la cual se encuentra desplazada por una falla NE-SW con desplazamiento en el rumbo y manteo (conjugada). Este movimiento en la horizontal, es el que desplazaría la otra falla aproximadamente 450 m (trazos amarillos en Figura 3.14)

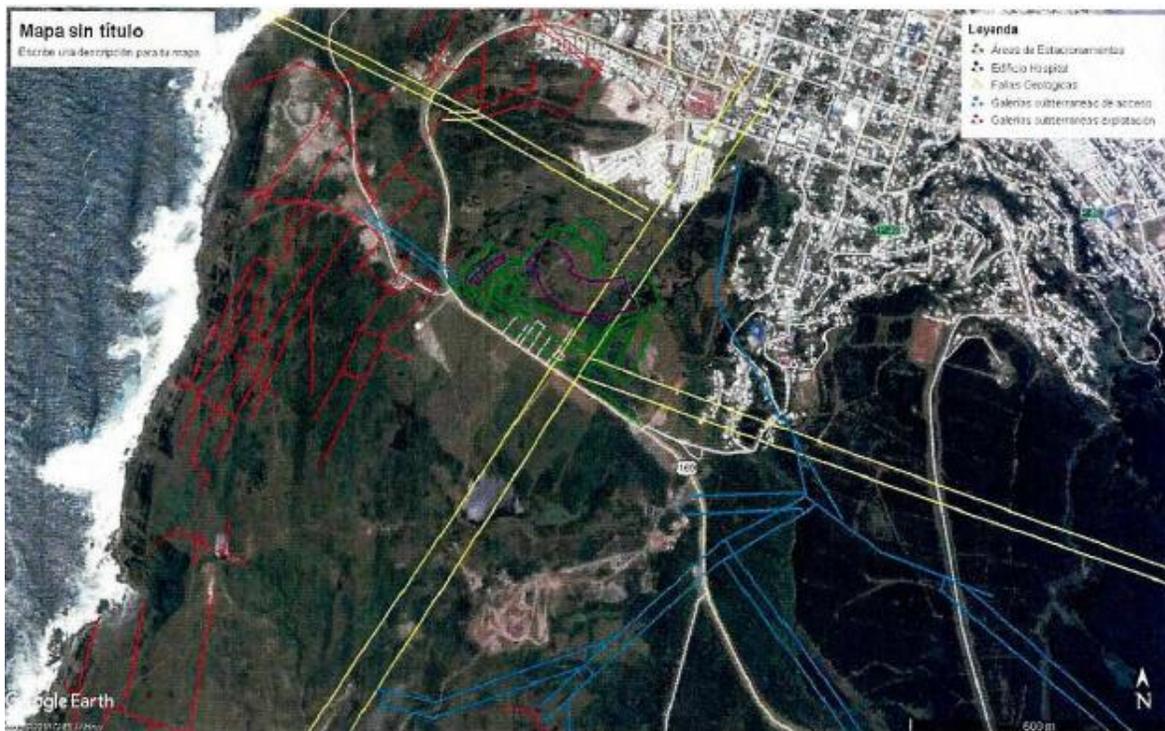


Figura 3.14: Imagen de Google Earth en la que se muestran las labores mineras de antiguas explotaciones (Color rojo) y fallas geológicas (Color amarillo) reconocidas en el entorno del emplazamiento del Futuro Hospital. En la imagen se visualiza el emplazamiento del Hospital (color lila) y sus obras anexas (estacionamiento: color verde).

Fuente: SERNAGEOMIN (2018)

3.8. INFORME DE MECÁNICA DE SUELOS. NORMALIZACIÓN HOSPITAL SANTA ISABEL DE LEBU

Corresponde al segundo informe de mecánica de suelos solicitado por el SSA en relación a la construcción del nuevo hospital Santa Isabel de Lebu. El estudio, fue realizado por CARVAJAL CASARIEGO RIESCO RIVERA ARQUITECTOS.

Este estudio, presenta, al igual que el informe del año 2014, un apartado con características geomorfológicas y geológicas, las que se resumen a continuación.

3.8.1. DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA DEL SITIO DEL PROYECTO

Tomando como antecedente el Mapa Geológico de Chile del SERNAGEOMIN, (ver Figura 3.15), se observa que el sitio en estudio se encuentra claramente inserto en la unidad

geológica denominada E1c. Ésta Unidad Geológica tuvo su desarrollo durante el Eoceno y consiste en secuencias sedimentarias continentales parálicas, compuesta por areniscas, lutitas y mantos de carbón.

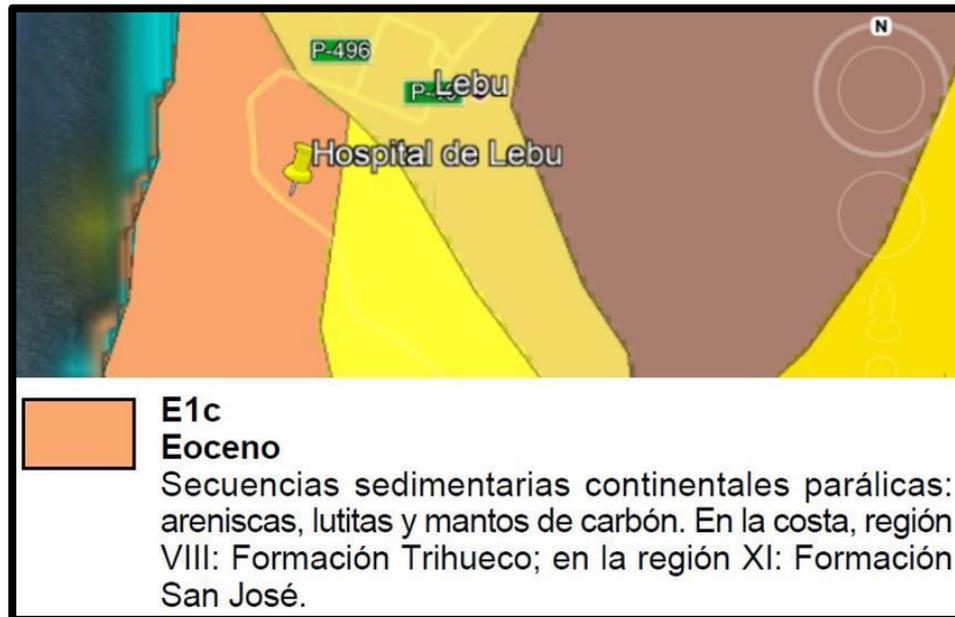


Figura 3.15: Unidad geológica del sitio de estudio

De acuerdo con el Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional, de la Dirección General de Aguas, este sector está asociado a la cuenca del Río Lebu. Esta zona presenta, en términos generales sedimentos terciarios, en la cual se observan alternaciones de lutitas y areniscas compactas con intercalaciones de mantos de carbón. Se observa un horizonte de potencia variable entre 1 a 15 metros consistente en limos arcillosos y arenas limo arcillosas. Este horizonte se caracteriza por tener bajas permeabilidades. Bajo este horizonte, el cual puede estar ausente en fondos de quebradas locales, se encuentran sedimentos terciarios más antiguos, los cuales presentan un mayor grado de compactación y menores permeabilidades. Situación que se repite en profundidad con sedimentos terciarios más antiguos.

3.8.2. CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN Y RESULTADOS DE TERRENO Y LABORATORIO

El día 12 de agosto del año 2019, se realizó la campaña de prospección por parte del laboratorio de suelos ONE Geotecnia, con el objetivo de identificar las características geomecánicas del subsuelo.

Se ejecutaron en total ocho calicatas, con profundidades de excavación entre los 2 y los 6 metros, todas medidas desde el nivel de terreno natural. Adicionalmente se inició la exploración por medio de un sondaje de 30 metros. Esto da cumplimiento con la cantidad de puntos de exploración requeridos por la normativa NCh1508.Of2014.

3.8.2.1. CALICATAS

En base a la inspección visual realizada en terreno de las ocho calicatas (Figura 3.16), de forma general, fue posible identificar los siguientes materiales en el subsuelo del sitio:

- **E – 1:** Relleno compuesto material del tipo grava arenosa presente en la mayoría de las calicatas, cuya potencia varía entre los 0,10 m y los 0,40 m. Presenta capa vegetal y presencia de raíces y raicillas.
- **E – 2:** Arcilla de color café rojiza, de humedad media, plasticidad media, consistencia firme, estructura homogénea, dilatancia lenta, resistencia seca media. En algunas calicatas se aprecia contenido de materia orgánica (raicillas). Su potencia varía entre los 1,50 m y los 2,50 m.
- **E – 3:** Limo Arenoso de color café amarillento, humedad media a alta, plasticidad baja, consistencia firme, estructura lenticular en los cuales se aprecia arena fuertemente cementada cuyo nombre local corresponde a Tosca. El estrato se desarrolla en todas las calicatas presentando un espesor mínimo de 1,60 [m] y máximo observado de 4,30 [m].
- **E – 4:** Limo Arenoso de color gris claro, humedad media a alta, plasticidad media a alta, consistencia firme, estructura homogénea, dilatancia lenta, resistencia seca media, no se aprecia contenido de materia orgánica. El estrato se desarrolla en promedio entre los 6,00 [m] hasta los 30,0 [m] que corresponde a la profundidad explorada con el sondaje.

Los perfiles estratigráficos de cada calicata hechos en base a las descripciones realizadas en terreno pueden observarse en la Figura 3.17



Figura 3.16: Ubicación de Calicatas

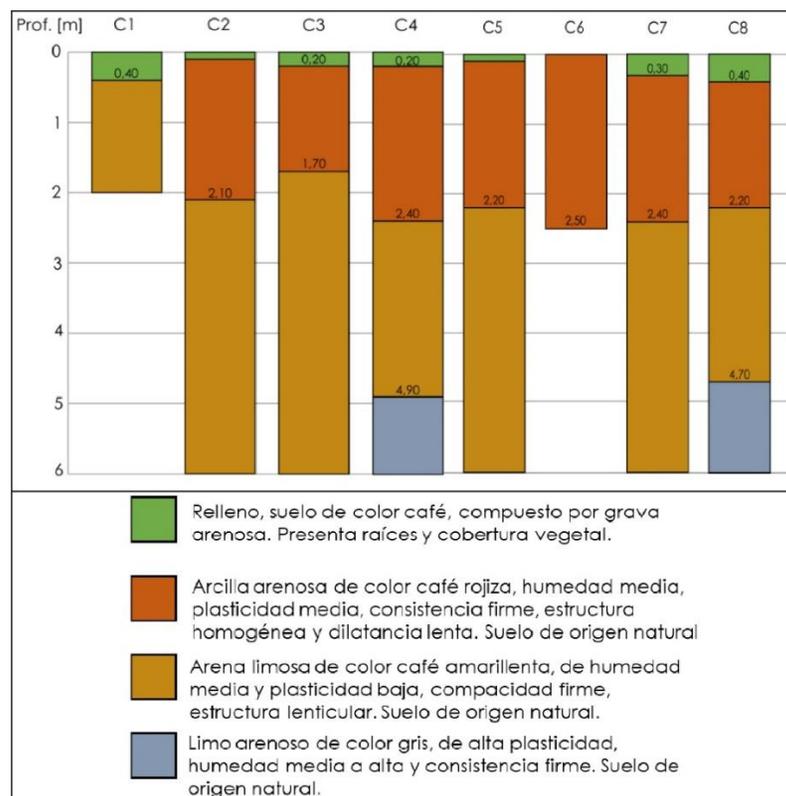


Figura 3.17: Descripción estratigráfica de calicatas.

3.8.2.2. SONDAJE

La ubicación del sondaje se muestra en la figura 3.18, mientras que en la figura 3.19 es posible observar su caracterización estratigráfica, la que se describe a continuación:

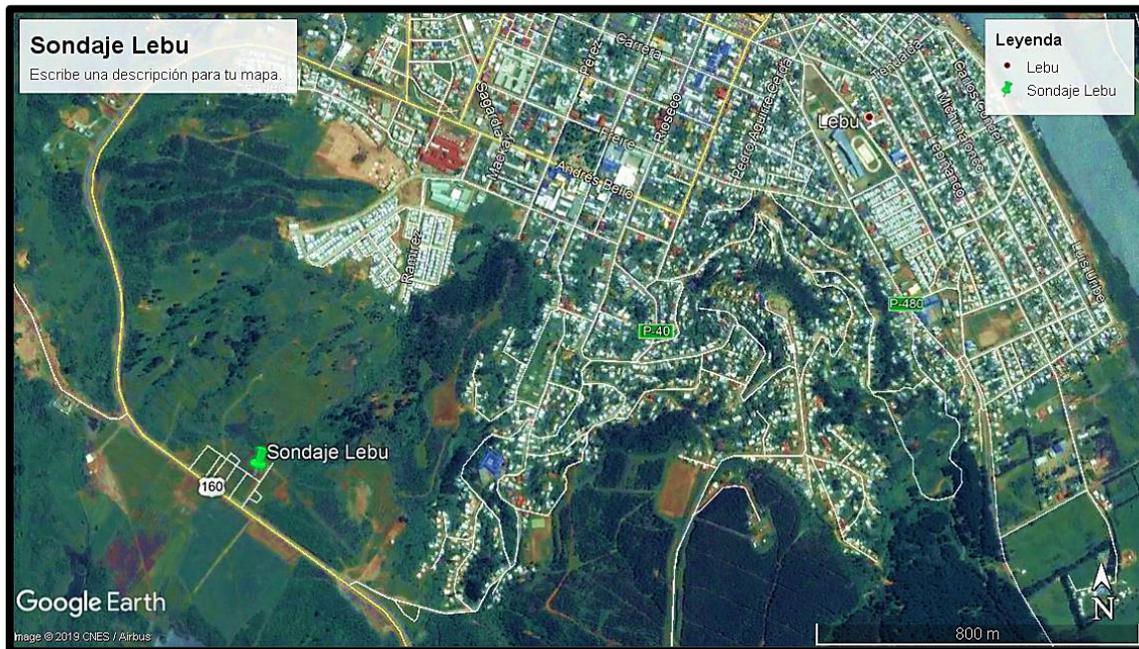


Figura 3.18: Ubicación del Sondaje

- **Unidad UG1:** Relleno antrópico compuesto por grava arenosa color café oscuro pobremente graduada. Presenta suelo vegetal en superficie, humedad media, plasticidad de los finos nula, compacidad media a baja y estructura homogénea. Sus partículas presentan cantos redondeados a subredondeados, con un tamaño medio de 3/8" y un tamaño máximo observado de 2". Posee una potencia variable, con un espesor estimado promedio de 0,30 m.
- **Unidad UG2:** Arena limosa de color café rojizo, de humedad media, plasticidad baja a media, de compacidad firme, estructura homogénea y sin indicios de materia orgánica. Su potencia es variable, estimándose un espesor promedio de 1,00 m.
- **Unidad UG3:** Arena limosa a limo arenoso de color café claro amarillento, humedad media, compacidad media y plasticidad variable de nula a media. Presenta estructura lenticular en las cuales se aprecia arena de color café grisáceo fuertemente cementada. Se estima que su potencia es de 2,50 m, aproximadamente.

- **Unidad UG4:** Arena fina de color café claro, humedad alta, plasticidad de los finos media a alta, compacidad media y estructura lenticular de arena fina color café claro de alta cementación y lentes de limo de color café claro y gris. Se desarrolla aproximadamente entre los 3,80 m y 7,00 m de profundidad, medidos a partir del nivel de terreno natural.
- **Unidad UG5:** Limo arenoso de color gris claro y tonos azules, con humedad de media a alta, plasticidad alta, consistencia variable en profundidad. Presenta lentes de arcilla limosa de color gris claro y cementación débil a moderada. Se desarrolla aproximadamente entre los 7,00 m y 30,00 m de profundidad, medidos a partir del nivel de terreno natural.

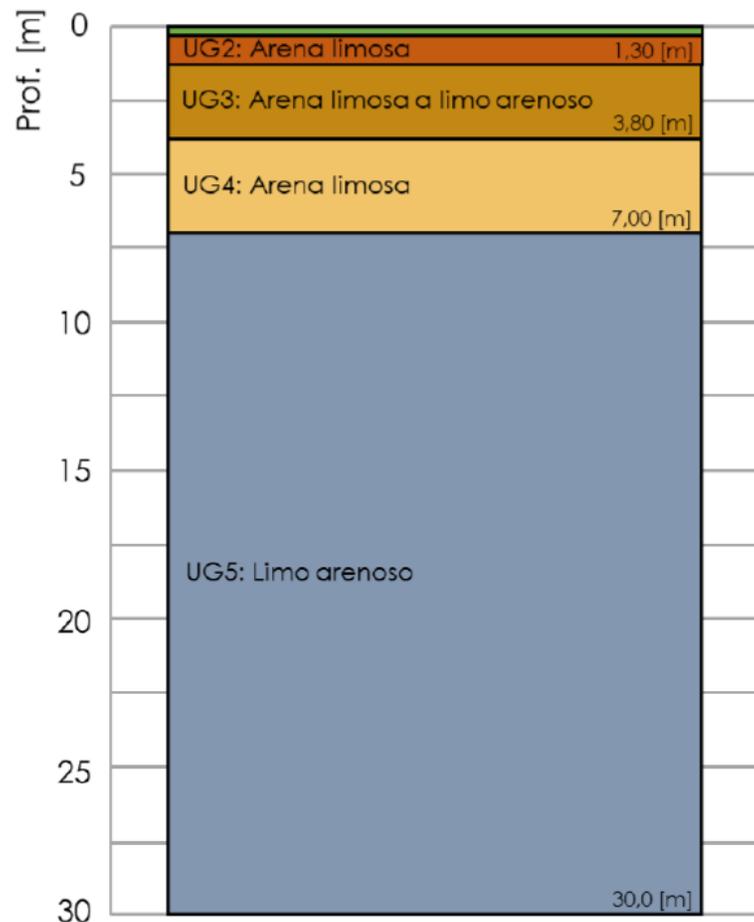


Figura 3.19: Modelo estratigráfico del sitio del proyecto

3.9. ESTUDIO GEOLÓGICO GEOFÍSICO DEL PROYECTO NORMALIZACIÓN HOSPITAL SANTA ISABEL DE LEBU. SERVICIO DE SALUD ARAUCO

Corresponde a un informe realizado por la Universidad de Concepción, y solicitado por el Servicio de Salud Arauco, a raíz de la latente preocupación en relación a la construcción del hospital Santa Isabel de Lebu, en la zona ZB7, la que, según algunos estudios descritos en este trabajo, presentaría dentro de sus deslindes, parte de la traza de la Falla de Santa Fe.

A raíz de esto, y dada la incertidumbre respecto a algunos parámetros de la Falla, es que se realiza el estudio, con el objetivo de parametrizar eficazmente la Falla de Santa Fe, ya sea según su ubicación, rumbo, manteo, vergencia y tipo de falla.

3.9.1 GEOLOGIA Y USO DE DRON PARA MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D

Dentro de los capítulos del informe, destaca la realización de un modelo geológico tridimensional y en profundidad, donde se observan las principales características de la Falla, así como también se concluye que dicha falla no se sitúa dentro del área de construcción del futuro hospital.

Asimismo, las principales conclusiones del informe destacan que la Falla de Santa Fe corresponde a una falla de tipo Normal con desplazamientos en la vertical de ~200, Además, corresponde a una falla inactiva, con vergencia hacia el Oeste, rumbo N35°E y un manteo aproximado de 60-80°.

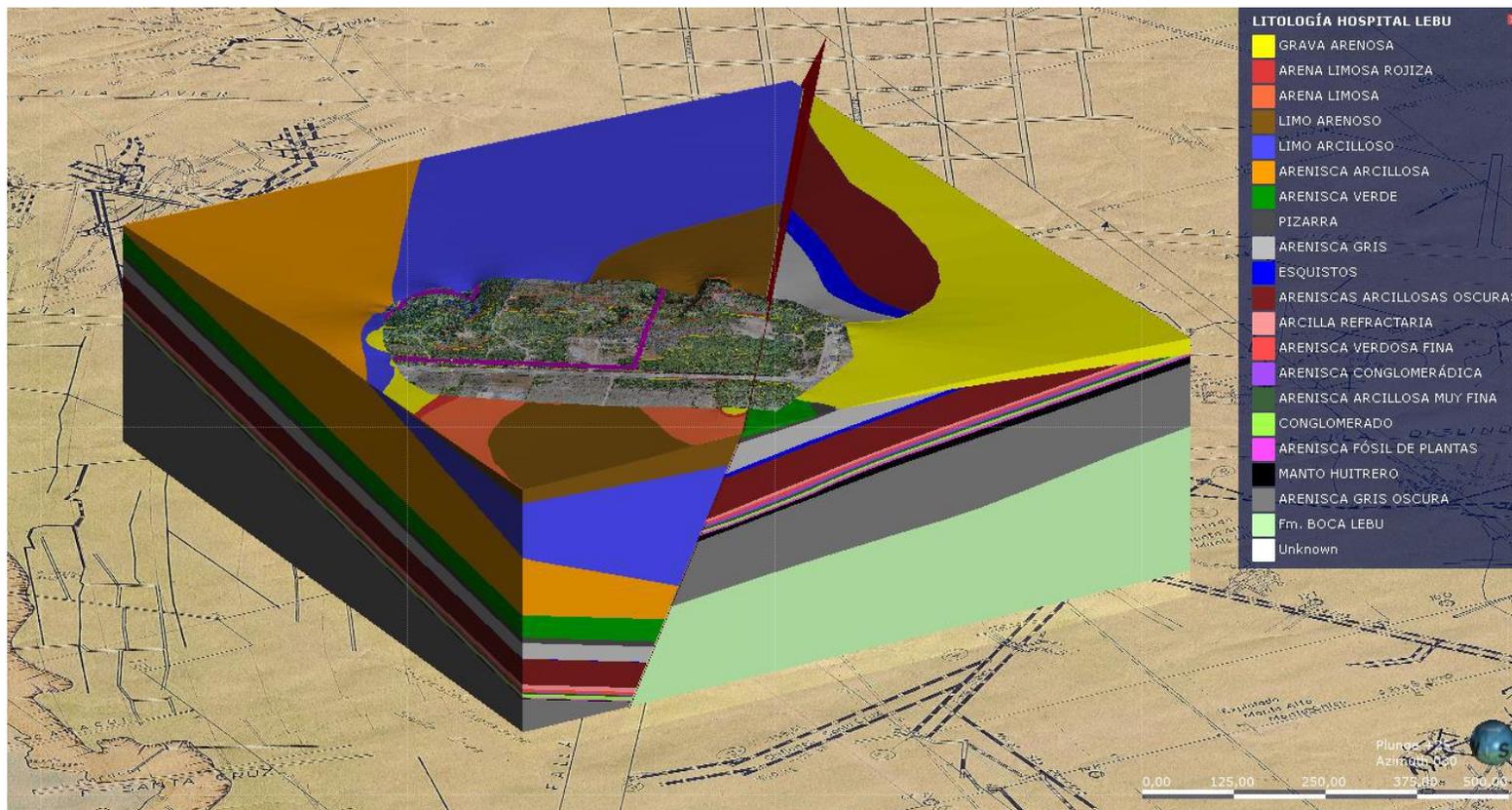


Figura 3.20: Modelo 3D con las principales características de la falla de Santa Fe

Fuente: Universidad de Concepción (2020)

4. ANÁLISIS DE PELIGROS SOCIONATURALES

Considerando las zonas de riesgo definidas en la ordenanza general de urbanismo y construcción, específicamente en su artículo 2.1.17; a continuación, se realiza un análisis de los principales peligros naturales que afectan a la comuna, tales como: inundación, remoción en masa, licuefacción y fallas geológicas.

4.1. ANÁLISIS DE INUNDACIÓN

En relación al peligro de inundación, se realiza un análisis de inundación por tsunamis, así como también, un análisis de inundación por desborde del río Lebu.

En cuanto al análisis de inundación por tsunamis, se utiliza la información existente asociada a la carta de inundación por tsunamis (CITSU, 2018) realizada por el SHOA, así como también el mapa de peligro de inundación por tsunami, realizado por SERNAGEOMIN.

La figura 4.1. muestra el mapa de inundación por tsunami realizado por SERNAGEOMIN el año 2010. Dicho mapa, se realizó utilizando los criterios internacionales de inundación, como la cota 30 como límite de máxima inundación.

Asimismo, la figura 4.2. muestra a carta de inundación por tsunami (CITSU, 2018) junto con la zona B7 y la cota de 30 m s.n.m. Esta carta se elaboró utilizando el modelo de simulación numérica COMCOT. Este modelo fue alimentado con la información topográfica, batimétrica y trama urbana más actualizada disponible ese año.

Considerando esta información, se puede concluir que no existe peligro de inundación por tsunami asociado a la zona B7.

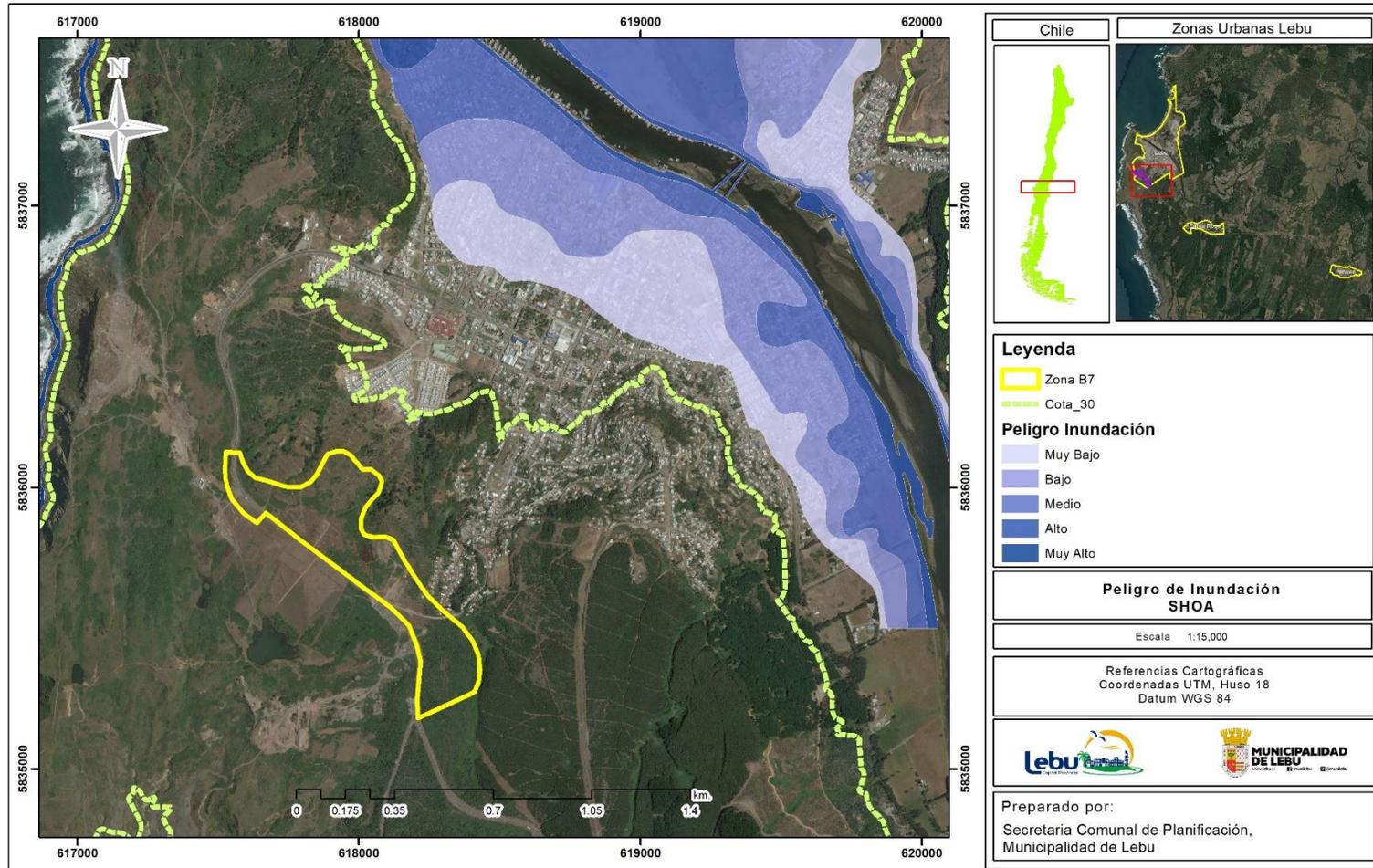


Figura 4.2: Mapa de peligro de inundación por tsunami y relación con ZB7

Fuente: SHOA, 2018

Por otro lado, en relación al peligro de inundación por desborde de cauces, se realiza un análisis de inundación por desborde del río Lebu, realizada para distintos periodos de retorno: $T = 10$, $T = 25$, $T = 50$, $T = 100$, $T = 200$.

La modelación se realiza utilizando los datos de precipitaciones de la estación más cercana al río, correspondiente a la estación Curanilahue, para el período 2000-2020 (Tabla 4.1).

Año	pp anual máx diaria (mm)	P de ocurrencia (%)
2008	207	5 %
2017	200	10 %
2006	175	14 %
2000	149	19 %
2005	135	24 %
2001	137	29 %
2002	124	33 %
2010	117	38 %
2009	109	43 %
2012	105	48 %
2003	103	52 %
2014	100	57 %
2004	94	62 %
2007	92	67 %
2019	91	71 %
2013	83	76 %
2020	80	81 %
2011	78	86 %
2015	72	90 %
2018	58.5	95 %
2016	56	100 %

Tabla 4.1: Precipitaciones máximas anuales y probabilidad de ocurrencia durante el período 2000- 2020

Fuente: Elaboración Propia, basada en datos de DGA

Posteriormente se realiza un análisis de frecuencia, donde se determina la distribución matemática que mejor se ajuste a los datos (Figura 4.3, Tabla 4.2.). Con esto se obtienen las precipitaciones máximas en 24 horas para distintos periodos de retorno (Tabla 4.3), las que permiten determinar los hidrogramas de crecidas y el caudal asociado a dichos periodos (Figura 4.4).

Finalmente, se realiza la modelación de la inundación, utilizando los softwares HEC-HMS, HEC-RAS y HEC-GEORAS (Figura 4.4).

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que no existe riesgo de inundación por crecidas asociados a la zona B7, dado que únicamente se restringe a los bordes del cauce principal.

Distribución	chi ² calculado	chi ² límite	Distancia chi ² limite
Normal	1.37	5.99	4.62
Log – Normal	0.18	5.99	5.81
Pearson	0.23	3.84	3.61
Log – Pearson	0.89	3.84	2.95
Gumbel	0.47	5.99	5.52

Tabla 4.2: Resultados análisis de frecuencia: test chi². En la tabla se observa como la distribución que presenta una mayor distancia al chi² limite corresponde a la distribución log – normal.

Fuente: Elaboración Propia

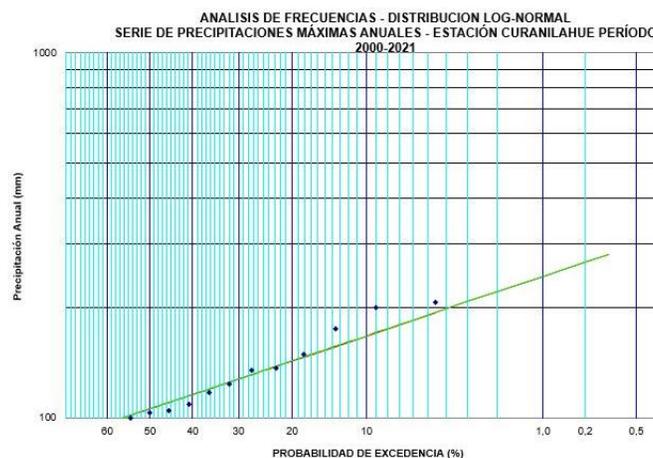


Figura 4.3: Serie de precipitaciones máximas anuales modeladas según una distribución Log – Normal, que corresponde al modelo de distribución que mejor se ajusta a los datos.

Fuente: Elaboración Propia

Periodo de retorno	P de excedencia	Pp anual (mm)
10 años	10 %	167.7
25 años	4 %	198.6
50 años	2 %	221.4
100 años	1 %	244.2
200 años	0.5 %	267.7

Tabla 4.3: Pp anuales máximas en 24 horas determinadas para los distintos períodos de retorno

Fuente: Elaboración Propia

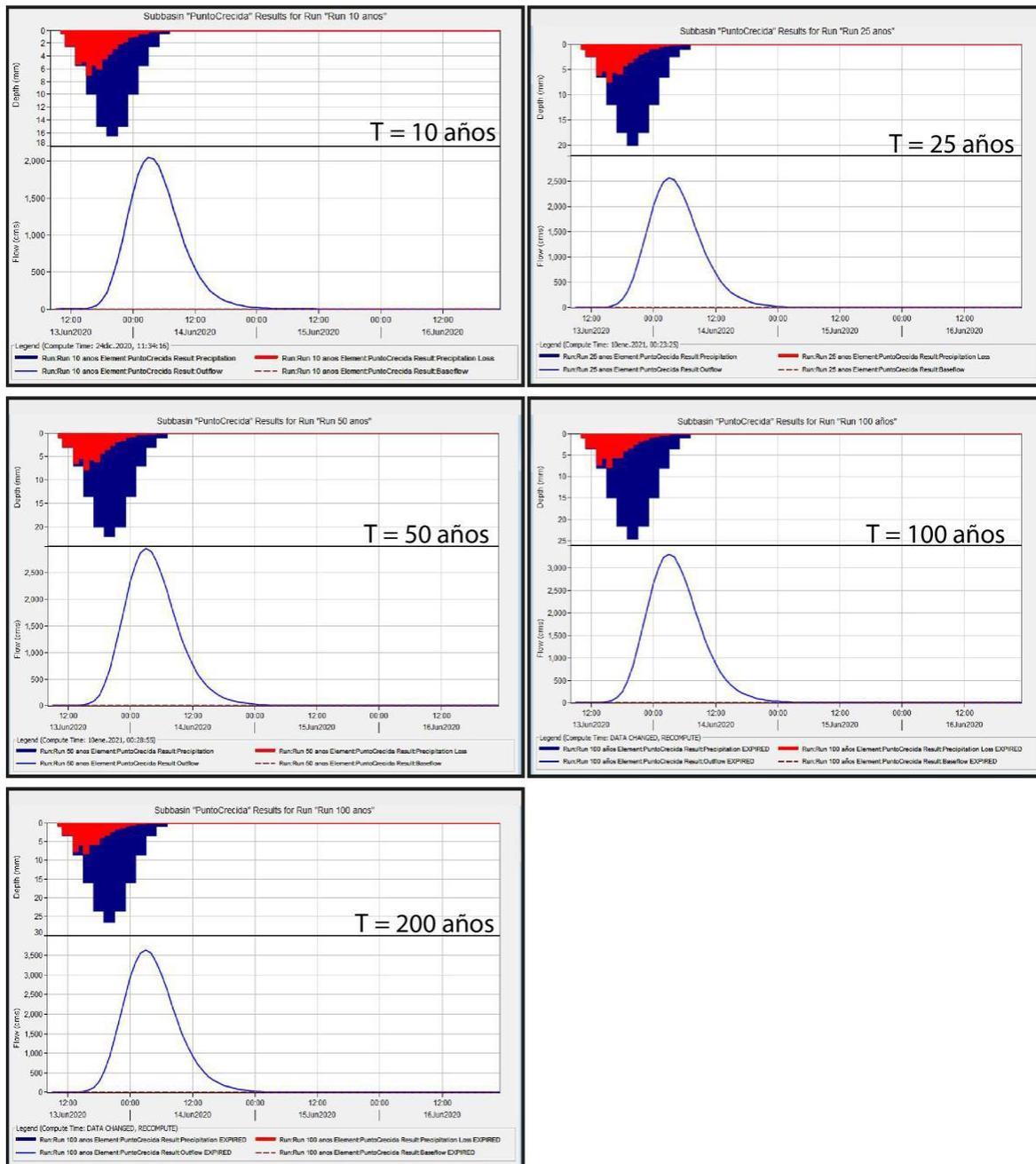


Figura 4.4: Hidrogramas de crecida determinados para los distintos periodos de retorno. En la figura se observa como a medida que aumenta el periodo de retorno, aumentan también los caudales máximos estimados.

Fuente: Elaboración Propia

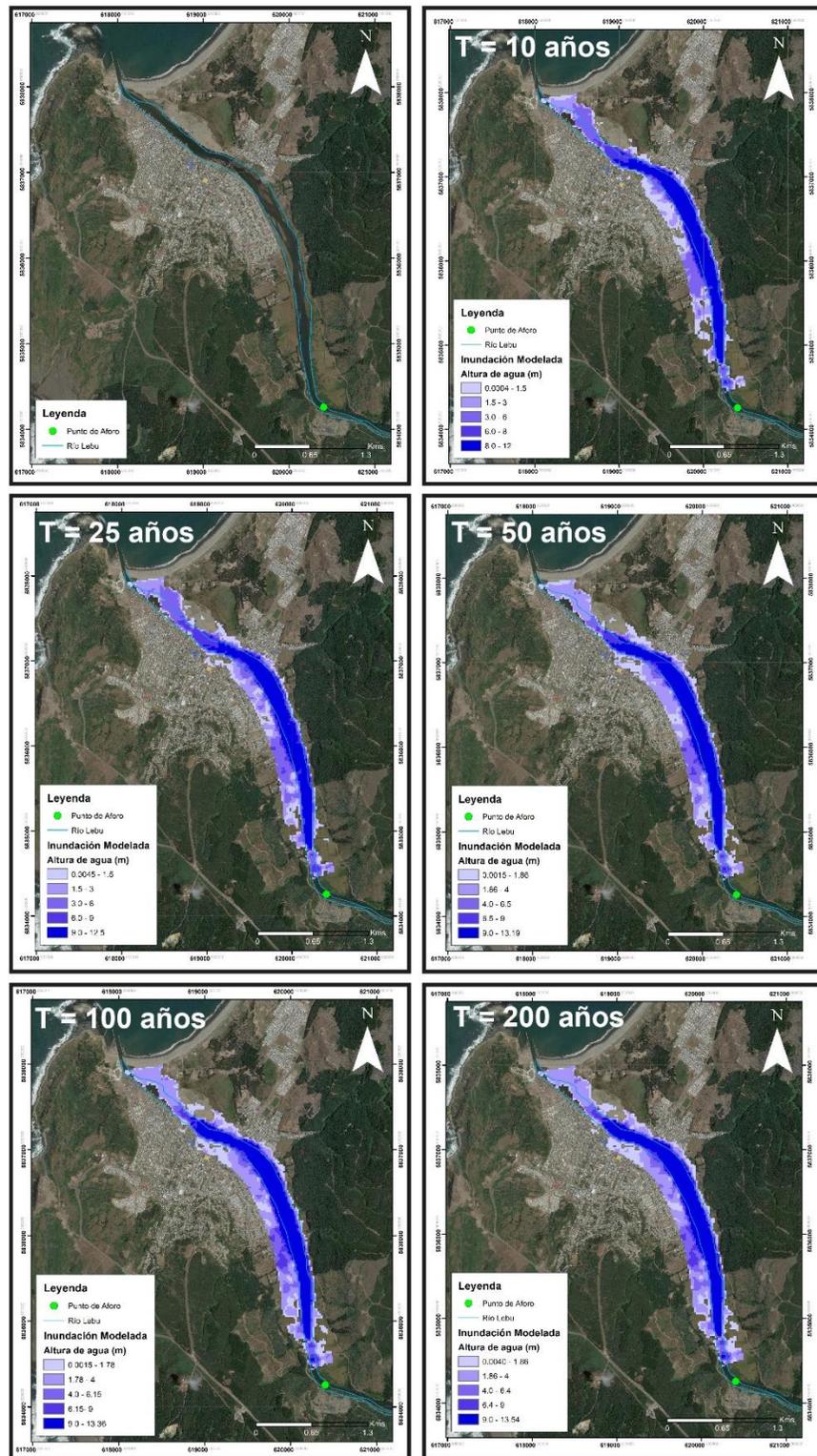


Figura 4.5: Resultados modelación para distintos periodos de retorno, en torno al análisis de inundación por desborde del río Lebu

Fuente: Elaboración propia

4.2. ANÁLISIS DE REMOCIONES EN MASA

La figura 4.6. muestra un mapa de peligro de remociones en masa realizado por SERNAGEOMIN el año 2010, para la zona de Lebu urbano, comprendiendo la zona B7. En la figura, se puede observar como para la zona B7 existen distintos tipos de grado de peligro variando principalmente de un grado de peligro bajo a medio.

Las zonas con un grado de peligro bajo corresponden a zonas de baja a nula susceptibilidad de generación y depositación de remociones en masa. Corresponden a zonas bajas, generalmente con pendientes entre los 0° y los 15° , y escasas evidencias de remociones en masa.

Por otro lado, las zonas de peligro medio corresponden a zonas con susceptibilidad media de generación de remociones en masa, caracterizadas por pendientes moderadas y con algunas evidencias de remoción en masa (por ejemplo, figura 4.7). Para este grado de peligro, se recomienda efectuar las medidas de mitigación y contención correspondientes. Las actividades y el uso del suelo, en estas áreas deben evitar agudizar los factores condicionantes, por lo que se recomienda evitar movimientos y acopios de material sin estabilizar, deforestación, intervención de cauces y quebradas, modificación de taludes, entre otros.

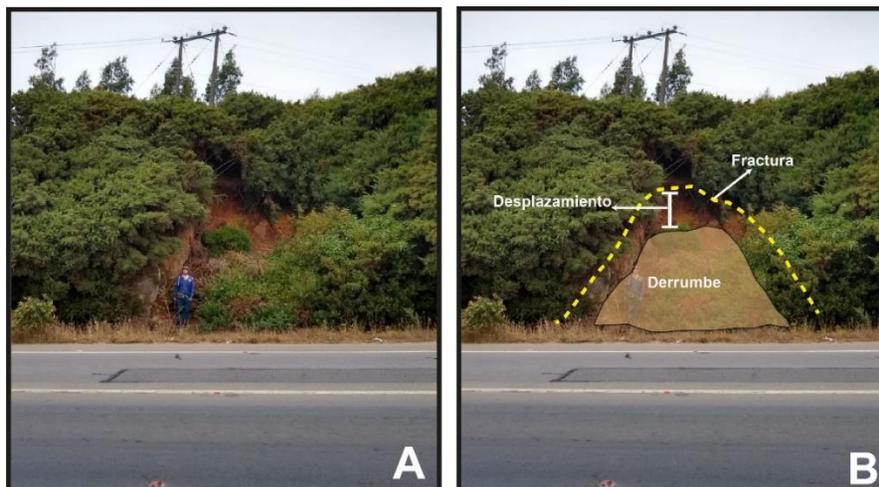


Figura 4.6: Deslizamiento rotacional registrado en la ruta 160 dentro de la zona B7. En la figura B se indican la zona de fractura, derrumbe y también el espesor del desplazamiento.

Fuente: Elaboración Propia

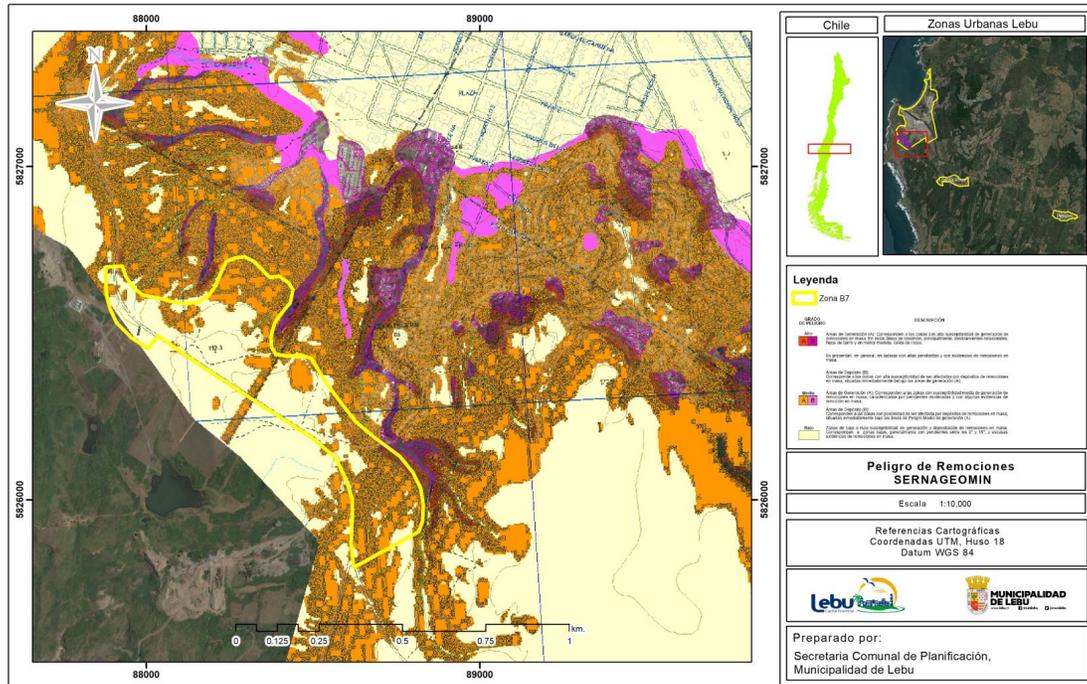


Figura 4.7: Mapa de peligro de remoción en masa para la comuna de Lebu

Fuente: SERNAGEOMIN 2010

Asimismo, considerando las características de la información detallada en el mapa descrito previamente, y lo mencionado por SERNAGEOMIN en dicho informe, donde menciona que para estudios más detallados se deben realizar estudios más en detalle, se realiza un análisis de la susceptibilidad de remoción en masa basado en una metodología multicriterio, como las descritas por (Lara, 2007; Araya, 2014) y que, a su vez, se basan en (Mora y Varson, 1992).

La tabla 4.4. muestra los parámetros utilizados para la evaluación, tanto a nivel de factores intrínsecos como de disparo o gatillantes, con su respectivo peso porcentual, que tiene relación con el grado de importancia de dichos factores, en la generación de eventos de remoción en masa.

Tipo	Parámetro	Peso porcentual
Intrínseco	Geología	30
	Geomorfología	15
	Pendiente	40
	Vegetación	15
Gatillante	Precipitación	50
	Fallas geológicas	50

Tabla 4.4: Factores utilizados para la evaluación del peligro de remociones en masa

Fuente: Basada en (Mora y Varson, 1992)

En cuanto a la geología, considerando las unidades presentes en la comuna, descritas en capítulos anteriores, se realiza una categorización de estas, basado en lo descrito por (Colorado y Cordoba, 2015), donde, las unidades y sus respectivas clasificaciones de peligro y factor, se describen en la tabla 4.5.

Litología	Clasificación	Factor Litológico
Batolito Costero, Serie Oriental	Baja	1
Formación Quiriquina	Moderada	2
Formación Curanilahue, Trihueco, Millongue, Ranquil, Tubul	Media	3
Terrazas Marinas	Alta	4
Depositos Fluvio-Aluviales	Muy Alta	5

Tabla 4.5: Categorización de unidades geológicas, según importancia en la generación de procesos de remoción en masa.

Fuente: Basada en (Colorado y Córdoba, 2015)

Por otro lado, tanto las unidades geomorfológicas (Tabla 4.6), como los distintos rangos de pendientes (Tabla 4.7), se clasifican según lo descrito por (Mujica y Pacheco, 2013), mientras que las coberturas de suelo (Tabla 4.8) se clasifican basado en (Medina, 2017).

Geomorfología	Clasificación	Factor geomorfológico
Terrazas Altas	Baja	1
Terrazas Bajas, Terrazas Medias	Moderada	2
Deposito Fluvial	Media	3
Cordillera	Alta	4
Acantilados y Laderas	Muy Alta	5

Tabla 4.6: Categorización de unidades geomorfológicas, según importancia en la generación de procesos de remoción en masa.

Fuente: Basada en (Mujica y Pacheco, 2013)

En cuanto a los factores gatillantes, se reconocen dos factores: precipitaciones y fallas. Las precipitaciones utilizadas corresponden a las precipitaciones anuales clasificadas según quiebres naturales (Tabla 4.9), mientras que para las fallas geológicas (Tabla 4.10) se realizan zonas buffer de posibles daños, basado en lo descrito por (Astorga, 2020).

La figura 4.8 muestra los factores utilizados, según valores de los factores que inciden en el área. Asimismo, la figura 4.9, muestra la zonificación del peligro de remoción en masa para la ZB7, según la metodología descrita previamente.

Pendiente	Clasificación	Factor Pendiente
0° - 8°	Baja	1
8° - 20°	Moderada	2
20° - 30°	Media	3
30° - 35°	Alta	4
> 35°	Muy Alta	5

Tabla 4.7: Categorización de pendientes, según importancia en la generación de procesos de remoción en masa.

Fuente: Basada en (Mujica y Pacheco, 2013)

Usos de suelo	Clasificación	Factor uso de suelo
Matorrales, Urbano	Baja	2
Bosque nativo, Bosque Forestal	Moderada	3
Agrícola, humedales	Media	4
Suelo descubierto	Alta	5

Tabla 4.8: Categorización de coberturas de suelo, según importancia en la generación de procesos de remoción en masa.

Fuente: Basada en (Medina, 2017)

Precipitaciones anuales	Clasificación	Factor Pp
1447 - 1507	Baja	1
1508 - 1551	Moderada	2
1552 - 1581	Media	3
1582 - 1618	Alta	4
1619 - 1654	Muy Alta	5

Tabla 4.9: Categorización de precipitaciones anuales, según importancia en la generación de procesos de remoción en masa.

Fuente: Elaboración propia mediante quiebres naturales

Distancia a la Falla (m)	Clasificación	Factor Fallas
50 - 100	Baja	1
25 - 50	Media	3
< 25	Alta	5

Tabla 4.10: Categorización de distancia a fallas geológicas, según importancia en la generación de procesos de remoción en masa.

Fuente: Basado en (Astorga, 2020)

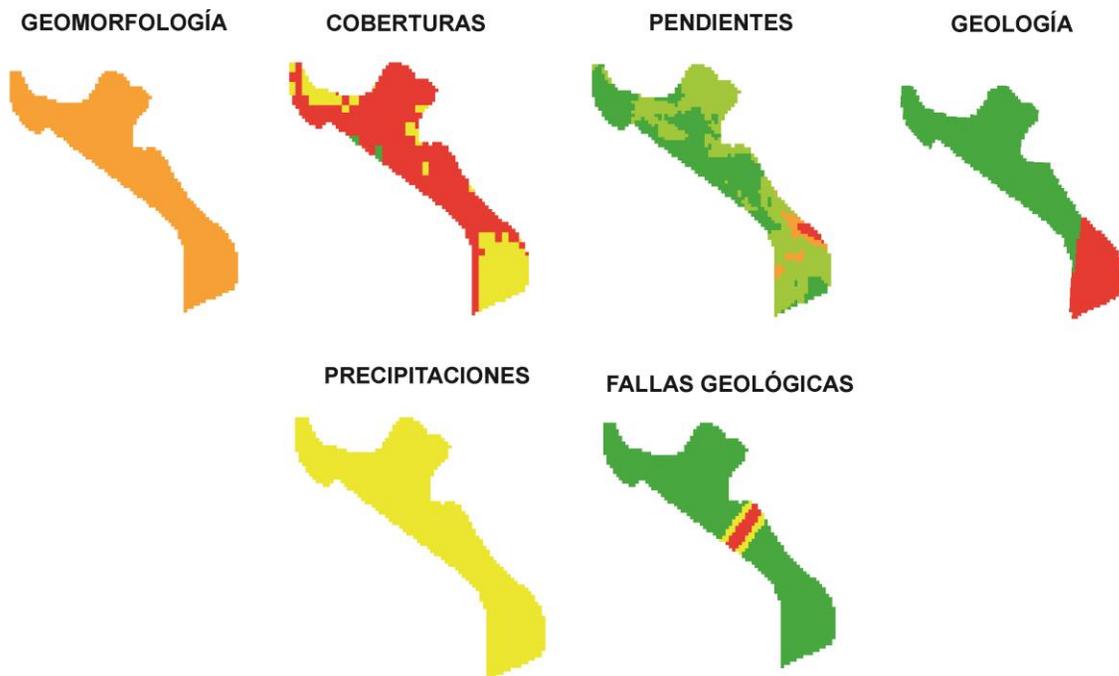


Figura 4.8: Factores utilizados en la elaboración de mapa de peligro de remoción en masa

Fuente: Elaboración propia.

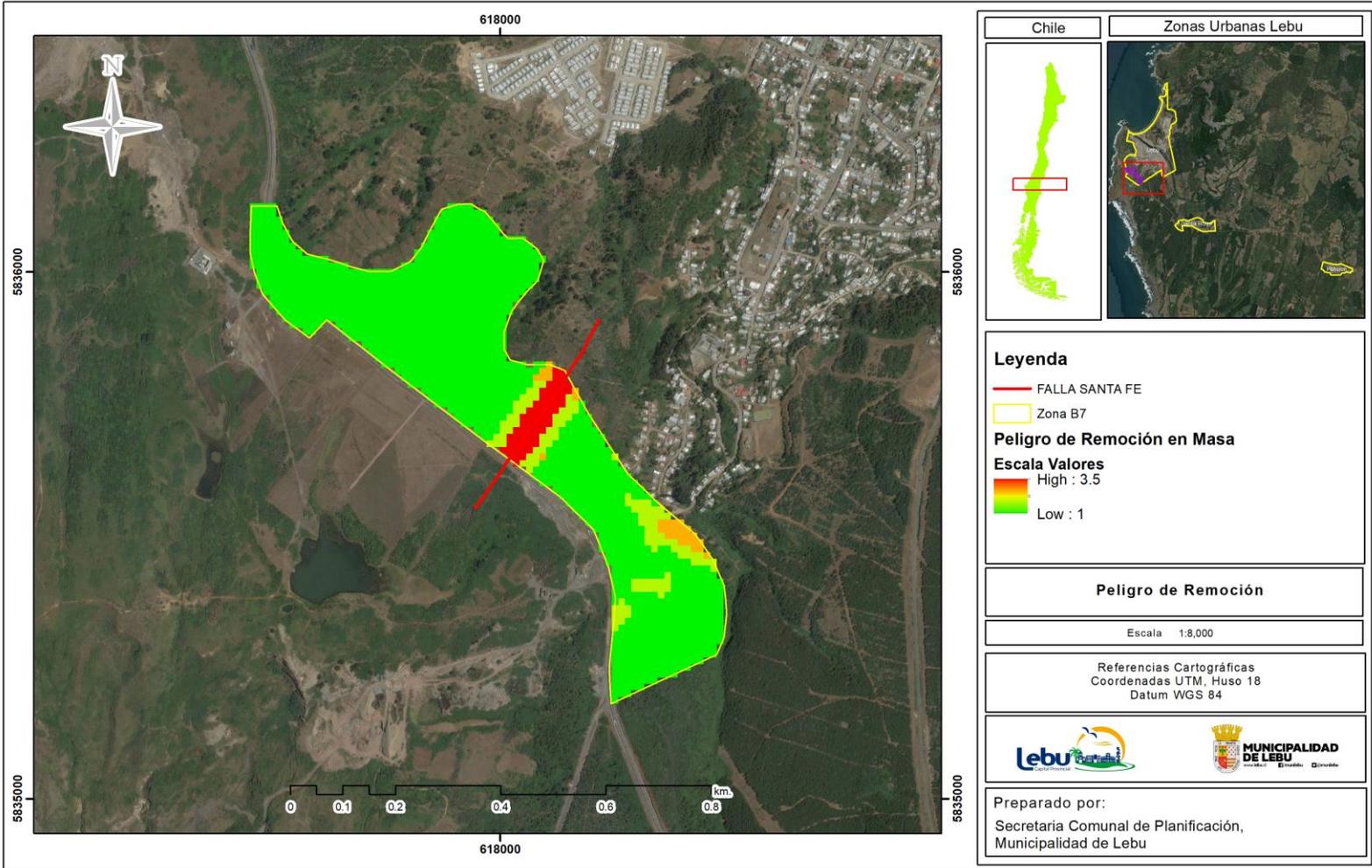


Figura 4.9: Mapa de peligro de remoción en masa zona B7

Fuente: Elaboración propia.

4.3. ANÁLISIS DE LICUEFACCIÓN

La figura 4.10. muestra un mapa de peligro de licuefacción realizado por SERNAGEOMIN el año 2010, para la zona circundante a la ZB7.

En la figura, se puede observar como para la zona B7 no existiría peligro de licuefacción dado que los grados de peligro medio y alto se concentran en elevaciones menores asociadas a la llanura de inundación fluvial.

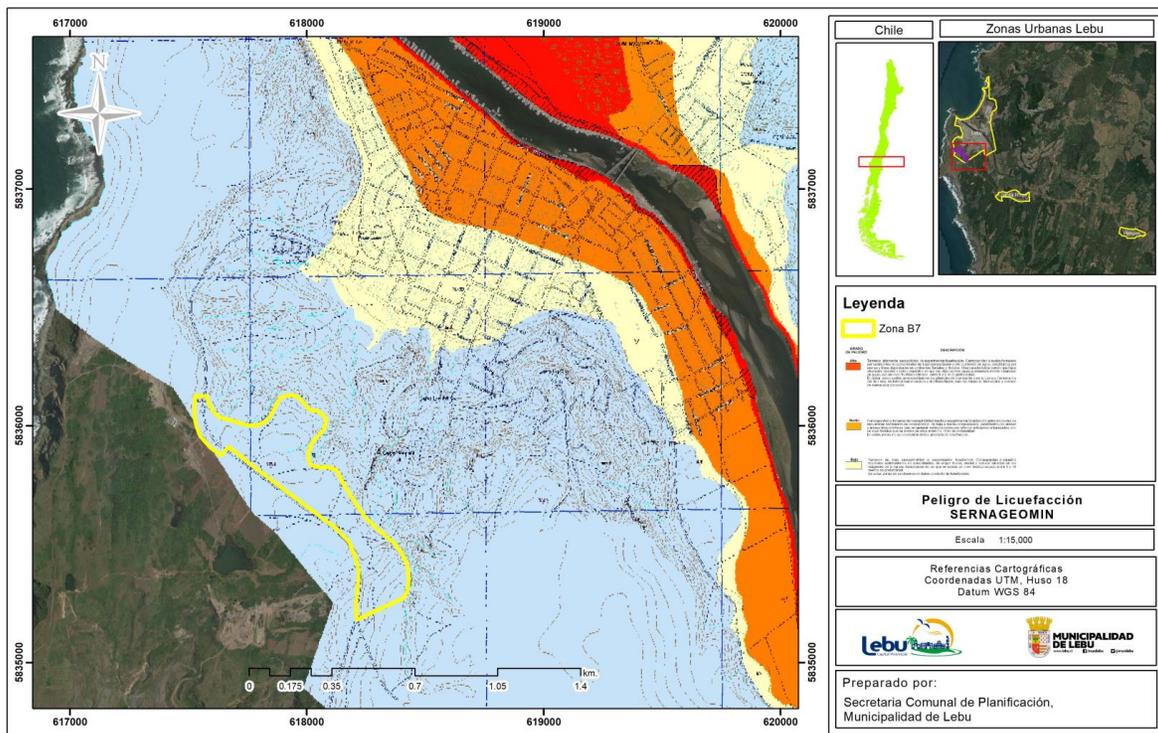


Figura 4.10: Mapa de peligro de licuefacción en zona B7.
Fuente: Elaboración propia, basada en SERNAGEOMIN 2010

4.4. ANÁLISIS DE SISMICIDAD Y FALLAS GEOLÓGICAS

En la figura 4.11 se observan las fallas presentes en la comuna, basadas en los mapas de remoción en masa (SERNAGEOMIN, 2010), Plano estructural región de Lebu (Carvile, 1949) y los resultados del “estudio geológico - geofísico del proyecto normalización Hospital Santa Isabel de Lebu Servicio de Salud Arauco” realizado por profesionales docentes de la Universidad de Concepción.

Considerando esto y los antecedentes descritos en el capítulo 3, se observa y concluye la presencia de una falla geológica denominada Falla de Santa Fe, la que, según los resultados expuestos en los informes previamente mencionados, se ubica superficialmente sobre la zona B7

Utilizando el catálogo de sismicidad instrumental de la red IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology), filtrando para sismos corticales (<60 km de profundidad) que pudieran estar asociados a fallas corticales como lo es la falla de Santa Fe, la figura 4.12 muestra la distribución de estos terremotos, donde se observa que no existe sismicidad instrumental asociada a la falla, que pudiera dar indicios de la actividad de esta.

Ahora bien, considerando lo descrito por (Astorga, 2020; MINVU, 2014), y dado que, a la fecha, no existen estudios neotectónicos o paleosismológicos que permitan estimar con detalle el nivel de actividad de la falla, se define una zonificación de peligro en torno a la falla geológica de Santa Fe.

En relación a esto, se define una zona de seguridad de 100 metros como máximo, con zonificaciones inferiores de 50 y 25 metros, estableciendo zonas de bajo, medio y alto peligro respectivamente (Figura 4.13)

Para zonas de alto peligro, < 25 m de cercanía a la falla, se establece que ninguna estructura de ocupación humana será permitida sobre esta zona. Por otro lado, las zonas de peligro medio deberán incluir, en caso de querer realizar construcciones, estudios neotectónicos basados en el modelo digital del terreno, fotointerpretación, así como también la incorporación de datos de registro sísmico, trincheras abiertas en terreno, paleosismología, apoyo en dataciones radiométricas cuando sea posible, y métodos geofísicos. Finalmente,

aquellas zonas de bajo peligro de incidencia, requerirán estudios neotectónicos de menor detalle, como fotointerpretación, utilización de modelos de elevación digital y evidencias de terreno.

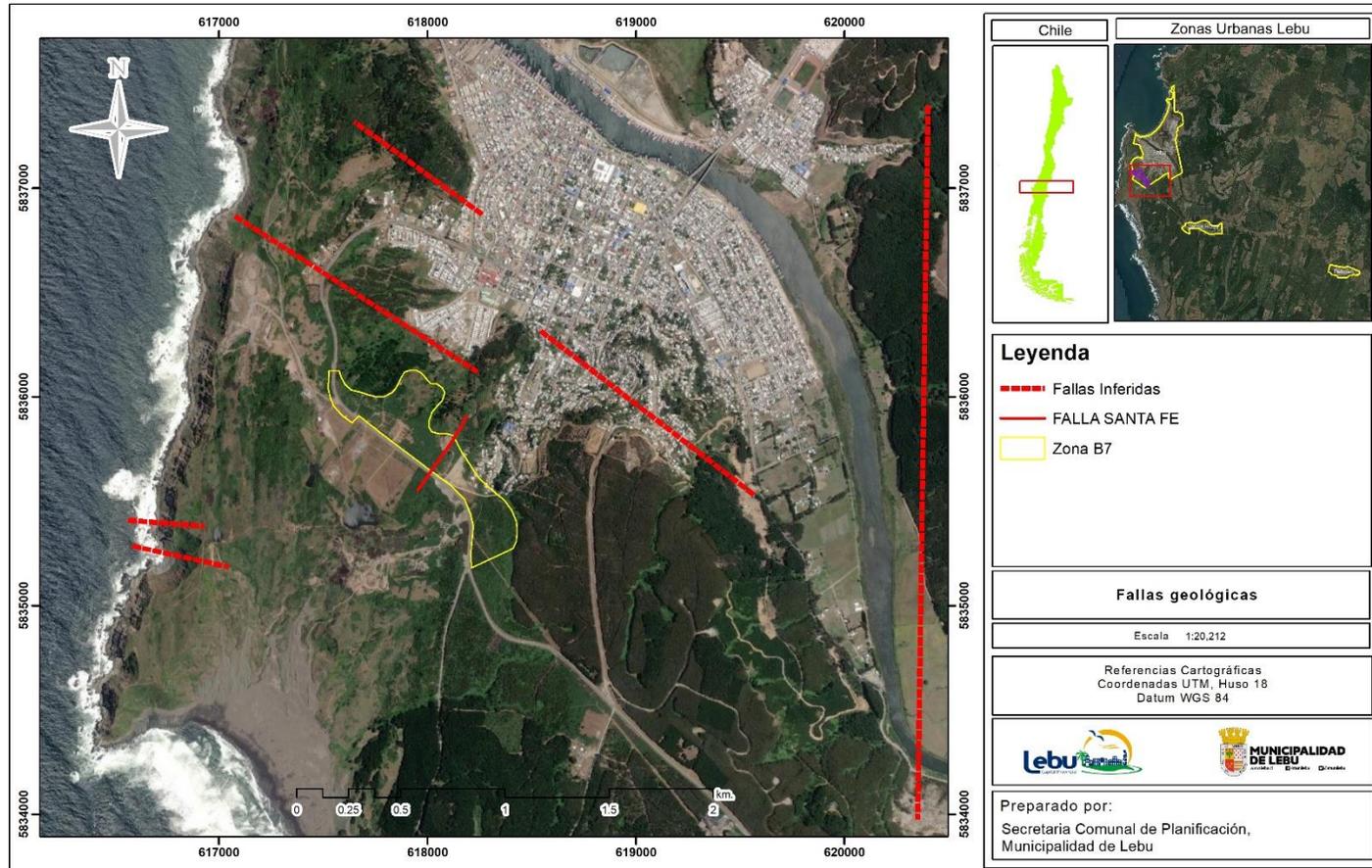


Figura 4.11: Fallas Presentes en la ciudad de Lebu

Fuente: Elaboración Propia

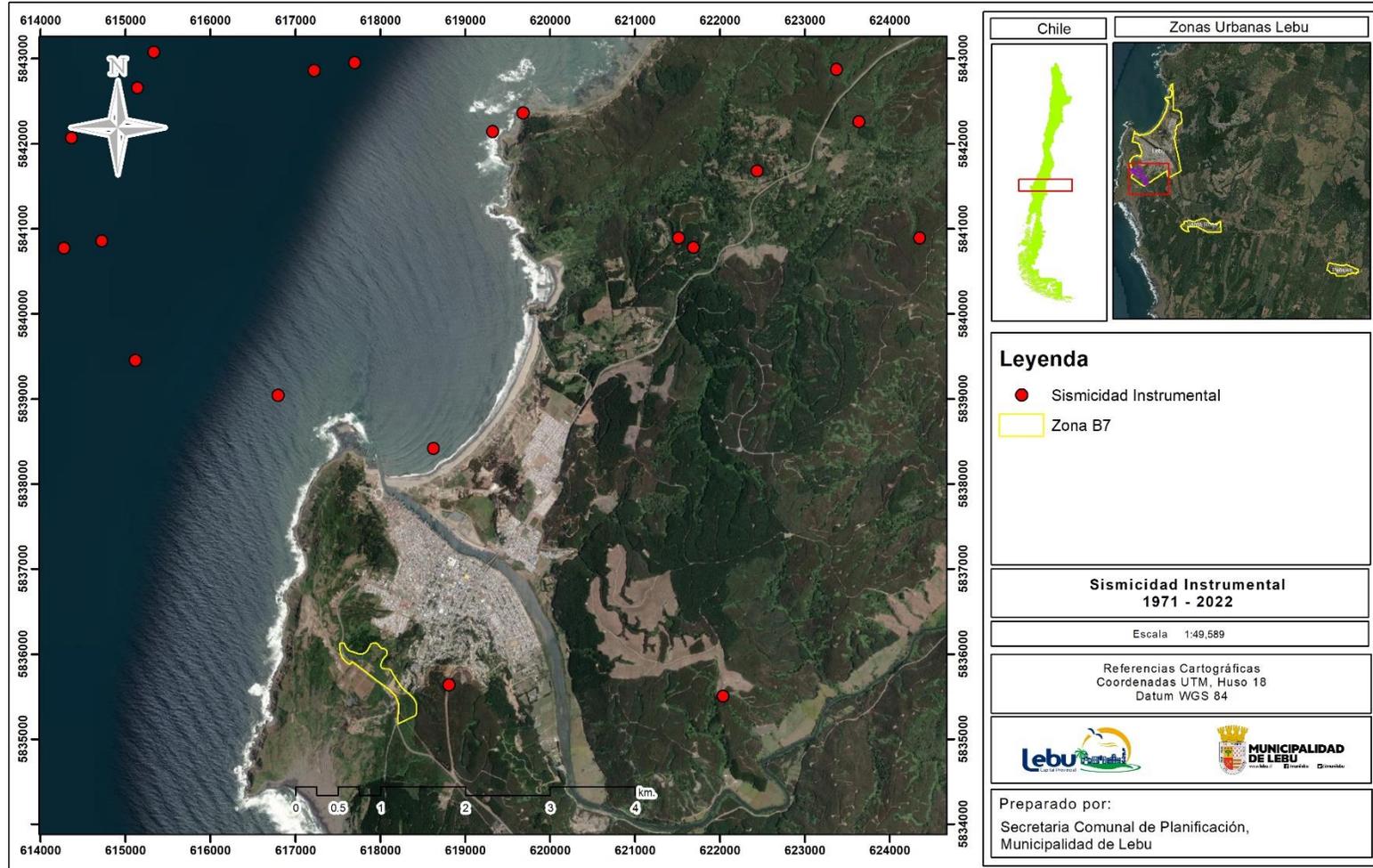


Figura 4.12: Sismicidad instrumental cortical registrada en la ciudad de Lebu,
Período 1971 - 2021

Fuente: Elaboración Propia basada en catálogo IRIS

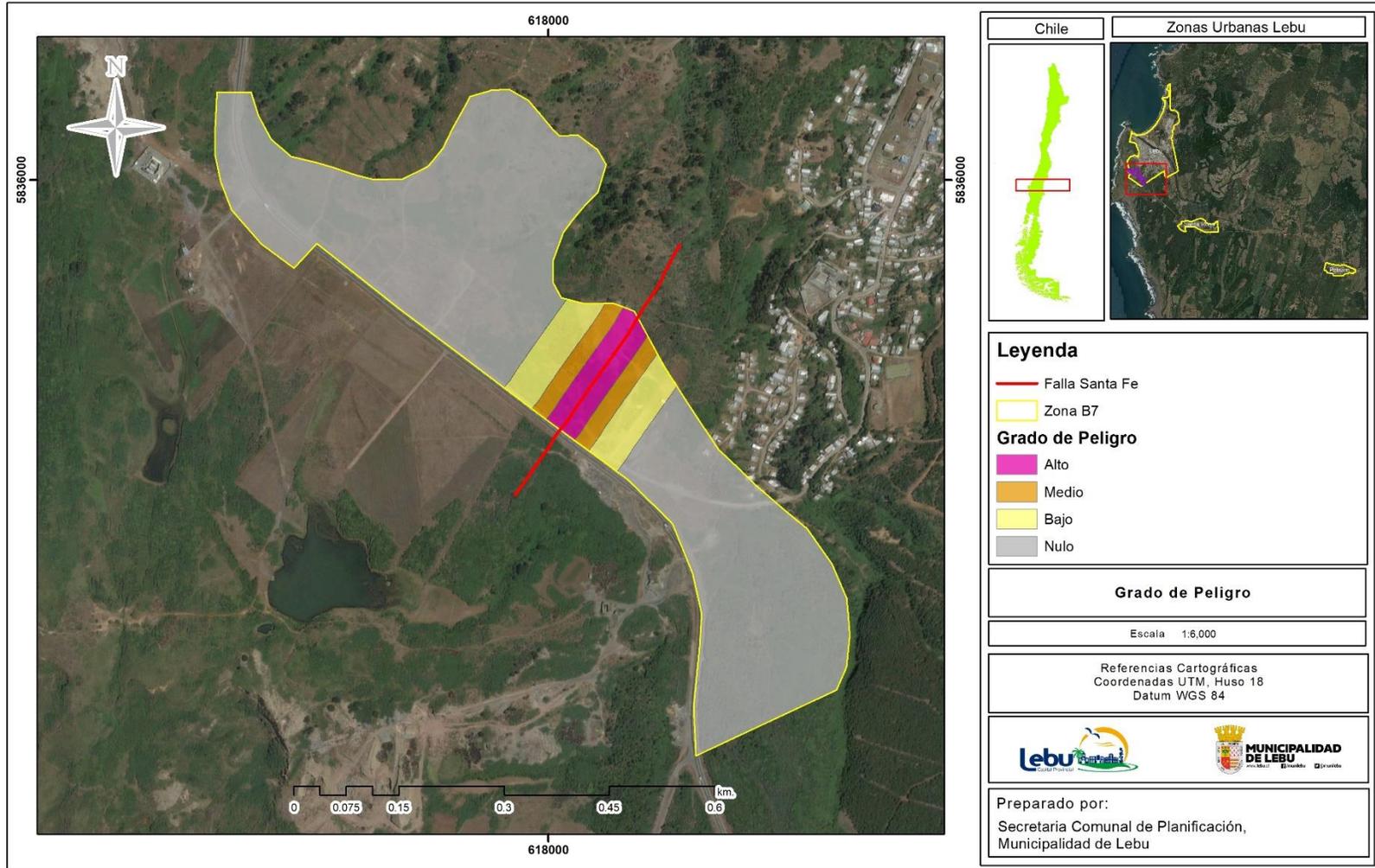


Figura 4.13: Mapa de peligro asociado a la falla de Santa Fe
Fuente: Elaboración Propia

4.5. INCENDIOS FORESTALES

Dado el impacto que tienen los incendios forestales en las regiones del centro y sur del país, así como también lo señalado en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, donde se expresa en su artículo 2.1.17 la posible definición de zonas de riesgo a aquellas zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana; se realiza un estudio de riesgos de incendios forestales basado en el registro histórico y factores gatillantes así como también considerando factores que influyen en la vulnerabilidad y el impacto que pudieran tener los incendios. Todo esto, pensando en una correcta determinación del grado de peligro de la zona.

En primer lugar, y basándose en la metodología de (Gheshlaghi, 2019) se determina el riesgo ante incendios forestales, considerando los factores mencionados en la tabla 4.11. y figura 4.14, los que se dividen en factores de 1 a 5, que tendrán relación con el nivel de peligro asociado al factor. La tabla 4.12 muestra los factores utilizados junto a los valores de zonificación de dichos factores, según grado de importancia.

Factor	Fuente de información
Pendiente	Extraída de modelo digital de elevación ALOS-PALSAR
Aspecto o exposición	Extraída de modelo digital de elevación ALOS-PALSAR
Altitud	Extraída de modelo digital de elevación ALOS-PALSAR
Cobertura de suelo	Land Cover Chile. Zhao y otros., 2016
Distancia a centros urbanos	Plan Regulador Comunal.
Distancia a caminos	Ministerio de obras públicas
Velocidad del viento	https://globalwindatlas.info/about/credits
NDVI	Determinado utilizando imágenes LANDSAT 8
Lluvias anuales (mm)	www.worldclim.org/current
Temperatura promedio (°C)	https://www.cr2.cl/datos-de-temperatura/

Tabla 4.11: Parámetros utilizados y fuentes de información para la determinación del grado de riesgo ante incendios forestales

Fuente: Elaboración propia basada en Gheshlaghi, 2019

Factor	Clase	Riesgo - Peso
Pendientes	0 – 5	1
	5 – 10	2
	10 – 15	3
	15 – 25	4
	> 25	5
Aspecto	N	3
	NE	3
	E	2
	SE	4
	S	5
	SW	3
	W	4
Altitud	< 100 m	4
	100 – 125	3
	125 – 200	2
	> 200	1
Coberturas	Forestal y Bosque Nativo	4
	Agrícola	3
	Praderas y matorrales	5
	Urbano	2
	Humedales y cuerpos de agua	1
Distancia Asentamiento	0 – 2000	4
	2000 – 3000	3
	3000 – 4000	2
	> 4000	1
Distancia a Caminos	0 – 500	4
	500 – 1000	3
	1000 – 2000	2
	> 2000	1
Velocidad del viento	4 – 5	1
	5 – 6	2
	6 – 7	3
	7 – 8	4
	> 8	5
NDVI	-0.1 – 0.07	1
	0.07 – 0.15	2
	0.15 – 0.21	3
	0.21 – 0.27	4
	> 0.27	5
Precipitaciones anuales	< 1400	3
	1400 – 1550	2
	> 1550	1
Temperaturas	16 – 16.5	1
	16.5 – 17	2
	17 – 17.14	3

Tabla 4.12: Factores y ponderaciones para evaluación del riesgo de incendios

Fuente: Elaboración propia basada en Gheshlaghi, 2019.

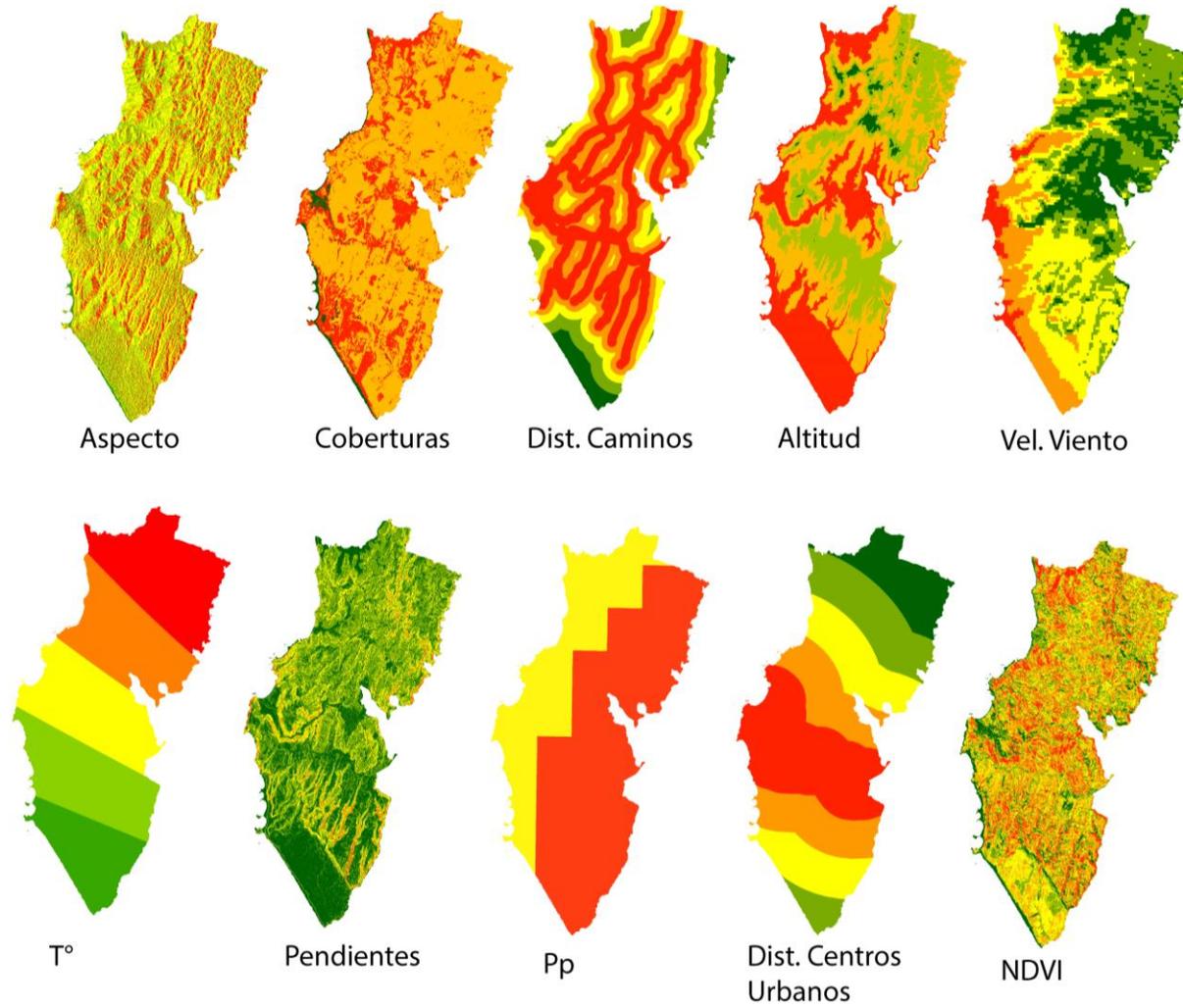


Figura 4.14: Parámetros utilizados para la determinación del riesgo de incendios

Una vez determinados estos parámetros y realizada la reclasificación se ponderan dichos factores generando un mapa de riesgo de incendio para la comuna de Lebu (Figura 4.15). La tabla 4.13. muestra los porcentajes de ponderación de cada uno de los factores, basado en (Gheshlaghi, 2019).

Factor	Peso porcentual normalizado
Precipitación Anual	0.17713
Temperatura Anual	0.15683
Velocidad del Viento	0.07384
NDVI	0.16445
Coberturas	0.10809
Pendientes	0.06820
Aspecto	0.06262
Altitud	0.06328
Distancia a asentamientos	0.07056
Distancia a Caminos	0.05499

Tabla 4.13: Factores y peso porcentual normalizado para evaluación del riesgo de incendios

Fuente: Elaboración propia basada en Gheshlaghi, 2019

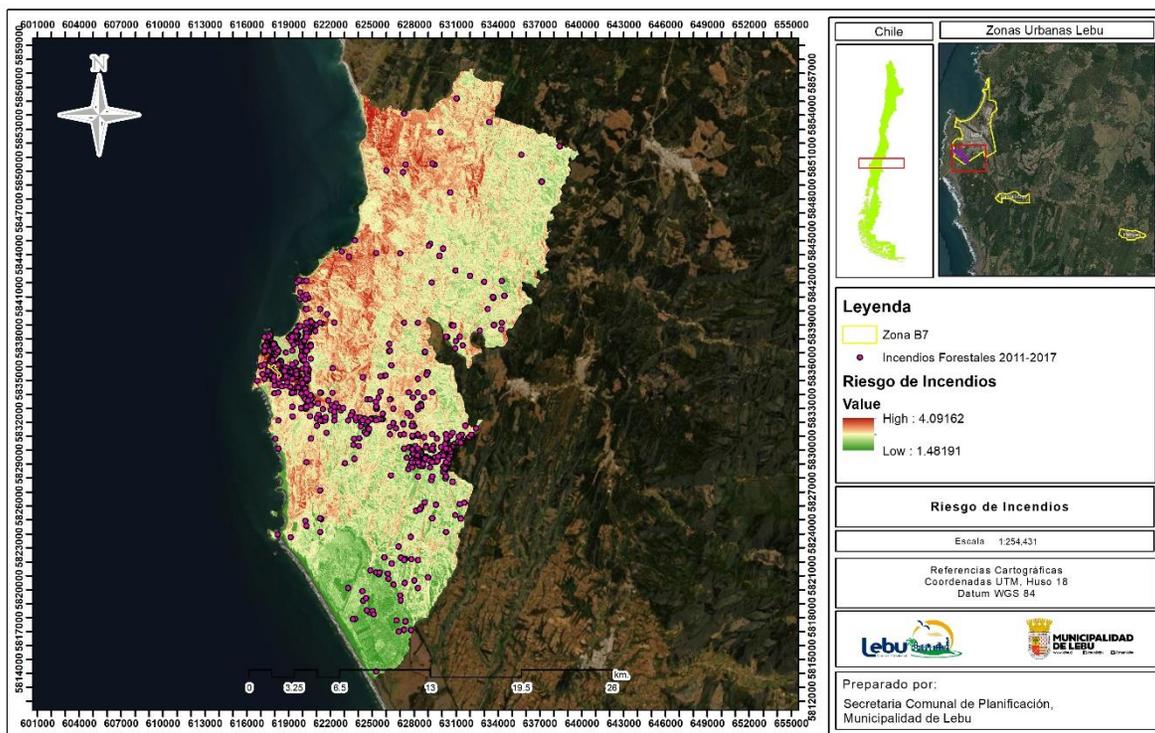


Figura 4.15: Mapa de peligro de incendios para la comuna de Lebu

Fuente: Elaboración Propia

El mapa obtenido, se contrarresta con la información histórica de incendios forestales disponible desde el año 2011 hasta el año 2017, donde se observa que el mapa de riesgo coincide con la mayoría de eventos históricos registrados en dicho periodo (figura 4.15).

Por otro lado, además de la ocurrencia de un incendio forestal, un factor importante a la hora de evaluar el peligro o amenaza de incendios, corresponde a la magnitud probable de tal incendio. Es por esto que, considerando la magnitud de los incendios históricos registrados en la comuna, se realiza una interpolación IDW en base a la superficie afectada para los incendios forestales registrados históricamente (Figura 4.16).

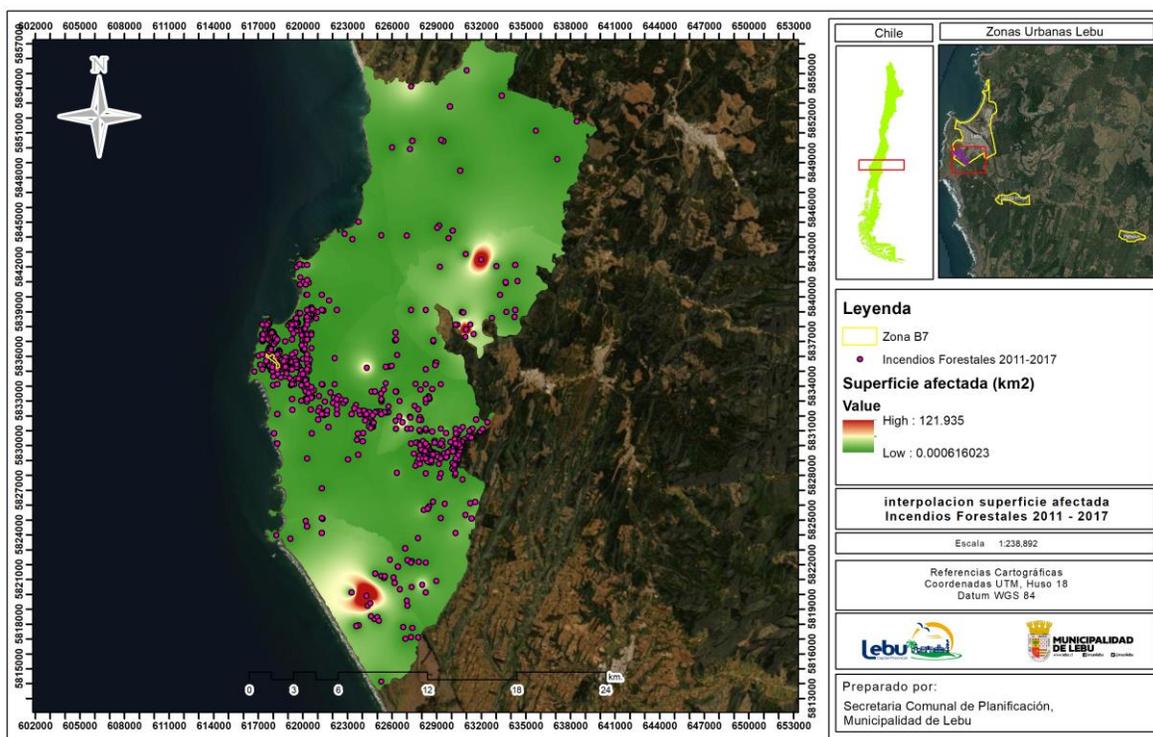


Figura 4.16: Interpolación de posibles superficies afectadas según registro histórico de incendios periodo 2011 - 2017

Fuente: Elaboración Propia

Con esto, se determina la peligrosidad asociada a los incendios forestales en la zona b7 (Figura 4.17), donde se observa que no se han presentado incendios forestales de gran envergadura (superficies de afectación muy bajas). Por otro lado, dado que en la zona B7 se pretende construir el futuro hospital de la comuna, esto generaría un cambio de cobertura de suelo que disminuiría el peligro de generar incendios en la zona, dado que las coberturas

urbanas corresponden a las coberturas con el menor grado de peligro, tal y como puede observarse en la tabla 4.11.

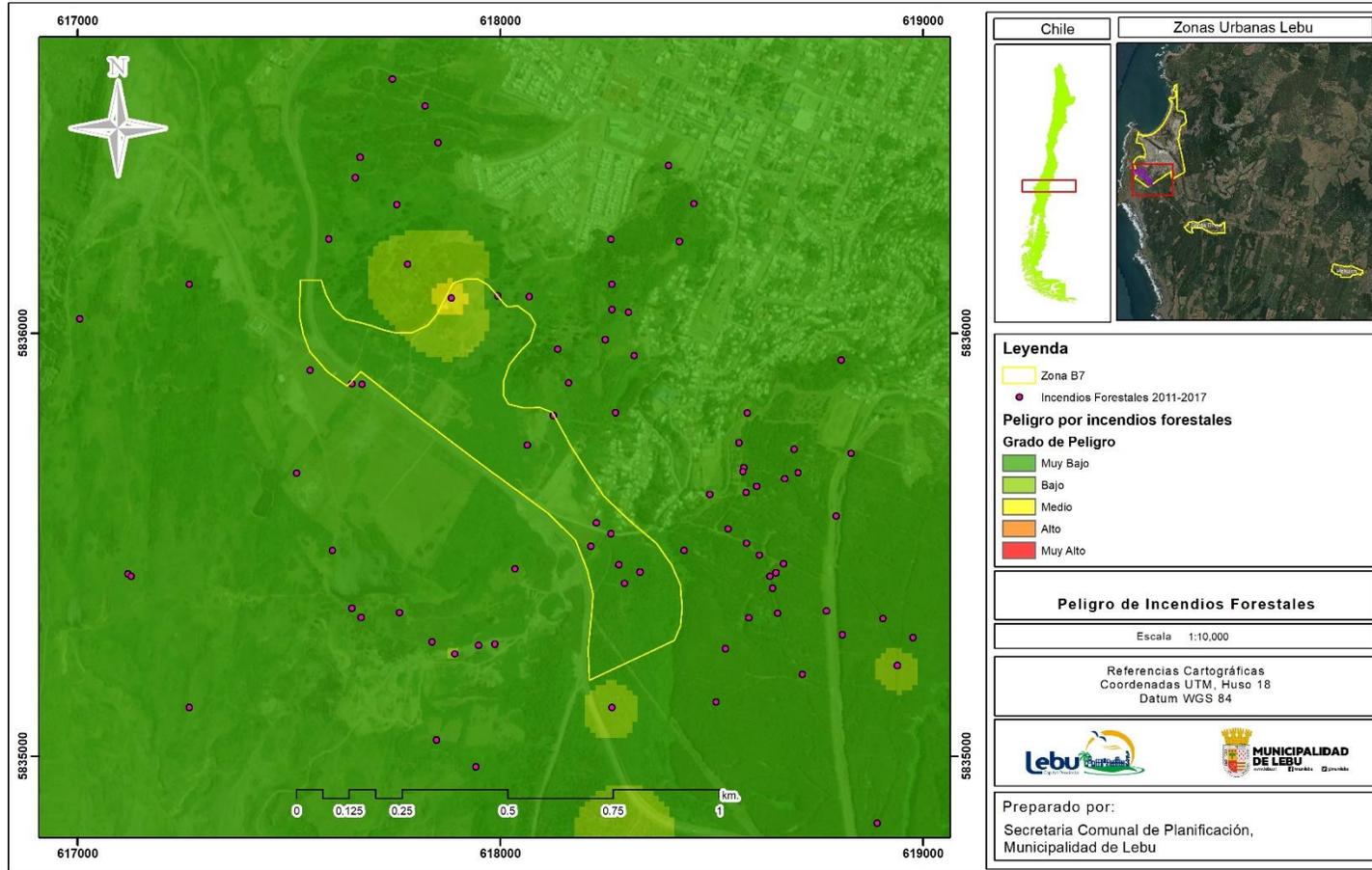


Figura 4.17: Peligro de Incendios forestales para la Zona B7

Fuente: Elaboración Propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Utilizando la información recopilada a lo largo de este informe, en conjunto con los resultados obtenidos de la determinación de los peligros socio naturales analizados y determinados, es posible concluir lo siguiente:

- La zona B7 corresponde a un área emplazada en la geoforma de terrazas marinas, y se sitúa en la denominada terraza Baja, en contacto en su sector oriental con la terraza Cañete. Este contacto se evidencia en terreno, por una disminución del nivel topográfico en aproximadamente 40 metros.
- En relación al peligro de inundación, se determina que la zona B7 se define como una zona de seguridad para el peligro de inundación por tsunami y de nula peligrosidad para el peligro de inundación por desborde del cauce del río Lebu.
- En cuanto al peligro de remoción en masa, se observa que la zona varía de un grado de peligro bajo a medio, observándose en algunos sectores de la zona, específicamente en cortes de camino, algunos eventos menores de deslizamientos. Por esto, se recomienda que en las zonas definidas como de riesgo, las actividades y el uso del suelo, deben evitar agudizar los factores condicionantes, por lo que se recomienda evitar movimientos y acopios de material sin estabilizar, deforestación, intervención de cauces y quebradas, modificación de taludes, entre otros.
- En relación al peligro de licuefacción, se determina que la zona B7 presenta nula capacidad de licuefacción, según el mapa de licuefacción de (SERNAGEOMIN, 2010). No obstante, se recomienda para futuras edificaciones en la zona, realizar los estudios pertinentes que permitan determinar con mayor exactitud lo descrito en este informe.
- En cuanto al análisis de sismicidad, se determina que no existe sismicidad instrumental registrada dentro de la zona B7 ni en sus cercanías. Por otro lado, se determina la presencia de la falla geológica de Santa Fe, la que según estudio detallados en la zona realizados por un equipo de la Universidad de Concepción correspondería a una falla de tipo normal, que generó desplazamientos del orden de los 100 m. Considerando esto, y basado en zonificaciones descritas por (Astorga, 2020; MINVU, 2014), se realiza una zonificación de peligrosidad en torno a la falla

de Santa Fe, la que sugiere, según diferentes grados de peligrosidad, la elaboración de los estudios neotectónicos pertinentes, que permitan corroborar la información descrita en el capítulo 3.

- Con lo recopilado y mencionado en este informe, se construye el mapa simplificado de peligros geológicos de la zona B7 que se adjunta en el anexo. Este mapa, señala los niveles de peligro de remoción en masa, obtenidos utilizando las metodologías de (Lara, 2007; Araya, 2014), así como también, la zonificación de peligro de la falla de Santa Fe, basada según la traza definida por el informe realizado por la Universidad de Concepción, y las propuestas de zonificación de (Astorga, 2020; MINVU, 2014).

6. REFERENCIAS

- Astorga-Gätgens, A. (2013). La definición de usos del suelo en las cercanías de fallas geológicas: explicación del Protocolo Técnico del Decreto Ejecutivo 32967-MINAE, Anexo 3. *Revista Geológica de América Central*, (49), 149-153.
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.
- Cruden, D., Varnes, D., 1996. Landslide types and processes. In Turner A.K. & Schuster R.L., 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247.
- Fock, A., Rauld, R., Urresty, C., Badilla, P. and González-Muzzio, C., *Planificación territorial y peligros geológicos: marco de referencia*.
- GARCÍA, F. 1968. Estratigrafía del Terciario de Chile Central. In Cecioni, G. *El Terciario de Chile, zona central*. Sociedad Geológica de Chile. Editorial Andrés Bello: 25-58 p. Santiago.
- Gheshlaghi, H. A. (2019). Using GIS to develop a model for forest fire risk mapping. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(7), 1173-1185.
- Gómez, D. (2007). *Ordenación territorial*. Madrid: Mundi-Prensa, 766 páginas.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid. 744 pp.
- Hauser, A., 1993. *Remociones en masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.
- Henríquez, A.A., 2006. *Variaciones locales del nivel del mar en las cuencas neógenas de Caldera, III Región y Arauco, VIII Región: Deducción de tasas de alzamiento y subsidencia tectónica* (Doctoral dissertation, Masters Thesis (Unpublished), Universidad de Chile: 170 p. Santiago).
- JTC-1, 2008. *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning, for land use planning* *Engineering Geology* 103, 85–98.
- Kaizuka, S., Matsuda, T., Nogami, M. and Yonekura, N., 1973. Quaternary tectonic and recent seismic crustal movements in the Arauco peninsula and its environs, central Chile.

- Kuhn, P.P., Echtler, H., Littke, R. and Alfaro, G., 2010. Thermal basin modelling of the Arauco forearc basin, south central Chile—Heat flow and active margin tectonics. *Tectonophysics*, 495(1-2), pp.111-128.
- Lara, M. (2009). Evaluación del peligro de remociones en masa en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente. *Santiago*, 22, S3_008.
- Madariaga, R., Olsen, K. y Archuleta, R., 1998. Modeling dynamic rupture in a 3D earthquake fault model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(5), pp.1182-1197.
- Maturana Miranda, F., 2017. ¿Ausencia de planificación urbana en Chile? Algunas reflexiones. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Melnick, D., Bookhagen, B., Strecker, M.R. and Echtler, H.P., 2009. Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1).
- MENDOZA, J. 2001. Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos de arenas silíceas del área costera de la VIII Región, entre Coliumo y Los Alamos. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 181 pp. Concepción.
- Moreno, M., Rosenau, M. y Oncken, O., 2010. 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature*, 467(7312), p.198.
- MUÑOZ-CRISTI, J. 1946. Estado actual del conocimiento sobre la geología de la Provincia de Arauco. *Anales Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*, Universidad de Chile. N° 3: 30-63. Santiago
- MUÑOZ CRISTI, J. 1956. *Handbook of South American Geology*. Chile. Geol. Soc. Amer. Mem. Vol. 65: 187-214 p.
- Páez, D. and Derch, P., 2010. Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Lebu. Región del BíoBío.
- Pardo-Casas, F. y Molnar, P., 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 6(3), pp.233-248.
- PINEDA, V. 1983. Evolución Paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior-Terciario. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad

de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología (Inédito): 268 pp. Santiago

- Quezada, J., Jaque, E., Fernández, A. and 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), pp.35-55.
- Ramírez, P. and Derch, P., 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en la localidad de Caleta Las Peñas, y evaluación de los terrenos para viviendas provisorias en la ciudad de Arauco [INF-BíoBío-07]. SERNAGEOMIN, Temuco, 5h.
- Ramírez, P. and Derch, P., 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de Febrero de 2010: Observaciones de daños en la localidad de Caleta Las Peñas, y evaluación de los terrenos para viviendas provisorias en la ciudad de Arauco [INF-BíoBío-07]. SERNAGEOMIN, Temuco, 5h.
- SERNAGEOMIN, S., 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 CD-Room, versión 1.0, base geológica escala, 1:1000000
- Seely, D.R., Vail, P.R., Walton, G.G., Burk, C.A. and Drake, C.L., 1974. The geology of continental margins.
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo SUBDERE (2011). Plan Regional de Ordenamiento Territorial. Gobierno de Chile, División de Políticas y Estudios, 62 páginas
- Varnes, D.J., 1984. Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazards, No.3, 61 p
- Venegas, C., Velasco, L., Cortés, L., Reyes, M., Guevara, F. L., & Jauregui, F. (2014). Análisis áreas Riesgo Pre cordillera Etapa 1 Vitacura Y La Florida.
- Watanabe, Tadeo, and Juan Karzulovic Kokot. "Los movimientos sísmicos del mes de mayo de 1960 en Chile." *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*. Vol. 17. No. 17. 1960.
- Wenzel, O., 1972. Geología y reservas del yacimiento carbonífero de Lebu. Empresa Nacional del Carbón SA, Inédito.

ANEXO: MAPA DE PELIGROS GEOLÓGICOS ASOCIADOS A LA ZONA B7

