



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USOS DE SUELO Y PROCESOS DE EXPANSIÓN URBANA EN EL CONTEXTO DE LA ACTIVIDAD MINERA, ENTRE LOS AÑOS 1986 Y 2016: PROVINCIA DE LOS ANDES.

Memoria para optar al título de Geógrafa

PÍA PIZARRO QUIÑONES

Profesor Guía: Pablo Sarricolea

SANTIAGO - CHILE

2018

Quiero a través de estas palabras enviar mi más sincera gratitud y afecto a todas aquellas personas que me permitieron finalizar esta etapa.

Al Profesor Pablo Sarricolea, por su apoyo y paciencia durante el desarrollo de la presente memoria.

A mis amigos Lely Soto, Miguel Pavez y Mario García por su colaboración y aportes a mi investigación.

A mis compañeras y amigas, Victoria Arenas y Rocío Abraham, por el ánimo y cariño brindado desde que la Geografía nos unió.

A la familia Soto Quiñones por todo el cariño y amor entregado en esta etapa.

A mi novio Jaime Verdugo, por su amor, comprensión, motivación y paciencia.

También, quiero agradecer a María Isabel Escalona, por enseñarme a no rendirme y a mantenerme positiva frente a todas las adversidades.

Y por, sobre todo, dedico la presente memoria, a quienes fueron mi mayor motor en estos años, mis tíos Carmen Quiñones Leiva, Manuel Nova Oviedo y a mi Padre Juan Pizarro Morgado.

RESUMEN

La minería es una de las principales actividades que sustenta el sistema económico chileno. El cobre ha convertido a Chile en una potencia minera a nivel mundial. A pesar del progreso económico que ha permitido la actividad, gran parte de las ciudades mineras se enfrentan a problemas ambientales y sociales, por lo que constantemente están en la disyuntiva de si serán sustentables a través del tiempo.

Paralelamente, las ciudades chilenas y centros administrativos menores se encuentran en un proceso constante de crecimiento. Crecimiento, que ha ocurrido a través de procesos de cambios de usos y coberturas de suelos, transformando principalmente espacios naturales o seminaturales en urbanos.

Por esta razón, este estudio busca entender los cambios de usos de suelo y los procesos de expansión urbana en la Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso, entre los años 1986 y 2016, con el fin de estimar en qué medida los cambios son influenciados por la actividad minera en la Provincia.

Para el desarrollo de este estudio se obtuvieron, en primer lugar, las coberturas de uso de suelo de cuatro imágenes LANDSAT de los años 1986, 1996, 2006 y 2016 y a través de una clasificación supervisada se obtuvieron las superficies de los distintos usos de suelo para los distintos períodos de años. Posteriormente se verificaron los resultados por medio de una matriz de confusión y del índice estadístico de KAPPA.

Se concluye, en primer lugar, determinando los principales cambios en los usos de suelo desde el año 1986 al año 2016, estableciendo las ganancias y pérdidas de los usos de suelo urbano, y estimando la relación entre el crecimiento urbano y la actividad minera en la Provincia de Los Andes.

Palabras Claves: Expansión urbana, Teledetección, clasificación supervisada, y minería.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	8
1.1 Introducción	8
1.2 Planteamiento del problema	9
1.2 Área de Estudio	11
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo General:	14
1.3.2 Objetivos Específicos:	14
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ASUNTO	15
2.1 Actividad Minera en Chile	15
2.1.1 División Andina de CODELCO	16
2.1.2 Expansión Andina	17
2.2 Crecimiento Urbano	21
2.2.1 Cambio de uso y cobertura de suelo	22
2.3 Estudios similares previos	24
2.4 Teledetección	26
2.4.1 Espectro electromagnético	27
2.4.1.1 Sensores remotos	28
2.4.1.2 Resolución de un Sistema Sensor	28
2.4.2 Programa LANDSAT	29
2.4.2.1 Instrumentos de observación de los satélites Landsat	29
2.4.3 Procesamiento de las imágenes de satélite	31
2.4.3.1 Fase de entrenamiento	31
2.4.3.2 Método supervisado	31
2.4.3.3 Estadísticas de entrenamiento	32
2.4.3.4 Fase de Asignación	32
2.4.3.5 Clasificador de máxima probabilidad	32
CAPÍTULO 4: MARCO METODOLÓGICO	33
3.1.1 Enfoque de investigación	33
3.2 Materiales	34
3.2.1 Imágenes satelitales	34
3.3.2 Corrección Radiométrica:	34

3.3.2 Corrección Atmosférica:.....	35
3.3.3 Composición de Bandas	35
3.3.4 Clasificación usos de suelo.....	35
3.3.5 Clasificación Supervisada	36
3.3.6 Verificación de los resultados.....	38
3. 4 Análisis de la expansión urbana.....	41
3.4.1 Tasa de cambio de la superficie urbana.....	41
3.4.2 Baricentro del suelo urbano	41
3.4.3 Compactación urbana.....	41
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	42
4.1 Análisis de cambios de usos de suelo entre los años 1986 y 2016.....	42
4.1 Descripción de los usos de suelo año 1986	42
4.1.2 Descripción de usos de suelo año 1996.....	45
4.1.3 Descripción de usos de suelo año 2006.....	48
4.1.4 Descripción de usos de suelo año 2016.....	51
4.1.5 Cambio en el uso de suelo entre 1986-2016.....	54
4.2 Cambio de uso de suelo urbano entre 1986 y 2016	55
4.2.1 Tasa de cambio suelo urbano	55
4.2.2 Balance superficie Urbana 1986-1996	55
4.2.3 Balance Superficie Urbana 1996-2006.....	56
4.2.4 Balance Superficie Urbana 2006-2016.....	57
4.3 Relación entre la Producción de cobre y el crecimiento urbano de la Provincia de Los Andes.....	59
4.4 Crecimiento urbano a nivel comunal.....	62
4.4.1 Tipos de Expansión a nivel comunal.....	64
4.4.1 Dirección de la expansión urbana (Baricentro Urbano)	66
4.4.2 Índice de Compacidad Urbana.....	69
CAPÍTULO 5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	71
5.2 Conclusión	73
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Provincia de Los Andes	11
Figura 2. Área de Estudio	12
Figura 3. Principales Proyectos División Andina CODELCO	18
Figura 4. Obras e instalaciones de Proyecto 244.....	20
Figura 5. Crecimientos áreas urbanas Gran Concepción.....	24
Figura 6. Patrones de cambios de usos de suelo en la Ciudad minera de Shuozhue, Distrito de Pinglu, Provincia de Shanxi, China.. ..	25
Figura 7. Elementos de la Teledetección.	27
Figura 8. Diagrama del espectro electromagnético.	27
Figura 9. Módulo Radiometric Calibration.	34
Figura 10. Módulo FLASSH Atmospheric Correction	35
Figura 11. Pasos de la Clasificación Supervisada.....	36
Figura 12. Áreas de entrenamiento para los 5 usos de suelo.....	37
Figura 13. Pasos para elaboración de la matriz de confusión	40
Figura 14. Matriz de confusión online	40
Figura 15. Distribución (%) de usos y coberturas de suelo año 1986.....	42
Figura 16. Usos de suelo en el área de estudio año 1986.	44
Figura 17. Distribución (%) de usos y coberturas de suelo año 1996.....	45
Figura 18. Usos de suelo en el área de estudio año 1996.	47
Figura 19. Distribución (%) de usos y coberturas año 2006.	48
Figura 20. Usos de suelo en el área de estudio en el año 2006.....	50
Figura 21. Distribución (%) de usos y coberturas de suelo año 2016.....	51
Figura 22. Usos de suelo en el área de estudio año 2016.	53
Figura 23. Ganancia y pérdida de superficie urbana entre los años 1986 y 1996.	56
Figura 24. Ganancia y pérdida de superficie urbana entre los años 1996 y 2006.	57
Figura 25. Ganancia y pérdida de superficie urbana entre los años 2006 y 2016.	58
Figura 26. Gráfico de dispersión que refleja la relación entre la Producción de cobre y la superficie urbana (ha) entre los años 1986 y 2016.	62
Figura 27. Distribución de la superficie urbana pos comuna entre los años 1986 y 2016.....	63
Figura 28. Crecimiento urbano entre los años 1986 y 2016.	65
Figura 29. Cambios de dirección de la expansión urbana.....	68

Figura 30. Índice de compacidad urbana por comuna.....	70
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Población urbana y rural de las comunas de la Provincia de Los Andes.	13
Tabla 2. Datos de satélites LANDSAT.	31
Tabla 3. Imágenes LANDSAT seleccionadas.....	34
Tabla 4. Combinación falso color de imágenes LANDSAT de imágenes seleccionadas. .	35
Tabla 5. Valores índices de KAPPA.....	39
Tabla 6. Tasa de cambio superficie urbana a nivel Provincial entre los años 1986 y 2016.	55
Tabla 7. Producción de cobre fino anual, a nivel mundial, nacional y de CODELCO Andina.	60
Tabla 8. Superficie urbana clasificación supervisada y modelada.....	61
Tabla 9. Tasa de cambio de superficie urbana a nivel comunal.	63
Tabla 10. Coordenadas del baricentro urbano entre los años 1986 y 2016.....	67
Tabla 11. Valores de índice de compacidad urbana.....	70

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 Introducción

La creciente urbanización del territorio chileno ha llevado a que el censo del año 2012 estimara que alrededor del 87% de la población chilena habita en áreas urbanas (INE 2012). Acorde a lo anterior, Las Naciones Unidas calculan que para el año 2050, el 68% de la población mundial residirá en estas áreas. Esta urbanización no solo se refleja en el aumento de la población urbana, sino también en el proceso constante y acelerado de expansión que está afectando a las ciudades (Romero et al., 2007). Este fenómeno no solo es particular de las grandes ciudades, sino que se extiende por todo el territorio, y es observable también, en las ciudades intermedias y centros administrativos menores (Azocar, 2003).

Esta expansión urbana se refleja a través del crecimiento físico de las ciudades (Romero et al., 2007; Henríquez et al., 2006b), por lo que es también un tema de gran interés geográfico (Castro y Brignardello, 1998), debido a sus vertiginosas características y a sus casi irreversibles consecuencias (Romero et al., 2003). Debido a esto, muchos planificadores buscan entender los procesos de crecimiento de las ciudades, sus patrones, y los factores que actúan como agentes dinamizadores o conductores del proceso de expansión urbana.

Existen muchos factores que pueden actuar como conductores de procesos de expansión urbana. Algunos autores mencionan que las políticas gubernamentales (Henríquez, 2009), la influencia del paisaje, la movilidad de la población o el sistema socioeconómico (Liu, 2002), serían los principales agentes responsables. Sin embargo, cada vez más trabajos, recalcan la importancia de los impactos de las economías de mercado en los procesos de expansión urbana, ya que la respuesta de las ciudades a este tipo de fenómeno, ha sido, muchas veces, un crecimiento explosivo y una tendencia a la fragmentación y segmentación social del espacio urbano (Romero y Toledo, 2000; Mertins, 2000).

La minería es una de las principales actividades que sustentan el sistema socioeconómico chileno. A escala mundial, la producción de cobre, convierte a Chile en una potencia minera. La producción de esta actividad ha influido significativamente en la modelación del espacio y con ello en los factores, sociales, ambientales y económicos (Campodónico y Ortiz 2002), por lo tanto, se reconoce los efectos de la minería en la construcción del espacio.

Consecuentemente con lo anterior, la Provincia de los Andes ha sido influenciada desde sus inicios por la actividad minera. Actualmente, se localiza en el sector de Río Blanco una de las mineras más importante del país (CODELCO Andina), la cual ha modelado el espacio de la región. Acorde a estos antecedentes, el objetivo de esta investigación es realizar un análisis histórico y retrospectivo del proceso de cambio de uso de suelo y de expansión urbana en la Provincia de Los Andes, desde el año 1986 hasta el año 2016, tomando en cuenta la influencia de la actividad minera en la Provincia.

1.2 Planteamiento del problema

El territorio chileno desde hace varias décadas está sufriendo un proceso de urbanización constante y acelerado (Romero et al., 2007). Junto con el acelerado proceso de urbanización viene una rápida expansión del espacio urbano, generando a su vez, importantes cambios a nivel global, debido a su interacción con el medio ambiente. Actualmente la expansión urbana ha generado distintos impactos adversos, tales como, la destrucción de los ecosistemas naturales (Tao et al., 2013; Linard et al., 2013), la transformación de las estructuras del uso de la tierra (Weber y Puissant 2003; Li et al., 2013; Xu et al., 2015), el cambio de microclimas superficiales (Romero et al., 2006), la reducción y contaminación de cuerpos de agua (Du et al., 2010), entre otros.

La expansión física es la principal prueba del crecimiento de las ciudades (Romero, 2007; Henríquez, 2006). Esta expansión física ha ocurrido a través del proceso de cambios de usos y coberturas de suelos, transformando principalmente espacios naturales o seminaturales en urbanos. Es por eso que Romero et al. (2007) afirmó que la expansión urbana ha adquirido grandes velocidades y ha comprometido enormes superficies cubiertas previamente por cultivos y por vegetación abundante.

A fin de entender el proceso de expansión física de las ciudades, es importante analizar todos los aspectos de esta. Es por esto, que se han llevado a cabo numerosas investigaciones para entender, la estructura del suelo y los límites del crecimiento urbano, así como también modelar y medir las características morfológicas de la expansión urbana. Esto se ha hecho a través de la aplicación de varios modelos, tales como, modelo de automatización celular (He et al., 2008; Wang et al., 2013), modelo fractal (Chen, 2011), Baricentro urbano (Wang y Bao, 1999), índice de compacidad urbana, entre otros.

A nivel mundial, se ha puesto atención a los procesos de expansión urbana desde la década del 60, especialmente en las grandes metrópolis. En Chile, los estudios sobre expansión urbana han apuntado a las grandes urbes, como Valparaíso (Sandoval, 2009), Concepción (Rojas, 2009) o Santiago (Molina, 2007), sin embargo, no existen suficientes estudios acerca del crecimiento urbano en ciudades pequeñas o centros administrativos menores, y es importante abordarlo, ya que en realidad, la mayoría de los centros urbanos crecerá en los países en desarrollo durante los próximos años, especialmente, en ciudades medianas y pequeñas (Cohen, 2004). Por lo tanto, es significativo y necesario estudiar la expansión urbana en las ciudades pequeñas a fin de comprender el proceso de expansión desde una etapa temprana.

Por otro lado, uno de los aspectos más importante de la expansión urbana son los factores que aceleran este proceso. Muchos autores coinciden en que las actividades económicas de un territorio ejercerían un papel fundamental sobre la expansión urbana de una ciudad (Lungu, 2000; Figueroa, 2009). En el territorio nacional, una de las actividades económicas más importante es la minería, aportando un 13% del producto interno bruto en los últimos quince años (COCHILCO, 2017). En la actualidad, existen más de 84.000 concesiones de explotaciones mineras, lo que abarcaría un total de 15 millones de hectáreas aproximadamente (SERNAGEOMIN 2016). Además, según el SERNAGEOMIN,

actualmente existen más de 144 compañías mineras en funcionamiento (SERNAGEOMIN, 2018).

A pesar de la importancia de la minería en la economía nacional, la mayor parte de las ciudades mineras se enfrentan a problemas ambientales y sociales, causados por la explotación a gran escala de los recursos minerales y recesión de la industria, debido al agotamiento de los recursos (Long et al., 2013). Acorde a lo anterior, la industria minera se enfrenta constantemente a la disyuntiva de si será sustentable a través del tiempo (Fernández y Atienza, 2009). El análisis de la morfología urbana se considera un enfoque efectivo para explorar la sostenibilidad compleja y multifacética de las ciudades mineras (Van y Voogd, 2001; Wu, 2008). Por lo tanto, el estudio de la expansión urbana, como una parte importante de la morfología urbana, puede ser un punto de entrada para entender los mecanismos de desarrollo de estas ciudades.

La Provincia de Los Andes se encuentra en un constante crecimiento urbano y como Provincia se ha visto influenciada por la actividad minera. En la ciudad de Los Andes, se localiza la minera CODELCO Andina, una de las más importantes a nivel Nacional. Esta minera, buscaba aumentar la producción de cobre, a través del Proyecto CODELCO Andina 244. Este incluía una serie de intervenciones para trasladar el material desde la ciudad de Los Andes, a las comunas de Colina y Tiltil, interviniendo las comunas de Calle Larga, y Rinconada (Proyecto 244 EIA, 2013). Debido a los diversos proyectos y los planes de expansión de CODELCO Andina, la estructura urbana de la ciudad de los Andes se ha visto afectada, al igual que las comunas de Calle Larga, Rinconada y San Esteban. Lugares que antes de la década de los 90 eran prácticamente rurales y hoy en día gran parte de sus territorios están siendo ocupados por proyectos urbanos, que en su mayoría son privados y pertenecen a los sectores más acomodados de la población. Por ello, el presente trabajo busca comprender el proceso de cambio de uso de suelo y de expansión urbana en la Provincia de Los Andes, a través de un análisis multitemporal de cuatro imágenes LANDSAT entre los años 1986 y 2016 y así se determinará los cambios en la cobertura de usos de suelo, las ganancias y pérdidas de superficie urbana, y finalmente, entender el crecimiento y morfología urbana de ciudades pequeñas asociado a la actividad minera en la región.

1.2 Área de Estudio

El área de Estudio se enmarca en el sector cordillerano de la Región de Valparaíso, específicamente en la Provincia de Los Andes, entre las coordenadas geográficas -33°25'00"S -70°46'00"W y -33°10'00"S -70°00'00"W. Los Andes es capital Provincial de la Provincia que lleva el mismo nombre, está conformada por cuatro comunas, las cuales son; Los Andes, San Esteban, Rinconada y Calle Larga (Ver Figura 1). Como Provincia limita al norte con la comuna de Putaendo, al oeste con la comuna de Llaillay, Panquehue, Santa María y San Felipe, al sur con Región Metropolitana, y al este con Argentina. Posee una superficie total de 3.054 km², siendo la segunda Provincia con mayor tamaño en la Región de Valparaíso.

Desde el punto de vista climático, presenta un clima templado mediterráneo, pero con algunas variaciones, esto, porque en la zona cordillerana a más de 3000 metros de altura presenta un clima frío de altura, donde hay un predominio de bajas temperaturas y de precipitaciones sólidas, especialmente en invierno.

El área de estudio se caracteriza por la estepa de arbustos espinosos donde predomina el espino. En los sectores más soleados, que miran al norte, se encuentran arbustos como el guayacán, algarrobo, quillay, molle y otros asociados al espino. En la zona cordillerana, sobre los 1.600 y 2.500 msnm, el paisaje está formado por la estepa arbustiva subandina adaptada a suelo pedregoso y condiciones extremas de vientos fuertes y acumulaciones de nieve. Por encima de los 2.500 metros se encuentra la estepa andina de altura, que se caracteriza por su aspecto achaparrado (40 cm) (BCN, 2018).

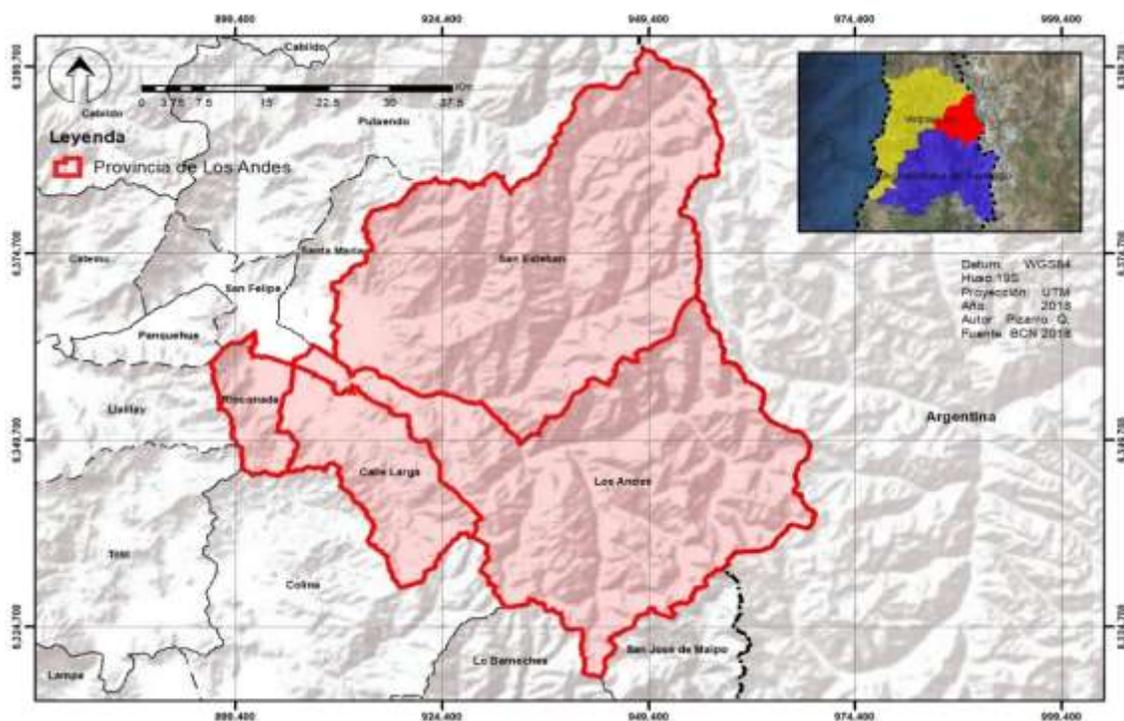


Figura 1. Provincia de Los Andes.
Fuente. Elaboración Propia.

Si bien el área de estudio está emplazada en la Provincia de Los Andes, el análisis de cambios de usos de suelo se realizó, específicamente, en los suelos cuya capacidad de uso van desde la clase I al V (Figura 2), con una superficie de 16.920 hectáreas. Esto, debido a que esta zona concentra las áreas urbanas de las cuatro comunas de la Provincia de Los Andes y se descartan dentro del análisis de usos de suelo los cultivos de laderas que están fuera del área delimitada. Es importante aclarar también, que a fin de analizar la continuidad de las clases de suelo I al V y de generar un área homogénea como área de estudio se han incluido pequeñas áreas de la clase VII y VIII, que estaban emplazadas en medio del área de estudio, como pequeños cerros y laderas (ver anexo 1). Los suelos clase I al V fueron seleccionados desde las bases cartográficas del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 2014).

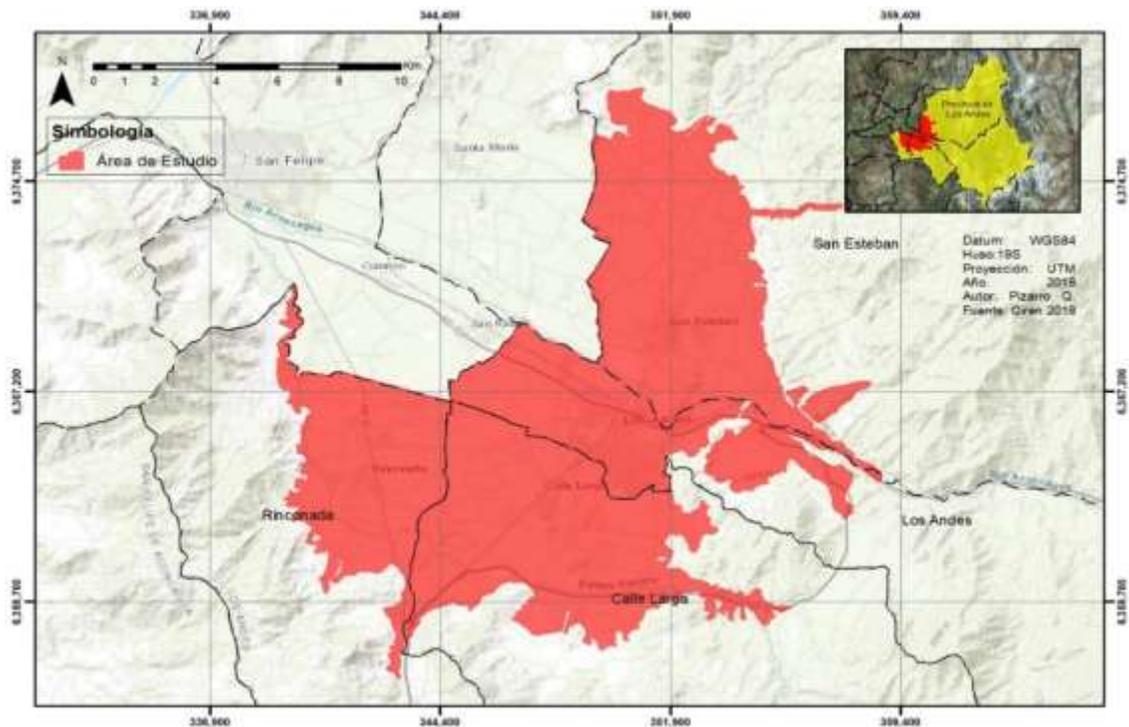


Figura 2. Área de Estudio.
Elaboración Propia en base a CIREN 2014.

La Provincia de Los Andes tiene una gran cantidad de población urbana (ver tabla 1) para el censo del año 2017 más del 80% de la población vive en áreas urbanas.

Comuna	Censo 1992		Censo 2002		Censo 2012		Censo 2017	
	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana
Calle Larga	1.211	1.234	4.946	5.447	4.981	8.441	4.141	10.691
Los Andes	769	11.889	4.081	55.388	4.543	58.512	5.691	61.017
Rinconada	311	1.125	965	5.727	1.96	7.477	2.142	8.065
San Esteban	1.991	1.328	6.858	7.542	7.152	10.219	7.483	11.372

Tabla 1. Población urbana y rural de las comunas de la Provincia de Los Andes.

Fuente. Censo año 1992, 2002, 2012, 2017.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

Analizar los cambios de usos de suelo y los procesos de expansión urbana en la Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso, entre los años 1986 y 2016, con el fin de estimar en qué medida los cambios son influenciados por la actividad minera.

1.3.2 Objetivos Específicos:

Determinar los cambios en los usos de suelo en el área de estudio entre los años 1986 y 2016.

Establecer las ganancias y pérdidas de uso de suelo urbano, a través de matrices de cambios de usos de suelo para los distintos períodos de años.

Estimar la relación entre las dinámicas del crecimiento urbano en el contexto de la actividad minera en la Provincia.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ASUNTO

2.1 Actividad Minera en Chile

La Minería es una de las actividades económicas más importantes a nivel Mundial, su producción ha sido totalmente significativa y modeladora del espacio en términos ambientales, económicos y sociales (Campodónico y Ortiz, 2002).

América Latina es la región que atrae mayor inversión en exploraciones mineras, actualmente concentra el 73% de estas (S&P Global Market Intelligence, 2018), y Chile ocupa el quinto lugar del ranking de países que atraen mayores capitales para exploración minera, donde el 7% de las exportaciones de metales a nivel mundial se realiza desde Chile (Consejo Minero, 2016).

La industria minera en Chile es una de las actividades de mayor desarrollo económico y productivo del país, contribuyendo de manera significativa en el producto interno bruto, representando en los últimos 15 años el 13% de este. Debido al sostenido crecimiento que se incrementa con las inversiones extranjeras y nuevas tecnologías de explotación, la actividad se ha perfilado en términos de conectividad y rentabilidad como una de las más favorables y seguras de Chile, situación que le ha permitido al país ser unos de los principales productores de cobre en el mundo, generando el 30% de la producción de cobre a nivel mundial (COCHILCO, 2016). En el año 2016 Chile produjo 5,6 millones de toneladas de cobre, 56 mil toneladas de molibdeno, 43 toneladas de oro, 1497 toneladas de plata y 16 millones de toneladas de hierro y si se aprueban todos los proyectos mineros que actualmente están en carpeta para el 2024 la producción de cobre aumentaría a 7,2 millones de toneladas (Consejo Minero, 2016).

En la zona del Valle del Aconcagua la minería ha tenido una intensa actividad desde hace siglos hasta la actualidad. Hoy la pequeña minería está en retirada dando paso a grandes explotaciones mineras, donde empresas estatales y transnacionales hacen enormes intervenciones tecnológicas y de capital para extraer minerales de diversa categoría, y orientados a diferentes mercados internacionales. Tan solo en la Provincia de Los Andes según el SERNAGEOMIN (2016) existe 45 faenas mineras, siendo la principal la división Minera Andina de CODELCO.

2.1.1 División Andina de CODELCO

La División Minera Andina de CODELCO se levanta como la segunda gran minera del país con planes de expansión crecientes para convertirse en la primera, con proyectos como, Expansión Andina CODELCO 244. En el año 2017 produjo 220.000 toneladas métricas de cobre fino y 3.894 toneladas de molibdeno (CODELCO, 2017). Hoy es la principal y más importante minera de la Región de Valparaíso, emplazada en la cordillera de Los Andes entre los 3000 y 4000 msnm.

El desarrollo productivo de la actividad minera en la cuenca de Río Blanco, presenta evidentes desafíos, por la ubicación del yacimiento, en plena cordillera de Los Andes. Es por esto, en un principio, que las primeras instalaciones de la minera fueron construidas en cavernas para asegurar su funcionamiento, inclusive durante las temporadas de invierno.

En diciembre del año 1955 comenzaron las obras preliminares dando cuenta del inicio del modelamiento territorial en la provincia de Los Andes, la primera de ella correspondió a un camino de 30 a 40 kilómetros que conectaba la estación de Río Blanco y la Mina, además a esta obra se sumó el levantamiento de alojamientos temporales en terreno para los trabajadores, donde se implementó una residencia de estructura prefabricada o chalet, también, barracas de madera en el área industrial (Barros, 2010).

La intervención territorial más clara correspondió a Saladillo, que fue construido bajo el modelo urbano Industrial Company Towns, allí se buscaba una sociedad perfecta al servicio de la industria. Estos complejos fueron integrados en un sistema territorial que ordenaban los elementos productivos bajo un espacio regional, sustentado por las redes específicas de las operaciones y donde dichos elementos resultaban interdependientes entre sí para conseguir un funcionamiento sistemático del espacio minero (Garcés, 2010).

El modelo consideró en su plan de obra la edificación de viviendas y construcciones viales e infraestructuras. *"El campamento contaba con oficinas administrativas, viviendas para extranjeros, viviendas para empleados y obreros, servicios de educación, salud, comercio, registro civil, Carabineros, teatros, clubes, deporte e iglesias"* para todos los trabajadores y sus familias (Barros, 2010).

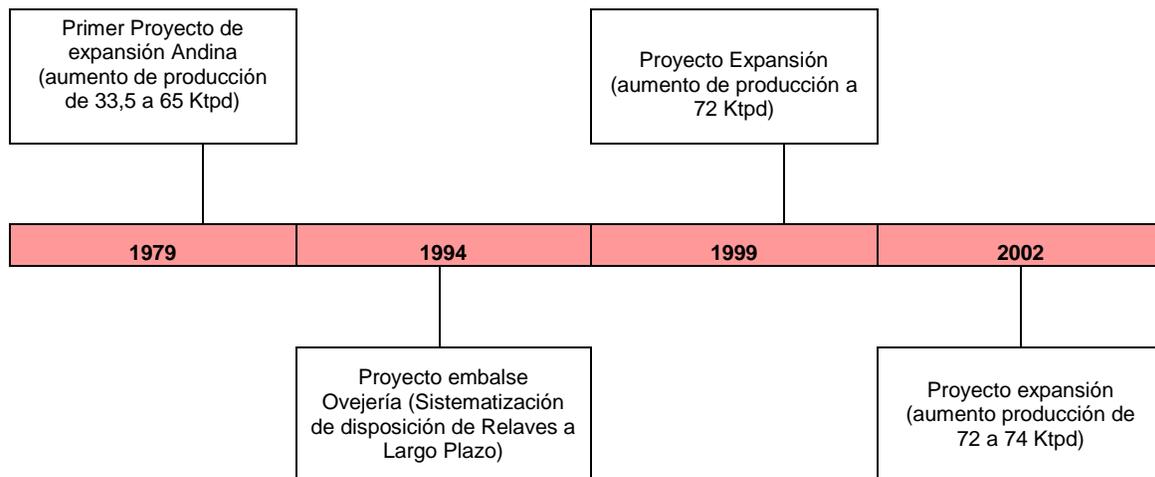
El mayor fenómeno territorial se produjo con el traslado de los habitantes del campamento a la comuna de Los Andes, en la década del 70, produciéndose el primer proceso importante de expansión urbana en la ciudad de Los Andes. Si bien CODELCO Andina en sus inicios logró desarrollar sus labores por la contratación de hombres procedentes de Los Andes y sectores aledaños, a medida que aumentó la capacidad productiva del cobre aumentaron las demandas de Recurso Humano, por lo que la actividad industrial, en la ciudad había provocado la intensa y densificada migración de la población, provenientes de diversas regiones del país (Barros, 2010).

Ante esta nueva sociedad en movimiento que presentaban características diversificadas, surgieron nuevas demandas sociales, lo que significó para la división, la implementación de un plan habitacional que no se implementaría en el campamento Saladillo, si no, en la ciudad de Los Andes, trasladando a la mayoría de los trabajadores y sus familias a la comuna.

En el año 1976 comenzaron las obras para urbanizar, lo que significó la construcción de 192 viviendas y 3 edificios de 36 departamentos cada uno. Las obras no culminaron ahí, sino que el proceso de urbanización, continuó con la construcción de la segunda etapa de 116 viviendas y 4 edificios, luego la tercera etapa creció significativamente con 4 edificios de 128 departamentos cada uno, y finalmente se construyó la cuarta etapa de 64 viviendas que dieron nombre a la Villa Minera Andina (ver anexo 2). Además, en el año 1984 los planes habitacionales fueron en aumento dando origen al conjunto habitacional Villa La Gloria, y se adquirieron viviendas en el Sector de Curimón y Portezuelo (Baros, 2010).

2.1.2 Expansión Andina

Las operaciones mineras de CODELCO Andina, responden a un proceso histórico de gran importancia, esta posee un cuantioso recurso geológico, cuyo yacimiento se emplaza en el sector Cordillerano, convirtiéndose en unas de las primeras faenas cupríferas a gran altura y de potente crecimiento económico, las primeras obras se iniciaron con la explotación de minas subterráneas en la década de 1970, luego incorporaron a principios de 1980 el desarrollo de la minería a rajo abierto. A lo largo de la década de los 90 y de los 2000 se produjeron una serie de proyectos (21 de estos han sido sometidos al sistema de evaluación de impacto ambiental) a fin de aumentar la capacidad de producción de cobre (ver figura 3), pero sin duda uno de los proyectos de mayor envergadura fue Expansión Andina CODELCO 244.



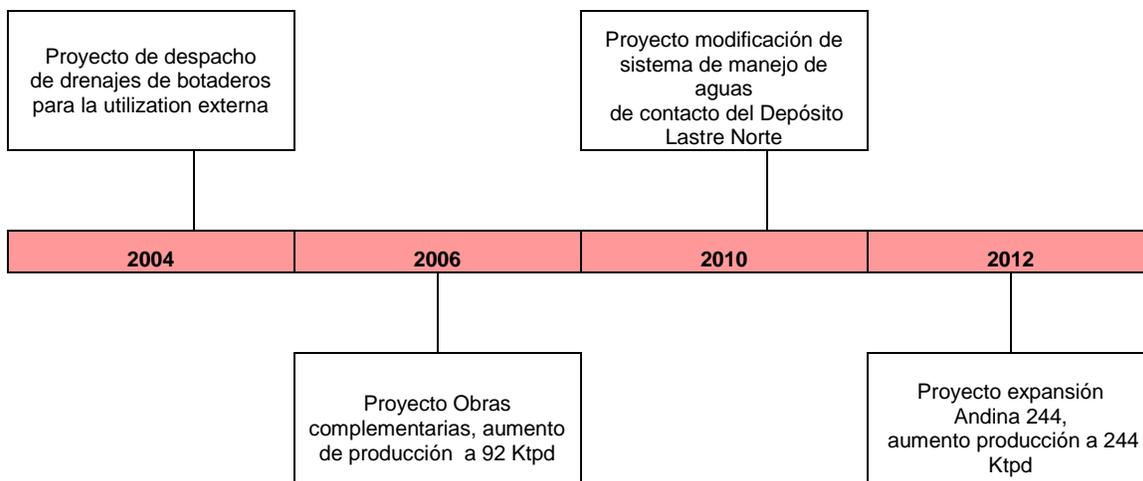


Figura 3. Principales Proyectos División Andina CODELCO.
Fuente. Elaboración Propia.

El proyecto Expansión Andina 244 buscaba incrementar de forma significativa la producción del mineral, abasteciendo por sí solo por cerca de ocho años la demanda de cobre a nivel nacional. Tenía como objetivo aumentar la capacidad de procesamiento de mineral desde 152 mil toneladas por día a 244 KTPD mediante la incorporación de nuevas obras e instalaciones, lo cual le permitiría producir un promedio anual de 600 mil toneladas de cobre fino, pudiendo alcanzar alrededor de 700 mil toneladas en los años de mayor actividad y optimización de proceso (EIA, Resumen Ejecutivo, 2013).

El Proyecto implicaría la ampliación del rajo y de la mina subterránea Sur Sur. Además, se consideraba una nueva instalación denominada Nudo 3.500 en la cual se instalarían los chancadores primarios desde el cual, mediante correas transportadoras alojadas al interior de un túnel de casi 26 km de longitud, el mineral sería transportado hasta una nueva planta concentradora, la cual contaría con unidades de chancado secundario, terciario, molienda y flotación. El concentrado de cobre obtenido de esta planta sería transportado, a través de un concentraducto, hacia una nueva planta de filtros en el sector de Montenegro de Til Til, donde el concentrado sería tratado, almacenado y embarcado mediante el actual servicio de ferrocarril y camiones a diversos puntos de consumo (EIA; Descripción del Proyecto; 2013).

Por otro lado, los relaves o desperdicios que se generen del proceso serían trasladados mediante una canaleta de aproximadamente 42 km. de longitud, desde la nueva planta concentradora hacia el actual tranque de relaves Ovejería en el sector de Huechún en la comuna de Colina cuya capacidad sería ampliada y se consideraría reutilizar el agua contenida en los relaves, para lo cual se construiría un sistema de captación e impulsión en el tranque de relaves Ovejería, que recircularía el agua desde la laguna del tranque hacia la nueva planta concentradora, a lo largo de un trazado de aproximadamente 48 km de longitud (EIA; Descripción del Proyecto; 2013).

Respecto del abastecimiento de energía eléctrica, el Proyecto consideraba la construcción de una línea de transmisión de 220 KV de aproximadamente 52 km de extensión, desde la

actual subestación Polpaico (que forma parte del SIC) hasta una nueva subestación emplazada en el sector de la nueva planta concentradora. Desde dicha subestación se distribuirá energía a todas las áreas de proceso e infraestructura de planta mediante alimentadores subterráneos de 33 KV, y a través de una línea de 33 KV que alimentará la planta de filtros y el sistema de recirculación de aguas (Ver Figura 4) (EIA; Descripción del Proyecto; 2013).

Unos de los tópicos fundamentales del Proyecto 244, dice relación con la demanda de recurso humano, donde en la etapa de construcción la demanda sería de 18.000 personas, y en la etapa de operación serían alrededor de 12.800 personas (EIA; Descripción del Proyecto; 2013).

Aunque el controversial proyecto fue rechazado en el año 2013, CODELCO Andina continúa aumentando la producción de cobre, tan solo en el año 2017 la producción llegó a las 220.000 toneladas (COCHILCO, 2018).

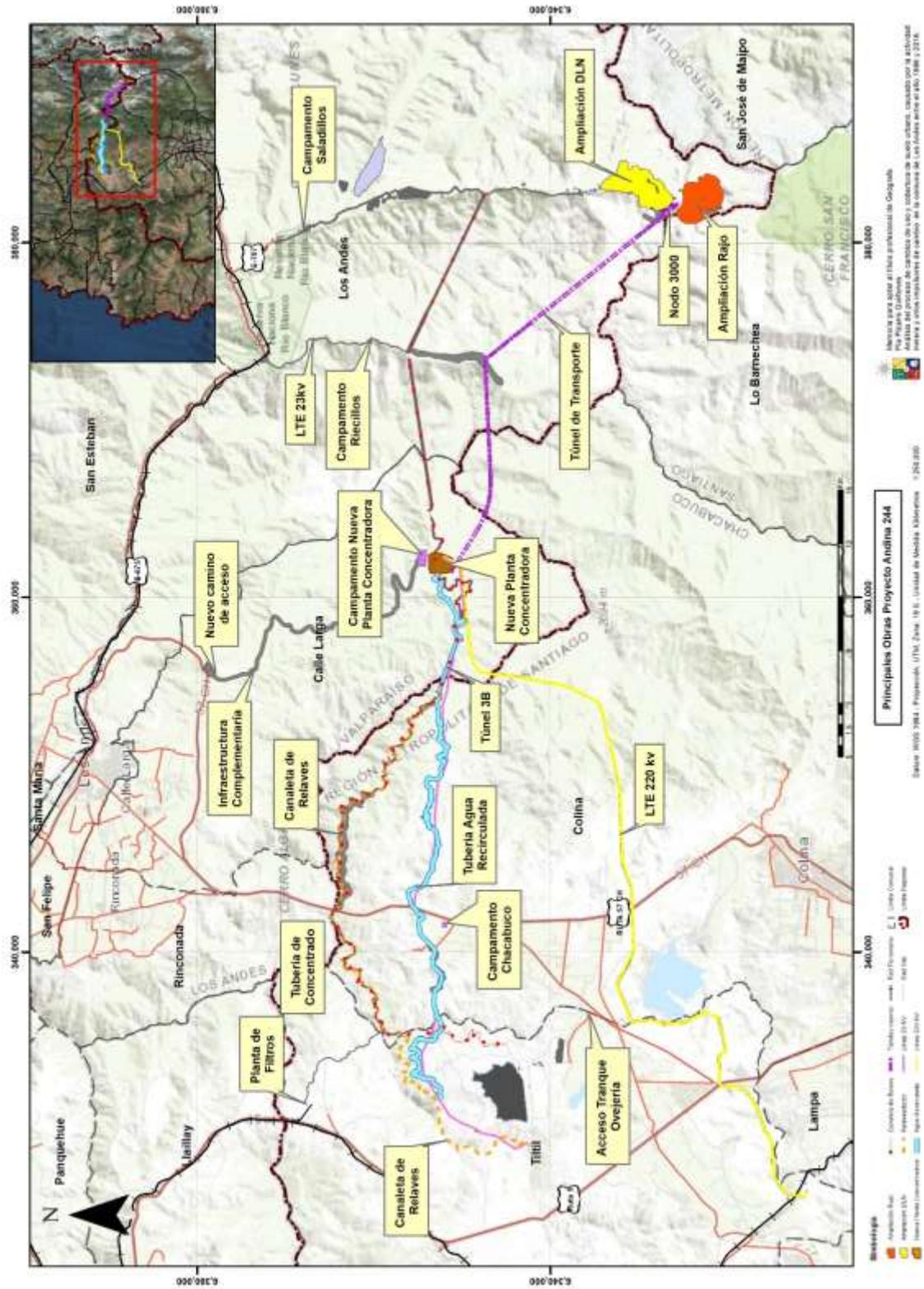


Figura 4. Obras e instalaciones de Proyecto 244.
Fuente: Elaboración Propia en base a EIA Proyecto 244

2.2 Crecimiento Urbano

Las Naciones Unidas en el año 2008 estimaban que para el 2050 el 68% de la población mundial viviría en zonas urbanas, en realidad, la mayoría de los centros urbanos crecerá en los países en desarrollo durante los próximos años, especialmente en ciudades pequeñas (Cohen, 2004). Es por esto que hoy en día es necesario comprender el crecimiento urbano, ya que, según los planificadores generaría grandes costos ambientales y sociales (Rojas et al., 2009).

Los factores que generan la expansión urbana son variados, es por esto que muchos autores señalan que este proceso es el resultado de factores externos e internos de las ciudades, así como también locales y regionales. Por lo tanto, es imposible afirmar que solo un factor interviene en el crecimiento de una ciudad. Henríquez et al. (2006a) menciona que pueden ser varios factores los que conduzcan a esto, como; la falta de oportunidades para el desarrollo rural, la emigración de la población hacia las ciudades, las altas tasa de crecimiento natural de la población urbana, la economía de mercado que promueve la urbanización o las economías de aglomeración y concentración espacial para consumir bienes y servicios. Fernández y Atienza (2011) afirmaron que las economías de aglomeración podrían dotarle a un territorio ventajas comparativas, que permitirían acelerar los procesos de urbanización, como en el caso de las ciudades mineras, donde estas ventajas comparativas surgirían a raíz de la existencia de un recurso mineral, aunque no explicarían por si solas el surgimiento y concentración de un área urbana.

En general, los trabajos recientemente publicados indican que los impactos de la economía de mercado, a nivel local y regional, el comercio y la movilidad de la población son las fuerzas que guían los procesos de expansión urbana, y que la respuesta de las ciudades ha sido, muchas veces, un crecimiento explosivo y una tendencia a la fragmentación y segmentación social del espacio urbano y uniformidad del paisaje (Vink, 1982; Romero y Toledo, 2000; Mertins, 2000). Producto de todo ello, Edward Soja et al (2004) pone énfasis en la condición que adquiere la ciudad contemporánea, que, producto del proceso de globalización, se está convirtiendo en un sistema inestable, debido a la expansión descontrolada alrededor de las ciudades. Este proceso de crecimiento incontrolado y explosivo ha reemplazado gradualmente al concepto de ciudad compacta que se conocía décadas atrás, como, aquella ciudad de altas densidades residenciales y de un centro histórico único que proveía de bienes y servicios a la totalidad de la población, esta ha sido reemplazada por una ciudad polarizada y fragmentada. Es por esto que los procesos de expansión urbana de hoy en día y en especial en Latinoamérica, han resultado en una ciudad más difusa, donde se ha dispersado las áreas residenciales, industriales y comerciales, privatizando la mayor parte de la construcción de la ciudad (Romero y Vásquez, 2006). En esta ciudad difusa aquellos que reciben más altos ingresos se han trasladado a vivir a áreas de bajas densidades habitacionales y son atendidos por centros comerciales cada vez más exclusivos, segregados geográficamente y aislados socialmente (Henríquez et al., 2006). Por otro lado, los sectores de menores ingresos se han localizado en áreas deterioradas y abandonadas por los sectores de mayores ingresos o en áreas periféricas donde es menor el valor del suelo (Romero et al., 2006).

A fin de entender los procesos de expansión urbana es importante reconocer los distintos patrones de expansión, donde factores tanto internos como externos desencadenan variadas formas, como por ejemplo las señaladas por Romero (2001) en Moscoso (2008) y Sandoval (2009);

- Crecimiento “radial”; también llamado “acreción por adherencia” de nuevas áreas urbanas que comienzan a expandirse en la periferia de estas, este crecimiento permite ampliar la ciudad aprovechando las economías de aglomeración y extendiendo espacios sociales de igual nivel.
- Crecimiento “tentacular”, este tipo de crecimiento se desarrolla a través de los principales ejes de transporte, aprovechando la accesibilidad y conectividad y se socia principalmente a los medios de transportes.
- Crecimiento “salto de rana”; Este tipo de crecimiento hace referencia a la aparición de superficies construidas que se originan como nuevas urbanizaciones, y se localizan fuera del límite urbano ya establecido, está estrechamente relacionado a quienes pueden pagar áreas aisladas a través de complejos urbanísticos o también se relaciona a quienes en la mayoría de los casos ocupan áreas de manera ilegal, en tierras más baratas y alejadas de los centros urbanos.

Según Hidalgo et al. (2007b) el crecimiento tipo salto de rana se ha instalado en Latinoamérica a través de megaproyectos de urbanización que se instalan fuera de la mancha urbana. Estos megaproyectos son considerados como efectos de la globalización (Sandoval, 2009). Además, la literatura agrega que esta expansión incontrolada se ve facilitada por la eliminación sistemática de las restricciones al crecimiento espacial de las ciudades, que ha tenido lugar a través de cambios en los principios y formas de los instrumentos de planificación territoriales, como los planes reguladores comunales e intercomunales (Romero y Vásquez, 2005b).

2.2.1 Cambio de uso y cobertura de suelo

Los objetivos de estudio se enfocan en el análisis temporal del cambio de uso de suelo urbano, para ello, es necesario entender la definición de conceptos como; uso de suelo y cobertura.

La cobertura de suelo, se entiende como el estado biofísico de la cubierta de la tierra, vale decir, “las unidades vegetales que cubren la superficie terrestre” (Romero y Vásquez, 2005). Por cobertura se entiende, “el destino asignado por el hombre a cada unidad de territorio” (Romero y Vásquez, 2005), es decir, la función humana que se da al espacio (Pauleit, 2005).

Según lo analizado en este estudio, es importante entender que los estudios de cambios de uso y cobertura de suelo entregan información necesaria para la planificación del territorio (Sandoval, 2009), debido a su capacidad de mostrar patrones espaciales y temporales, tales como, emplazamiento, distribución, estructura y dirección (Henríquez y Azocar, 2007, Lopez y Bocco, 2006, Zhang et al., 2013).

Según Aldana y Bosque, 2008 (citado en Sandoval, 2009) en los estudios de cambios de usos de coberturas de suelo existen dos términos clave que debemos definir y entender, ya que los abordaremos en esta investigación y serán necesarios para la caracterización de este estudio. Ellos son;

Conversión y reemplazo, que indica el cambio de un tipo de cobertura por otro; y **Modificación o transformación**, que es cuando no se operan cambio de categoría, pero sí se detecta algún nivel de afectación en uno o varios atributos de una categoría.

Para el caso de este estudio, ambos procesos fueron seleccionados, la conversión o reemplazo y el de modificación o transformación, para dar cuenta del cambio temporal del uso de suelo urbano, observando así, el reemplazo de una cobertura por este uso de suelo.

Por otro lado, es importante entender los cambios de coberturas y usos de suelo, en especial por los efectos ambientales del crecimiento urbano de las ciudades chilenas. Según estudios realizados en las metrópolis de Santiago, Valparaíso y Concepción, y en las ciudades intermedias de Chillán, Los Ángeles y Temuco, los principales efectos serían;

- Cambios en el clima de las ciudades, pérdida de la calidad del aire, generación y fortalecimientos de islas de calor y desaparición de islas frías. (Peña y Romero, 2005; Romero y Sarricolea, 2006).
- Desaparición, reducción y deterioro de las cubiertas vegetales (Romero et al., 2006; Romero y López, 2007).
- Pérdida de servicios ambientales y de calidad de los paisajes naturales al interior y alrededor de las ciudades (Vásquez y Romero, 2007; Romero y Vásquez, 2007).
- Pérdida de biodiversidad y reducción y desaparición de hábitats de vida silvestre (Vásquez y Romero, 2005a; Romero y López, 2007).
- Generación y aumento de los índices de segregación socioambiental en las ciudades (Vásquez y Romero, 2007).
- Falta de justicia ambiental y concentración de los efectos adversos en los sectores más vulnerables. (Romero y Molina, 2007; Vásquez y Romero, 2007).
- Comodificación creciente de los territorios, los recursos naturales y los servicios ambientales. Especulación y privatización de bienes comunes (Romero y Vásquez, 2005b).
- Creciente desacoplamiento y contradicciones entre las estructuras y dinámicas de la naturaleza y de los espacios construidos. Superación de la capacidad de carga y de resiliencia de los ecosistemas urbanos (Romero y Vásquez, 2007).

2.3 Estudios similares previos

Rojas et al. (2009), analizaron el crecimiento urbano del Gran Concepción, y afirmaron que la expansión en la región fue condicionada en gran parte por las actividades económicas e industriales de la zona, ya que en la región se localizaban actividad portuaria, industrias siderúrgicas e industrias pesqueras. Por otro lado, en relación a las formas de la superficie urbana, las más compactas, circulares y menos complejas se localizaron en los municipios más pequeños y menos urbanizados, donde el patrón de crecimiento es radial y las formas menos compactas se localizaron en los municipios consolidados más urbanizados como Concepción y Talcahuano, sin embargo, estos municipios tuvieron un patrón de crecimiento Tentacular, condicionado a las principales vías de transporte (Ver figura 5).

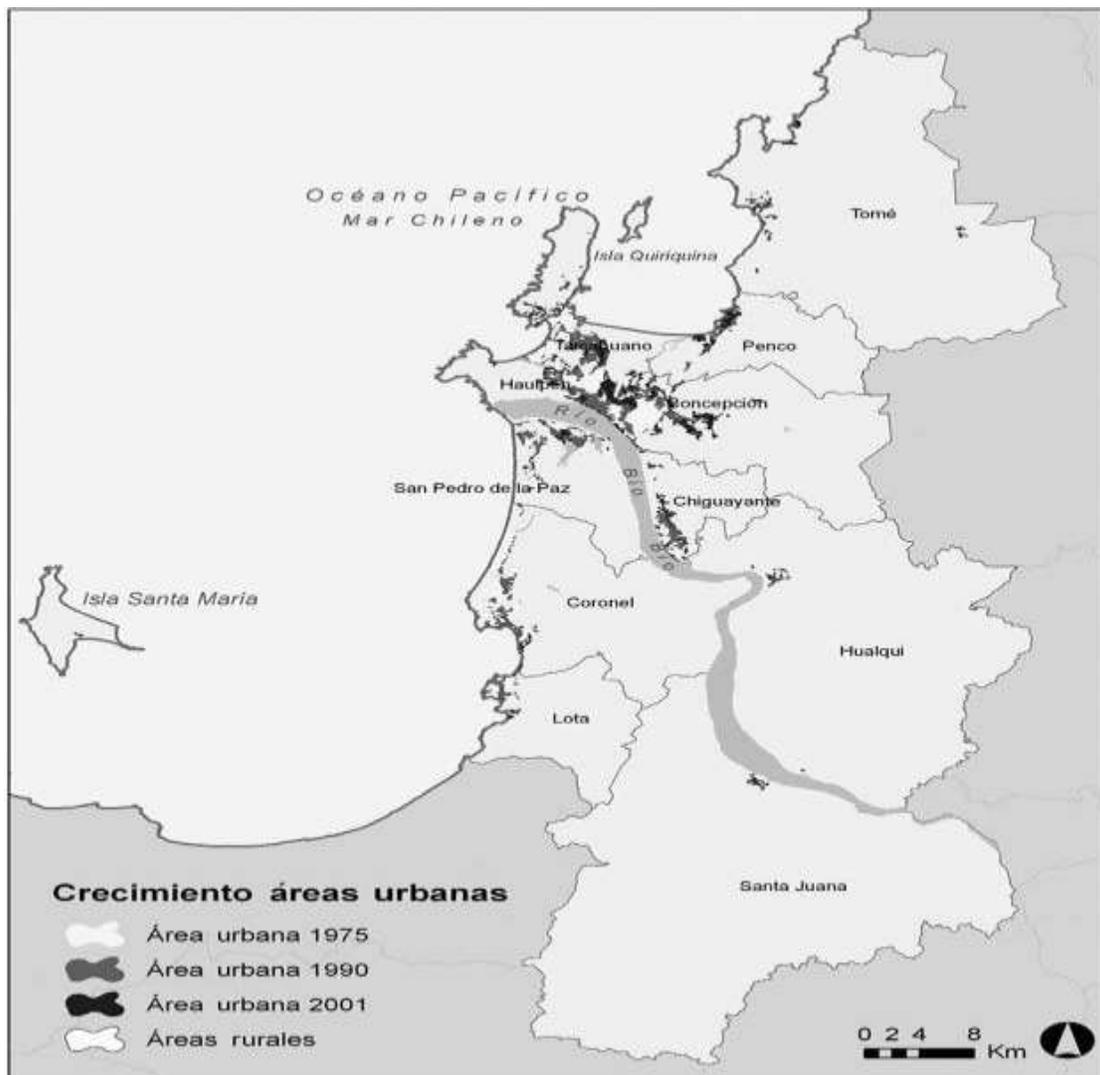


Figura 5. Crecimientos áreas urbanas Gran Concepción
Fuente. Rojas et al., 2009.

Zhang et al. (2016), analizaron el proceso de expansión de un municipio minero de ciudad de Shuozhou en el distrito de Pinglu, Provincia de Shanxi, China (ver figura 6). Los datos sobre el suelo urbano fueron extraídos de imágenes de teledetección en un período de 27 años y los hallazgos fueron los siguientes; el suelo urbano creció en un 568%. La expansión urbana experimentó episodios alternos de intensidad, en un principio del estudio fueron más suave y se intensificó en los últimos años, condicionado en parte la actividad minera de la zona. La estructura urbana fue más compacta en un principio y más difusa hacia el final del estudio y finalmente concluyó que los principales impulsores de la expansión urbana en la zona, fueron; el desarrollo del área minera en el distrito de Pingshuo, la geografía de la zona, las decisiones políticas y el desarrollo económico.

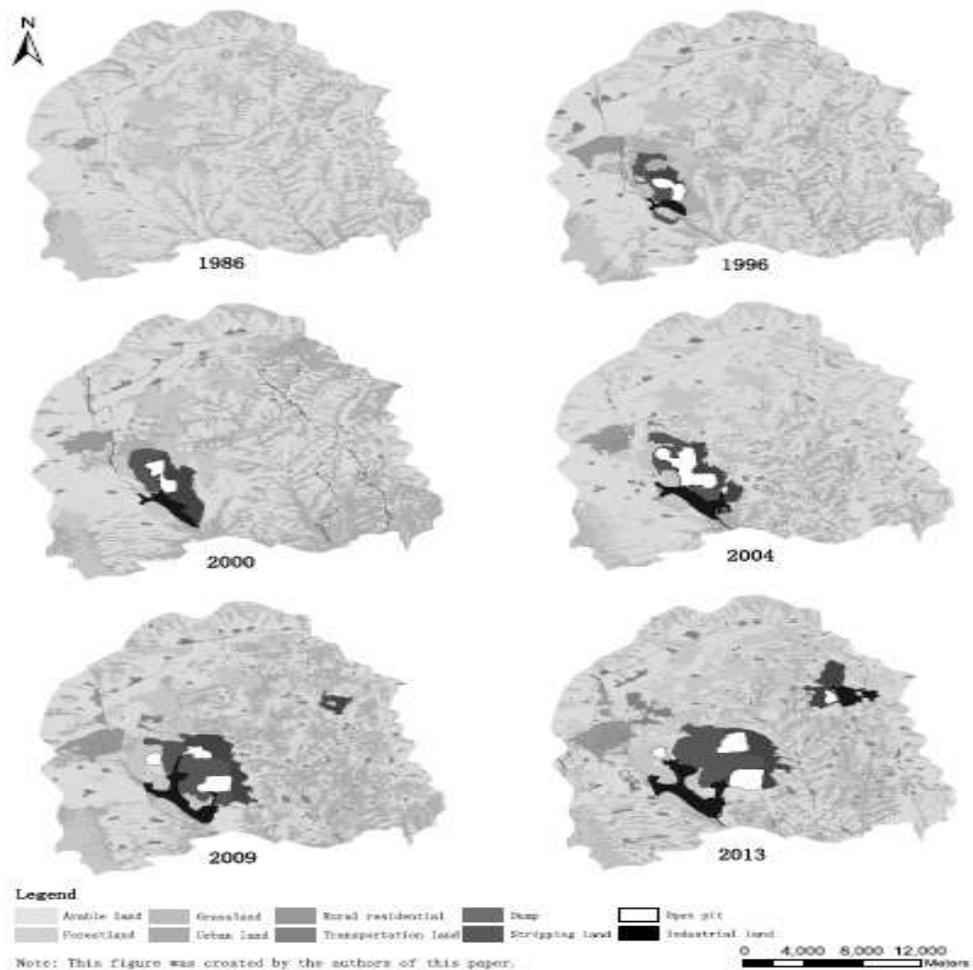


Figura 6. Patrones de cambios de usos de suelo en la Ciudad minera de Shuozhou, Distrito de Pinglu, Provincia de Shanxi, China..
Fuente. Urban Expansion Process, Pattern, and Land Use Response in an Urban Mining Composited Zone from 1986 to 2013.

2.4 Teledetección

El progreso en las tecnologías de información geográfica ha abierto grandes oportunidades para el análisis y comprensión de los rápidos procesos de urbanización, en este sentido, las técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica permiten monitorear los distintos cambios que sufre el territorio. Es por esto que es importante para este estudio entender algunos conceptos básicos de Teledetección.

La Teledetección o Percepción Remota es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre, esto, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador. Es realizada a través de sensores ubicados en plataformas generalmente móviles (satélites, aviones, globos, etc.), los que registran radiación electromagnética (en distintas longitudes de onda) reflejada o emitida (Chuvieco, 2010).

En las últimas décadas ha crecido la disponibilidad de datos que vienen de diversos sensores, cada vez más modernos y sofisticados; y de distintas misiones espaciales, lo que hace que aumenten las diversas aplicaciones que mantienen operativa esta técnica. Por lo tanto, es posible afirmar que la teledetección es una técnica aplicada que depende del desarrollo tecnológico que existe en cada contexto (Chuvieco, 2010).

Por lo general, la teledetección es la medición de la energía que se emanó de la superficie de la Tierra. Si la fuente de la energía medida es el sol, entonces se llama la teledetección pasiva, y el resultado de esta medición puede ser una imagen digital (Richards y Jia, 2006). Si la energía medida no es emitida por el Sol, pero desde la plataforma de sensor, entonces se define como la teledetección activa, tales como sensores de radar que funcionan en el rango de microondas (Richards y Jia, 2006).

Según Chuvieco un sistema de teledetección incluye los siguientes elementos: (Chuvieco, 1996) (ver figura 7)

1- Fuente de Energía: Es originado de la radiación electromagnética que el sensor va a captar. Puede tratarse de una fuente pasiva como la luz solar o activa cuando es emitida por el sensor que luego capta el reflejo (como el radar).

2- Cubierta terrestre: Son los rasgos naturales o realizados por el hombre (vegetación, suelo, rocas, construcción, etc.) que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía (1) y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

3- Sistema sensor: Compuesto por el sensor (cámaras, radar, etc.) y la plataforma que lo alberga (satélite, avión, globo). Tiene la misión de captar la energía proveniente de la cubierta terrestre y almacenarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

4- Sistema de recepción-comercialización: Es el que recibe la información del sistema sensor, la guarda en formato apropiado y la distribuye a los usuarios.

5- Interprete: quien convierte los datos en información temática de interés (agricultura, forestal, geografía, catastro, medio ambiente, militar, etc.) ya sea mediante procedimientos y técnicas visuales o digitales.

6- Usuario final: Es el beneficiario del documento fruto de la interpretación, así como de decidir sobre las consecuencias que de él deriven.

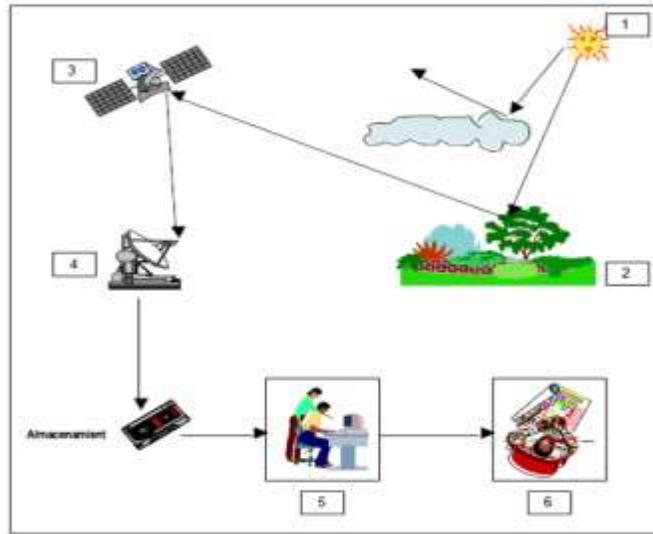


Figura 7. Elementos de la Teledetección.
Fuente. Departamento de La Guajira, 2007.

2.4.1 Espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia (ver figura 8). Este tipo de radiación se ordena de acuerdo a una longitud de onda o frecuencia. Comprende desde la longitud más corta (rayos gamma. Rayos X), hasta las kilométricas (tele-comunicaciones). Las unidades de medidas más comunes se relacionan con las longitudes de onda, donde las más cortas se utilizan micrómetros y las más largas centímetros o metros (Chuvieco, 2010).

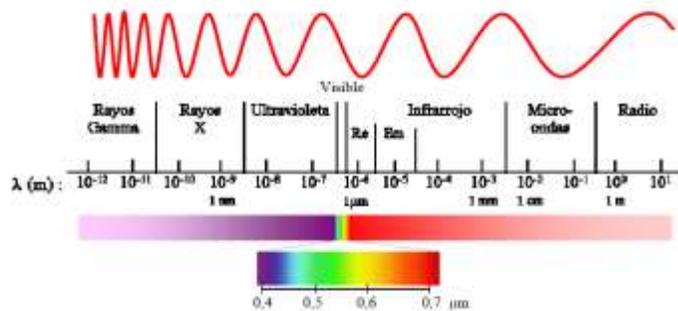


Figura 8. Diagrama del espectro electromagnético.
Fuente, GEP, 2009.

Según Chuvieco (2010), desde el punto de vista de la teledetección existen “Bandas espectrales” que son frecuentemente empleadas en las tecnologías actuales y la terminología y valores más usados son;

- Espectro visible (0,4 a 0,4 μm): Única radiación electro-magnética que pueden percibir el ojo humano. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul, verde y rojo.
- Infrarrojo cercano (IRC: 0,7 a 1,3 μm): Se denomina también infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1,3 a 8 μm): En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. La primera banda, se denomina infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1,3 y 2,5 μm y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda banda se sitúa en torno a los 3,7 μm , se conoce como infrarrojo medio (IRM) y es determinante para la detección de focos de alta altura (incendios y volcanes activos).
- Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μm): incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor que proviene mayormente de las cubiertas terrestres.
- Micro-ondas (M, por encima de 1 mm): Tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

2.4.1.1 Sensores remotos

La Teledetección requiere para su funcionamiento al menos tres componentes; foco energético, superficie terrestre y sensores remotos (Chuvieco, 2010). Estos últimos pueden ser definidos como dispositivos que tienen la capacidad de captar las relaciones espectrales y espaciales de objetos y materiales observables a una distancia considerable. Estos aparatos, además pueden detectar varios tipos de energía, como, por ejemplo, la radiación electromagnética, la gravedad, el magnetismo, la geofísica y las ondas de radio; siendo la fuente de energía más común la energía proveniente del espectro electromagnético. Llevan a cabo esta adquisición de energía mediante emisión y reflexión de esta radiación debido a los atributos de la superficie de la tierra (Castillo, 2016).

Los sensores remotos pueden clasificarse según de donde provenga su energía, es por esto que comúnmente hablamos de dos tipos; pasivos, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, como, por ejemplo; Landsat Thematic Mapper (MSS, TM), SPOT, etc. Sensores activos; cuando son capaces de emitir su propio haz de energía, como, por ejemplo; los radares, radiómetros de microondas, cámaras fotográficas cuando utilizan como fuente de radiación el flash.

2.4.1.2 Resolución de un Sistema Sensor

Los sensores remotos, poseen una serie de características que los distinguen según la calidad, precisión, o temporalidad, por ello, que es importante de entender los tipos de sensores conocer los tipos de resoluciones:

Resolución espacial: Capacidad de discriminar el objeto más pequeño en una imagen que puede ser detectado, lo que equivale al pixel, el tamaño de este varía según el sensor e indica el nivel de detalle en una imagen.

Resolución espectral: Capacidad de discriminar rangos del espectro electromagnético (número y ancho de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor).

Resolución radiométrica: Capacidad de detectar cambios en la energía espectral recibida. La sensibilidad se expresa en bits e indica el número de los distintos niveles radiométricos que puede detectar un sensor.

Resolución temporal: Frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. Tiempo que toma el sensor en capturar información de un mismo sitio. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma, su velocidad, el ancho de barrido del sensor y las características de construcción del sistema.

2.4.2 Programa LANDSAT

El primer satélite de esta serie fue lanzado el 23 de julio de 1972, con el nombre de ERTS (Earth Resource Technology Satellite) (luego fue llamado Landsat 1). Gracias al éxito del primer satélite en 1975 hubo un segundo lanzamiento (Landsat 2) a partir de ese momento se ha convertido en uno de los proyectos de teledetección espacial más importantes.

Hoy en día el archivo histórico LANDSAT proporciona información de extraordinaria calidad, que puede ser muy útil para analizar cambios producidos en las tres últimas décadas en la mayor parte de la superficie terrestre. (Chuvienco, 2010). Las imágenes de estos satélites pueden ser adquiridas de diversas plataformas gratuitas, como: US. Geological Survey <http://earthexplorer.usgs.gov/> (Estados Unidos).

2.4.2.1 Instrumentos de observación de los satélites Landsat

En lo que a equipamiento se refiere el programa Landsat puede ser estructurado en 3 generaciones. Una primera fase constituida por los Landsat 1, 2 y 3 cuyo equipamiento estaba formado por un explorador de barrido multispectral MSS (Multispectral Scanner) y un conjunto de tres cámaras Vidicon RBV (Return Beam Vidicon). Los satélites de la segunda generación Landsat 4 y 5 mantienen el sensor MSS para garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras RBV e incorporan un nuevo sensor denominado TM (Thematic Mapper) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica. Con el lanzamiento del Landsat 7 (ya que el 6 no llegó a funcionar) se entra en una versión mejorada de la segunda generación con la incorporación de una versión actualizada del TM denominado ETM (Enhanced Thematic Mapper).

La tabla 2 siguiente resume la información más relevante de cada uno de los satélites que conforma la serie Landsat.

Satélite	Lanzamiento y fin de servicio	Altitud (km)	Ciclo (días)	Período (Minutos)	Sensor	Banda: Intervalo Espectral	
Landsat 1	23-07-1972	917	18	103	RBV	(1) 0.48 - 0.57	
	06-01-1978					(2) 0.58 - 0.68	
						(3) 0.70 - 0.83	
						MSS	(4) 0.5 - 0.6
					(5) 0.6 - 0.7		
					(6) 0.7 - 0.8		
					(7) 0.8 - 1.1		
Landsat 2	22-01-1975	917	18	103	Idéntico al Landsat 1		
	25-05-1982						
Landsat 3	05-03-1978	917	18	103	RBV	(1) 0.5 - 0.75	
	31-03-1983				MSS	(4) 0.5 - 0.6	
						(5) 0.6 - 0.7	
						(6) 0.7 - 0.8	
						(7) 0.8 - 1.1	
						(8) 10.4 - 12.6	
Landsat 4	16-07-1982	705	16	98,9	MSS	(4) 0.5 - 0.6	
	1983					(5) 0.6 - 0.7	
						(6) 0.7 - 0.8	
						(7) 0.8 - 1.1	
					TM	(1) 0.45 - 0.52	
						(2) 0.52 - 0.60	
						(3) 0.63 - 0.69	
						(4) 0.76 - 0.9	
						(5) 1.55 - 1.75	
						(6) 10.4 - 12.5	
	(7) 2.08 - 2.35						
Landsat 5	01-03-1984	Idéntico al Landsat 4					
	05-07-2013						
Landsat 6	05-10-1993	705	16	98,9	Fallos en el sistema		
	05-10-1998						
Landsat 7	15-04-1999	705	16	98,9	ETM +	(1) 0.45 - 0.52	
						(2) 0.53 - 0.61	
						(3) 0.63 - 0.69	
						(4) 0.78 - 0.9	
						(5) 1.55 - 1.74	
						(6) 10.4 - 12.5	
						(7) 2.09 - 2.35	
						(PAN) 0.5 - 0.9	

Landsat 8	11-02-2013	705	16	98,9	OLI	(1) 0.43 - 0.45
						(2) 0.45 - 0.51
						(3) 0.53 - 0.59
						(4) 0.64 - 0.67
						(5) 0.85 - 0.88
						(6) 1.57 - 1.55
						(7) 2.11 - 2.29
						(8) 0.50 - 0.68
						(9) 1.36 - 1.38
					TIRS	(10) 10.60 - 11.19
						(11) 11.50 - 12.51

Tabla 2. Datos de satélites LANDSAT.

Fuente: INEGI México (2016) (LANDSAT 1-7) US. GEOLOGICAL SURVEY (2016) (LANDSAT 8).

2.4.3 Procesamiento de las imágenes de satélite

Tras analizar los principales conceptos de teledetección abarcados en este estudio, queda por analizar el procesamiento digital de las imágenes de satélites, etapa que se divide en dos fases; fase de entrenamiento y la fase de asignación.

2.4.3.1 Fase de entrenamiento

Para trabajar las imágenes satelitales debe existir una experiencia previa, que permita abordar la fase posterior de clasificación. Dichos elementos pueden ser tono, textura, situación o tamaño (Chuvieco, 2010). De esta manera, se procede a la clasificación digital, en donde el método que seleccionado para el presente estudio se le conoce como “método supervisado”.

2.4.3.2 Método supervisado

El método supervisado parte de una experiencia previa con el área de estudio, ya sea por experiencia previa o trabajo de campo. El conocimiento previo del intérprete se utiliza para orientar en la búsqueda de grupos espectrales homogéneos, es decir, permite al intérprete delimitar sobre la imagen áreas representativas o categorías. Estas categorías se denominan “*training fields*” o “áreas de entrenamiento”. El termino hace referencia a que estas áreas sirven para “entrenar” al programa de clasificación en el reconocimiento de las distintas categorías y así asignar más tarde al resto de los píxeles de la imagen a una de las categorías en función de la similitud de sus ND (niveles digitales) con los extraídos como referencia (Chuvieco, 2010).

El conocimiento previo del intérprete le permite escoger muestras que sean representativas y apropiadas para cada una de las categorías. Primeramente, se identifican sobre la imagen las categorías seleccionadas (“áreas de entrenamiento”), y luego el método delimitará a esa categoría seleccionada el resto de los píxeles de la imagen según la similitud de sus ND con los extraídos de referencia. Al terminar esta etapa, se calculará las estadísticas elementales de cada categoría, a partir de los niveles digitales de todos los píxeles,

incluidos la “área de entrenamiento” de esa misma clase, teniendo en cuenta, la totalidad de las bandas que intervendrán en la clasificación (Chuvieco, 2010).

2.4.3.3 Estadísticas de entrenamiento

Independientemente del método que se emplee para definir las “áreas de entrenamiento”, conviene evaluar la viabilidad que las categorías seleccionadas puedan clasificarse sin un grave riesgo de error (Chuvieco, 2010), para ello existen variados métodos que “analizan a las áreas de entrenamiento”, los cuales existen métodos gráficos y numéricos. Entre los de tipo gráficos se encuentran los diagramas de firmas o firmas espectrales, gráficos de solape espectral y los histogramas de frecuencia; mientras que en aquellos de tipo numéricos se encuentra la distancia normalizada y la divergencia estadística (Chuvieco, 2010).

Posterior a esta etapa inicial, se procede a trabajar las áreas de entrenamiento mediante la siguiente fase denominada “fase de asignación”.

2.4.3.4 Fase de Asignación

La fase de asignación es la etapa donde se procesan las “áreas de entrenamiento”. En ella se asignan cada uno de los píxeles de la imagen a una categoría seleccionada en el método previo. Esta asignación se lleva a cabo en función de los ND de cada píxel, para cada una de las bandas del proceso, lo que resulta en una nueva imagen, donde los ND expresen cada categoría o clase temática que anteriormente fue seleccionada y que cada píxel fue adscrito de la imagen original (Chuvieco, 2010).

Esta etapa se lleva a cabo bajo métodos estadísticos. En este estudio la fase de asignación se hará bajo el método de máxima probabilidad.

2.4.3.5 Clasificador de máxima probabilidad

Este método según Chuvieco (2010, pág, 397) considera que los “*ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esta categoría por una función de probabilidad a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza*”. Es decir, la función se asemeja la distribución real de los ND en esa categoría, por lo que nos sirve para calcular la probabilidad que un píxel (con determinado ND) sea miembro de ella, este cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el píxel aquella que maximice la función de probabilidad. El clasificador de máxima probabilidad es complejo y demanda un alto volumen de cálculo, sin embargo, es el más empleado en teledetección, debido a su robustez y por ajustarse con mayor rigor a la disposición original de los datos.

CAPÍTULO 4: MARCO METODOLÓGICO

3.1.1 Enfoque de investigación

El presente estudio se basa en las tradiciones mixtas, es decir, utiliza procedimientos de recolección y análisis de datos cualitativos y cuantitativos (Pole, 2009). Cada objetivo del estudio determinará qué tipo de dato debe ser recolectado y posteriormente analizado.

Para lograr el primer objetivo, primeramente, se realizó una clasificación supervisada y posterior validación para el área de estudio entre los años 1986 y 2016, esto se hizo a través de un análisis de imágenes satelitales mediante fotointerpretación, donde se identificaron, gracias a la clasificación del catastro de bosque nativo de la CONAF 2013 en la Región de Valparaíso, 5 usos y coberturas de suelo. Los distintos usos de suelo, fueron validados a través de matrices de confusión y del índice estadístico de KAPPA. Luego del tratamiento metodológico, se analizaron los cambios en los usos y coberturas de suelo entre los años 1986 y 2016.

Respecto a este objetivo, según el procesamiento de los datos, la metodología aplicada corresponde a las tradiciones de tipo mixtas, ya que, en primer lugar, se identificaron los usos de suelo mediante fotointerpretación (atributos cualitativos), para luego determinar su validez en base a procedimientos estadísticos (atributos cuantitativos).

El segundo objetivo, se basa en primer lugar, en la construcción de una matriz de cambio de usos de suelo, entre los años 1986 y 2016. Para ello, se construyó una matriz cruzada de cambio, es decir, se comparó la evolución de cada uso de suelo con el resto, para determinar así la ganancia o pérdida de superficie urbana frente a otros usos de suelo. Posteriormente, realizar un balance de ganancias y pérdidas de superficie de uso de suelo urbano.

El segundo objetivo, debido al tipo de información, y gracias a su procesamiento, se basa en técnicas de tipo cuantitativas ya que se analizan y procesan datos duros que revelan las ganancias y pérdidas de uso de suelo urbano

El tercer objetivo se realizó través de la aplicación de distintos índices e indicadores. En el caso de estimar la relación de la actividad minera y la superficie urbana, se construyó un modelo estadístico de la superficie urbana, a través de los resultados de la clasificación supervisada y luego mediante una ecuación lineal se estableció los años en que la superficie urbana dependió de la actividad minera. Y en el caso de los patrones y dinámicas del uso del suelo urbano se utilizaron tres índices; tasa de cambio de la superficie urbana, baricentro de la tierra urbana y compacidad urbana, estos se seleccionaron a fin de evaluar las características de la expansión en cantidad, distribución y morfología.

Finalmente, el tercer objetivo se basa en técnicas cuantitativas, ya que se analizan datos duros, como crecimiento o tasa de cambio de la expansión urbana, baricentro urbano y compacidad y se relacionaron con la cantidad de producción minera por año.

3.2 Materiales

3.2.1 Imágenes satelitales

Para el presente estudio se obtuvieron imágenes de satélite de resolución media correspondientes a la familia LANDSAT. Las imágenes fueron obtenidas en el período de la estación de verano debido a la menor probabilidad de nubosidad. Estas fueron adquiridas del servidor estadounidense “Earth Explorer”, <http://earthexplorer.usgs.gov>. Las imágenes seleccionadas fueron:

Satélite	Sensor	Fecha
Landsat 5	TM	03 de enero de 1986
Landsat 5	TM	24 de enero de 1996
Landsat 7	ETM+	11 de enero de 2006
Landsat 8	OLI	03 de marzo de 2016

Tabla 3. Imágenes LANDSAT seleccionadas.
Fuente. Elaboración Propia.

3.3 Pasos Metodológicos

3.3.1 Corrección de Imágenes Satelitales

Las correcciones de imágenes, son procesos que tienen la finalidad de eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización como en la radiometría de sus píxeles constituyentes. Estas operaciones tienden a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea de la imagen (Chuvieco, 2010). En este caso, las correcciones fueron ejecutadas a través de software ENVI 5.0.

3.3.2 Corrección Radiométrica: Esta corrección fue ejecutada a través del software ENVI, específicamente de los módulos Radiometric Calibration

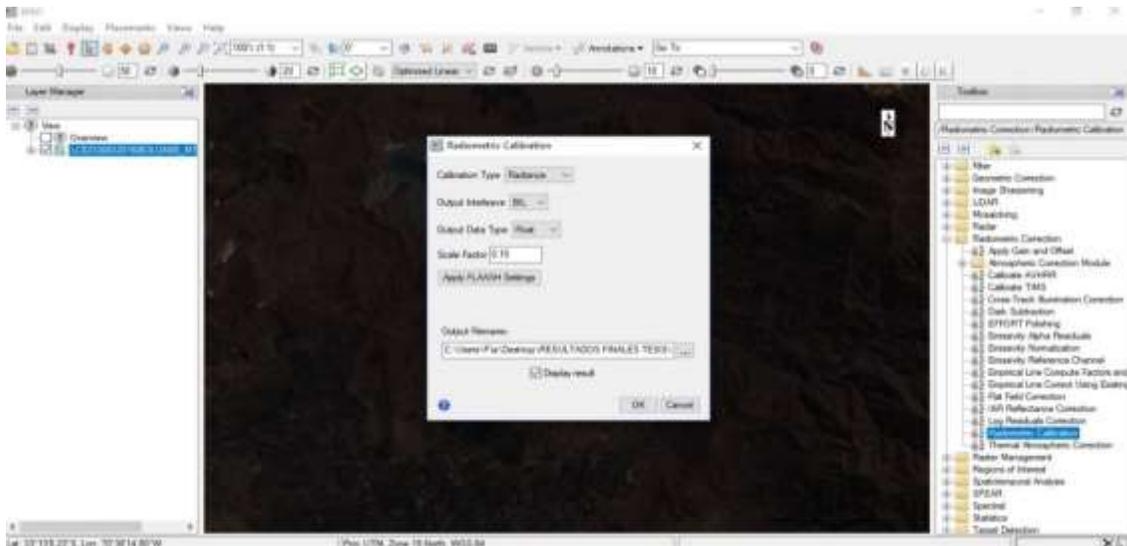


Figura 9. Módulo Radiometric Calibration.
Fuente. ENVI 5.0

3.3.2 Corrección Atmosférica: Esta corrección fue ejecutada a través del software ENVI, específicamente de los módulos FLASSH Atmospheric Correction

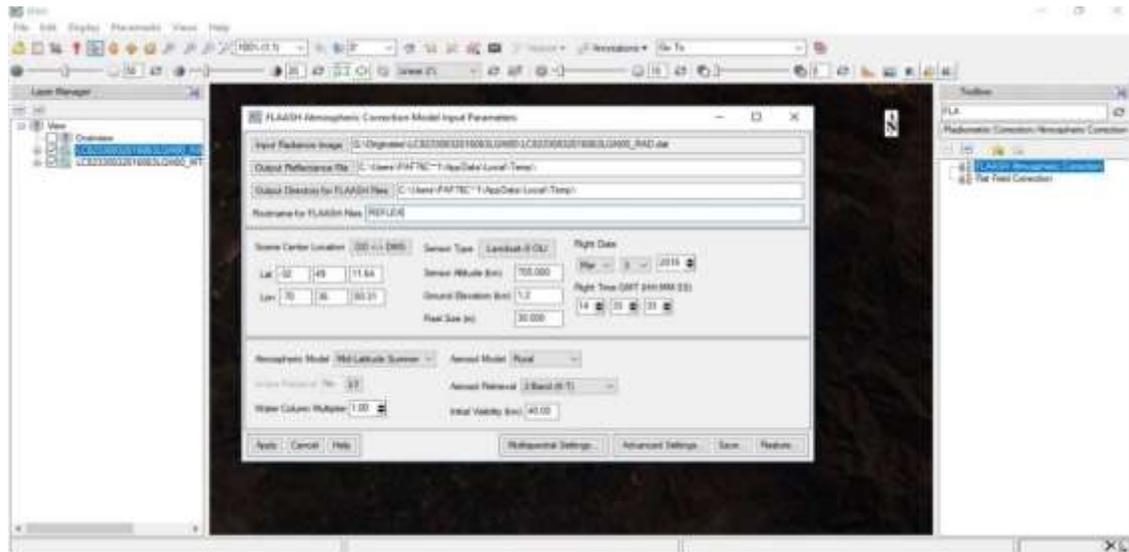


Figura 10. Modulo FLASSH Atmospheric Correction.
Fuente. ENVI 5.0

3.3.3 Composición de Bandas: A fin de realizar la clasificación supervisada, se efectuó previamente una composición de bandas, a través de la herramienta “composite bands” del software ArcGis 10.4. Se identificaron los distintos usos de suelo utilizando la combinación falso color, que trabaja con las bandas del espectro visible e infrarrojo (exceptuando el infrarrojo térmico). En la tabla número 4 se aprecia las distintas combinaciones de bandas de acuerdo al satélite donde proviene la imagen.

Satélite de imagen	Fecha de imagen	Composición de bandas
Landsat 5	03 de enero de 1986	4,3,2
Landsat 5	24 de enero de 1996	4,3,2
Landsat 7	11 de enero de 2006	4,3,2
Landsat 8	03 de marzo de 2016	5,4,3

Tabla 4. Combinación falso color de imágenes LANDSAT de imágenes seleccionadas.
Fuente. Elaboración Propia.

3.3.4 Clasificación usos de suelo

Los distintos usos y coberturas de suelo fueron seleccionados de acuerdo al “Catastro de Bosque Nativo” de la CONAF (2013), obtenido desde el sitio web <http://sit.conaf.cl/>, los cinco usos y coberturas fueron seleccionadas por ser los más representativos del área de estudio. Los usos de suelo seleccionados fueron:

- Suelo urbano (baja y alta densidad)
- Uso de suelo Agrícola

- Cuerpos de Agua
- Cobertura Matorral
- Sin vegetación

3.3.5 Clasificación Supervisada

Los siguientes pasos fueron llevados a cabo a fin de realizar la clasificación supervisada:



Figura 11. Pasos de la Clasificación Supervisada.
Elaboración propia en base a Castillo 2016.

Ahora bien, la clasificación de usos de suelo se llevó a cabo bajo la siguiente secuencia de actividades:

Selección de áreas de entrenamiento: Una vez seleccionados los usos de suelo de acuerdo al área de estudio se procedió a escoger las “área de entrenamiento”, esto se hizo gracias al software Google Earth Pro, donde a través de fotointerpretación se ratificó cada uso de suelo. Luego de escoger y comprobar las áreas de entrenamiento, se confeccionaron los polígonos (aproximadamente de 10 a 40 polígonos por clase) que representaban a cada clase de suelo, a través de la herramienta “Imagen Clasificación” en ARCGIS 10.4 (ver figura 12).

Uso de Suelo	Foto interpretación Google earth	Uso de suelo en Imagen Falso color
Urbano (baja y alta densidad)		
Agrícola		
Cuerpos de Agua		
Matorral		
Sin vegetación		

Figura 12. Áreas de entrenamiento para los 5 usos de suelo
Fuente. Elaboración Propia.

Aplicación del clasificador: Tras el tratamiento de las imágenes, seguida de la elaboración de las “áreas de entrenamiento”, se realizó la clasificación supervisada, en este caso a través de la herramienta “Interactive classification” de ARCGIS 10.4. Este clasificador, es una herramienta que acelera el proceso de clasificación de probabilidad máxima y trabaja en función a las área de entrenamiento.

Aplicación de filtros: Después de clasificar las imágenes se aplicaron los filtros para atenuar el efecto “sal y pimienta” del resultado. Para ello se aplicó la herramienta “Majority

Filter” del software ARCGIS 10.4, donde se reemplazaron las celdas del raster según la mayoría de las celdas vecinas, en este caso se aplicó un filtro mayoritario 8.

Aplicación de Correcciones Espaciales: A fin de eliminar las áreas mal clasificadas, específicamente, las áreas sin vegetación, bordes de río y quebradas (estas áreas usualmente son confundidas con suelos urbanos) se procedió a realizar una serie de correcciones, y así, asignar estas áreas “mal clasificadas” a la clase correspondiente, las correcciones fueron;

- Primeramente se reconoció a través del shapefile de Catastro de Bosque Nativo de la CONAF 2013 y del raster de usos de suelo del Proyecto LANDCOVER 2014, todas las áreas de bordes de ríos y quebradas en el área de estudio.
- Luego se construyó un shapefile para cada año en el que se hizo la clasificación, fotointerpretando áreas que estaban clasificadas como bordes de río o quebradas en el shapefile de catastro de bosque nativo de la CONAF 2013 y el raster de uso de suelo del proyecto LANDCOVER 2014.
- Ya teniendo la construcción final de las áreas de bordes de río y quebradas se procedió a unir las áreas que iban a ser clasificadas nuevamente con el área de estudio, a través de la herramienta “Union” de ARCGIS 2014.
- Inmediatamente, se aplicó la herramienta “Dissolve” y solo se dejaron dos campos, “área de estudio” y “áreas que iban a ser nuevamente clasificadas” (Bordes de río y quebradas), donde se les asignó al área de estudio el valor de “1” y a las áreas de nuevamente clasificadas el valor de “0”.
- Posteriormente, los shapefiles fueron transformados al formato raster a través de la herramienta “Feature to Raster”,
- Luego, a través de la herramienta “Raster Calculator” se multiplicó el Raster transformado (áreas que iban a ser nuevamente clasificadas) con el resultado de la clasificación supervisada.
- Y finalmente al resultado de la calculadora raster se aplicó la herramienta “Reclassify” para reasignar las clases de uso de suelo correspondiente.

3.3.6 Verificación de los resultados

La validación de los resultados de la clasificación supervisada, se hizo a través de la “matriz de ensayo y error”, que permite conocer la fiabilidad general de la clasificación, así también como los conflictos que se presentan entre las diferentes categorías previamente establecidas. La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación, donde se produce el acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), y los datos marginales suponen errores de asignación. Los residuales que se encuentran en las columnas indican tipos de usos de suelo real que no estaban incluidos en el mapa, mientras que los residuales en las filas implican usos de suelo del mapa que no se ajustan a la realidad. Lo que quiere indicar que representan a los errores conocidos como de “omisión” y de “comisión” respectivamente (Chuvieco, 2010; citado en Castillo, 2016).

La matriz de confusión ofrece a su vez, una serie de medidas estadísticas que permiten validar el resultado de la clasificación de imágenes de satélite. Entre éstas, se encuentran:

- **Fiabilidad global:** relaciona los elementos de la diagonal (número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre la realidad y el mapa), con el total de puntos muestreados (Chuvieco, 2010). Se mide en %, por cuanto mayor éste sea, mayor será la fiabilidad global de la clasificación.
- **Fiabilidad del usuario y fiabilidad del productor:** analiza los errores de omisión (columnas) y de comisión (filas), vale decir, relaciona los valores de los píxeles marginales de la matriz (Chuvieco, 2010). Se mide en %, siendo los valores más altos, (cercaos al 100%) los que revelen una buena fiabilidad.
- **Estadístico de Kappa:** delimita el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios. En otras palabras, esta medida da a conocer si el grado observado se aleja o no significativamente del esperado al azar. Se mide entre el rango 0-1; valores cercano a 1 indican acuerdo entre la realidad y el mapa, mientras que valores cercanos a 0 sugiere que el acuerdo observado es al azar (Chuvieco, 2010), ver tabla 5.

Valor de índice de Kappa	Fuerza de la Concordancia
< 0,20	Pobre
0,21 – 0,40	Débil
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Buena
0,81 – 1,00	Muy Buena Fuente

Tabla 5. Valores índices de KAPPA.
Fuente. Sarricolea 2008.

A fin de comprobar los resultados de la clasificación supervisada se realizó una matriz de confusión, y los pasos para llevarla acabo, fueron;

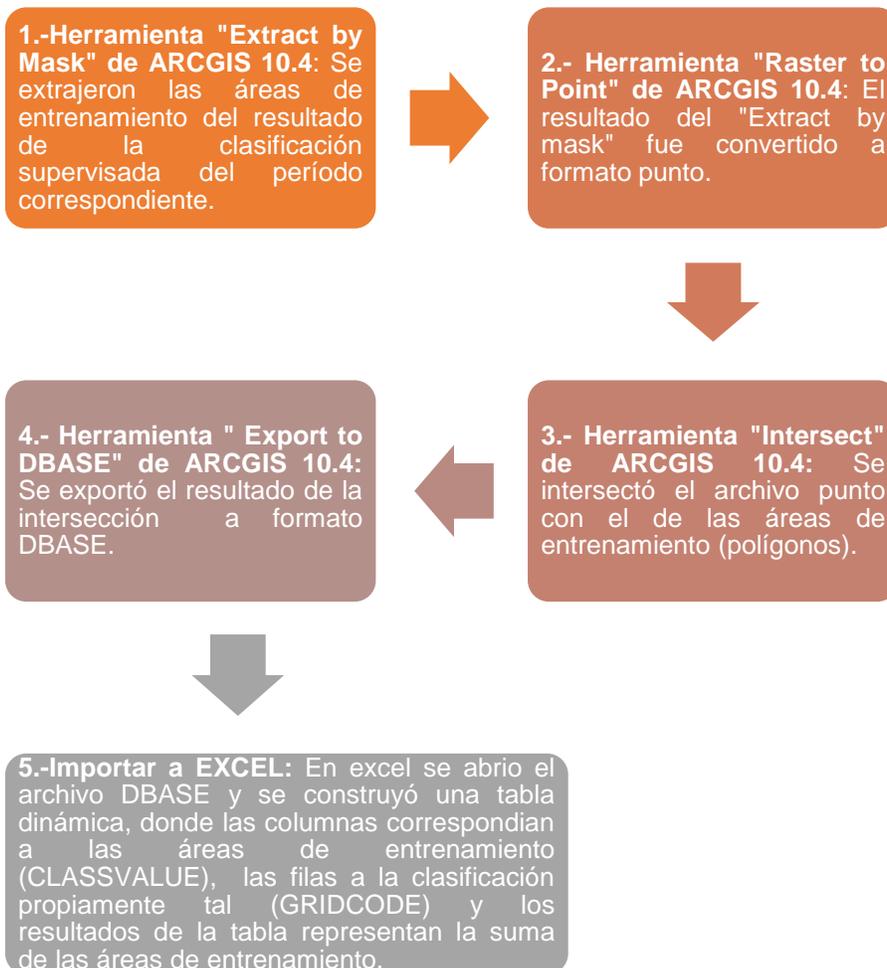


Figura 13. Pasos para elaboración de la matriz de confusión
Fuente. Castillo, 2016.

Luego de realizar la tabla dinámica se construyó la matriz de confusión en el software online "Confusion matrix online calculator" (ver figura 14).

Confusion matrix online calculator

Number of classes: 5

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Classification overall	Accuracy
Class 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>					
Class 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>					
Class 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>					
Class 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>					
Class 5	<input type="text"/>	<input type="text"/>					
Truth overall	<input type="text"/>	<input type="text"/>					
Overall	<input type="text"/>	<input type="text"/>					

Overall accuracy (OA):

Kappa's:

Calculate confusion matrix

Figura 14. Matriz de confusión online
Fuente: <http://www.marcovanetti.com/pages/cfmatrix/?noc=5>

3. 4 Análisis de la expansión urbana

A fin de entender los tipos de expansión urbana y morfología de las comunas de Los Andes, Calle Larga, Rinconada y San Esteban se aplicaron tres índices, los cuales son;

3.4.1 Tasa de cambio de la superficie urbana

La Tasa de cambio de uso de suelo permite determinar cuanta superficie aumenta o disminuye en los distintos períodos de tiempo, esta dada por la superficie al inicio de un período y la superficie al final del mismo período, luego se divide por la cantidad de años del período.

3.4.2 Baricentro del suelo urbano

El baricentro del suelo urbano en cada período puede utilizarse para analizar cambios espaciales de las ciudades, y su representación común es latitud y longitud (Wang y Bao, 1999). La dirección de la expansión puede describirse por cambios en la ubicación del baricentro en períodos de estudio. Las coordenadas geográficas de los baricentros están definidas por Eq;

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times X_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ti}}; Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ti}}$$

donde X_t e Y_t = coordenadas de gravedad de la tierra urbana en el momento punto de t ;

X_i y Y_i = coordenadas del centro de la tierra urbana en el punto de tiempo de i ;

C_{ti} = área del parche del suelo urbano de i ;

n = números de parche de suelo urbano.

3.4.3 Compactación urbana

El índice de compacidad urbana permite medir el cambio morfológico espacial del área urbanizada. Si la forma del área urbanizada está cerca de ser circular, el valor será lo más cercano a 1, lo que significa que el espacio urbano es más compacto. Por el contrario, si el índice de compacidad está lejos de ser 1, el espacio urbano es menos compacto. Está definido por la Eq;

$$C = 2 \sqrt{A\pi/P}$$

Donde; C = compacidad urbana;

A = área total de tierra urbana; y

P = perímetro del límite de la tierra urbana.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Análisis de cambios de usos de suelo entre los años 1986 y 2016

A fin de obtener los resultados para generar el análisis de cambio de uso de suelo se realizó una la clasificación supervisada para el área de estudio en cuatro períodos de tiempo y los resultados fueron:

4.1 Descripción de los usos de suelo año 1986

Respecto a la verificación de los resultados de la clasificación supervisada, se llevó a cabo a través de una matriz de confusión, que arrojó una precisión de 96,037%, consistente con un valor de 0,946 del índice estadístico de Kappa (para mayor información de la matriz de confusión ver anexo 4).

La clasificación supervisada para el año 1986 arrojó los siguientes resultados; el uso de suelo predominante en el área de estudio fue el uso de los suelo agrícola, este abarcó el 80% de la superficie en el área de estudio, en segundo lugar se encontró la cobertura categorizada como matorral que abarcó el 14% del área de estudio, seguido por el uso de suelo urbano y sin vegetación que abarcaron cada uno un 3% del área de estudio y finalmente, la cobertura y uso de suelo cuerpos de agua que abarcó el 0,1% de la superficie total del área de estudio (ver figura 15 y anexo 3).

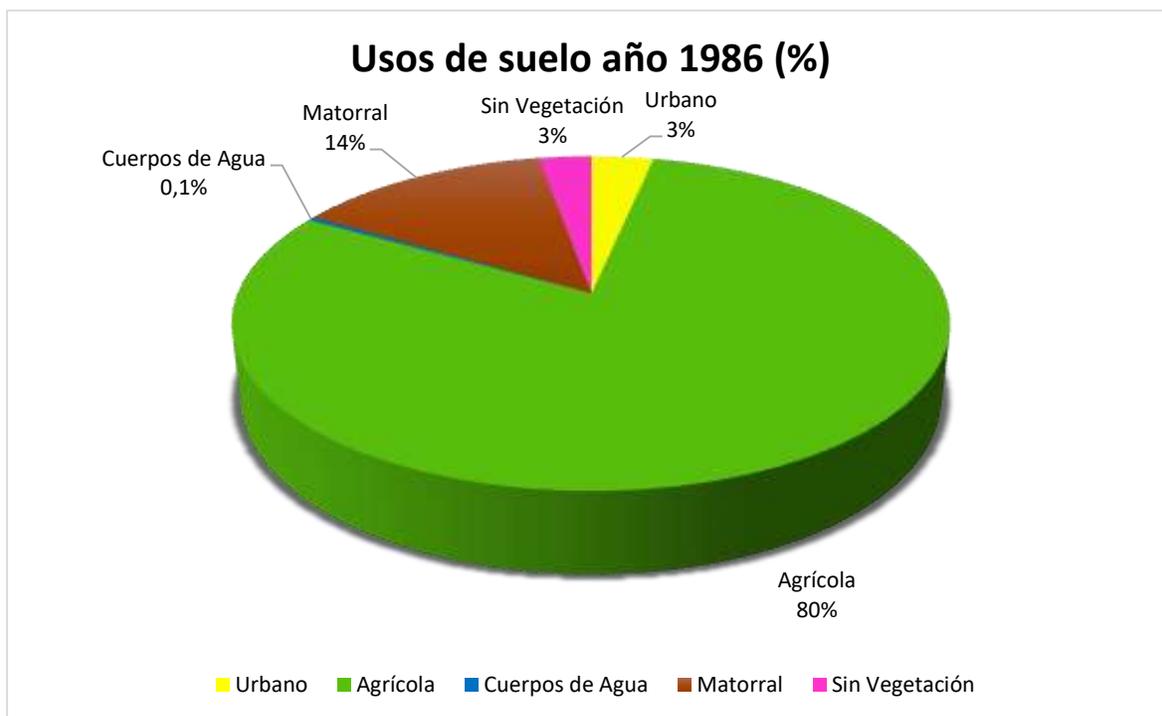


Figura 15. Distribución (%) de usos y coberturas de suelo año 1986.
Fuente. Elaboración Propia.

Respecto a la distribución del espacio, para el año 1986 se evidencia que la superficie agrícola es la que tiene mayor preponderancia en el área de estudio, especialmente en las comunas de San Esteban, Calle Larga y Rinconada, donde la mayor parte del uso de suelo es agrícola. El núcleo urbano más desarrollado de la provincia se observa en la comuna de Los Andes, sin embargo, al igual que las otras comunas, el uso de suelo Agrícola es preponderante. La superficie de suelo asociada a la cobertura matorral se concentra, específicamente, en pequeños cerros, emplazados en medio del área de estudio, en las laderas de estos o en áreas no intervenidas por la agricultura. Los suelos sin vegetación están asociados principalmente a las áreas de bordes de ríos y quebradas y los cuerpos de agua se observan en su mayoría, en medio de superficies agrícolas (tranques de regadío), o en quebradas y ríos, como el Río Aconcagua, que transcurre en el sector norte de la comuna de Los Andes (ver figura 16).

4.1.2 Descripción de usos de suelo año 1996

Respecto a la verificación de los resultados de la clasificación supervisada se llevó a cabo a través de una matriz de confusión, que arrojó una precisión de 89,413%, consistente con un valor de 0,857 del índice estadístico de Kappa (para mayor información de la matriz de confusión ver anexo 5).

La clasificación supervisada para el año 1996 arrojó los siguientes resultados; el uso de suelo predominante en el área de estudio fue el uso de suelo agrícola, que abarcó el 82% de la superficie total, aumentando dos puntos porcentuales respecto a los resultados del año 1986, lo que equivale a un aumento de 396 hectáreas (ver anexo 3), seguido por la cobertura matorral, que abarcó el 9% de la superficie del área de estudio, disminuyendo en 5 puntos porcentuales respecto al año 1986, lo que equivale a una disminución de 816 hectáreas. Sigue en tercer lugar, la superficie de suelo urbano que abarcó el 5% de la superficie del área de estudio, aumentando en dos puntos porcentuales respecto al año 1986, lo que equivale a un aumento de 337 hectáreas. En un cuarto lugar, sigue los suelos sin vegetación que abarcaron el 4% de la superficie del área de estudio, aumentando en un punto porcentual respecto al año 1986, lo que equivale a un aumento de 104 hectáreas. Por último, la cobertura y uso de suelo cuerpos de agua que abarcó el 0,1% de la superficie del área de estudio al igual que el año 1986 (ver figura 17).

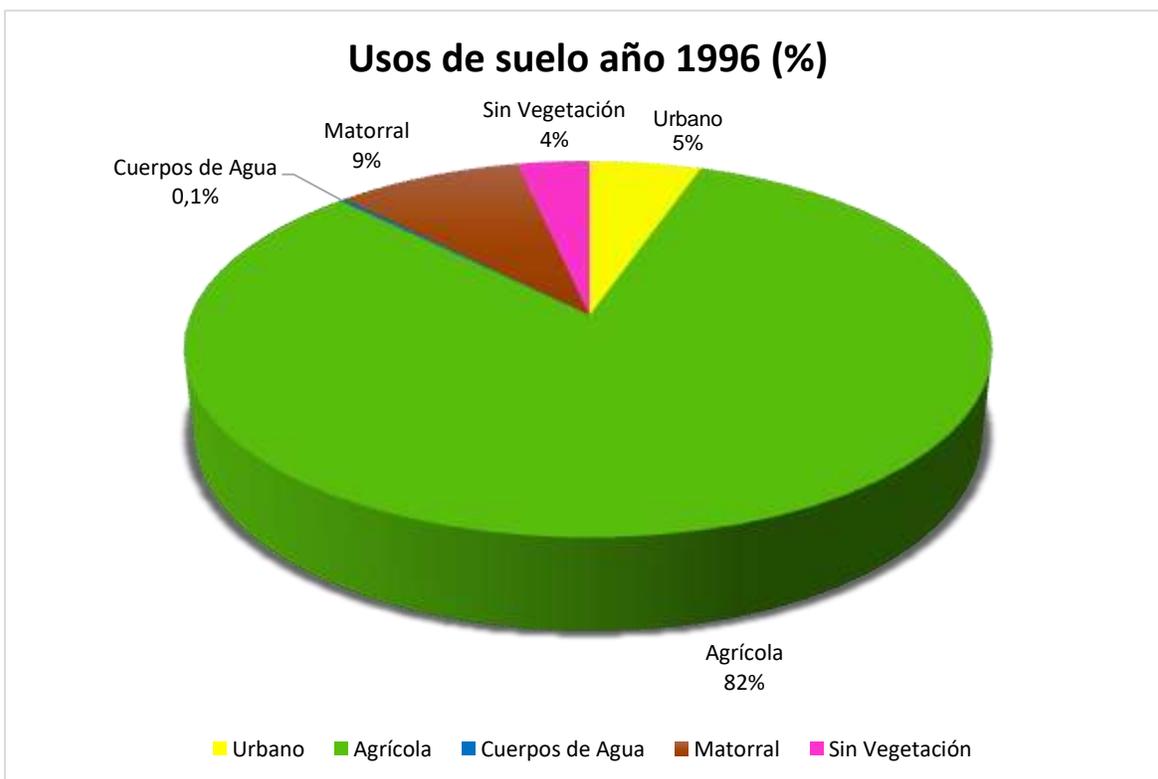


Figura 17. Distribución (%) de usos y coberturas de suelo año 1996.
Fuente. Elaboración propia.

Respecto a la distribución del espacio para el año 1996, la superficie de uso de suelo agrícola al igual que en el año 1986, es la que tiene mayor preponderancia, especialmente en las comunas de San Esteban, Calle Larga y Rinconada, el uso de suelo agrícola se ha expandido respecto al año 1986 sobre los distintos usos de suelo, pero especialmente, sobre suelos categorizados como matorrales, esta cobertura disminuyó su superficie en alrededor de 817 hectáreas, respecto al año 1986. El uso de suelo urbano a partir del año 1996 comenzó a desarrollarse en pequeños núcleos, en las comunas de Rinconada, Calle Larga y San Esteban y estos pequeños núcleos urbanos se localizaron en una gran área (como es el caso de la comuna de Rinconada y Calle Larga) o en dos áreas (como es el caso de la comuna de San Esteban). La superficie de suelo urbano más desarrollada se localizó en la comuna de Los Andes y al igual que en el año 1986, se expandió alrededor del núcleo urbano más compacto, específicamente hacia oeste y sur de la comuna. Los suelos sin vegetación continuaron asociados a las áreas de bordes de ríos y quebradas y los cuerpos de agua se observan en tranques en medio de superficies agrícolas o en el Río Aconcagua, situación muy similar a la ocurrida en el año 1986 (Ver figura 18).

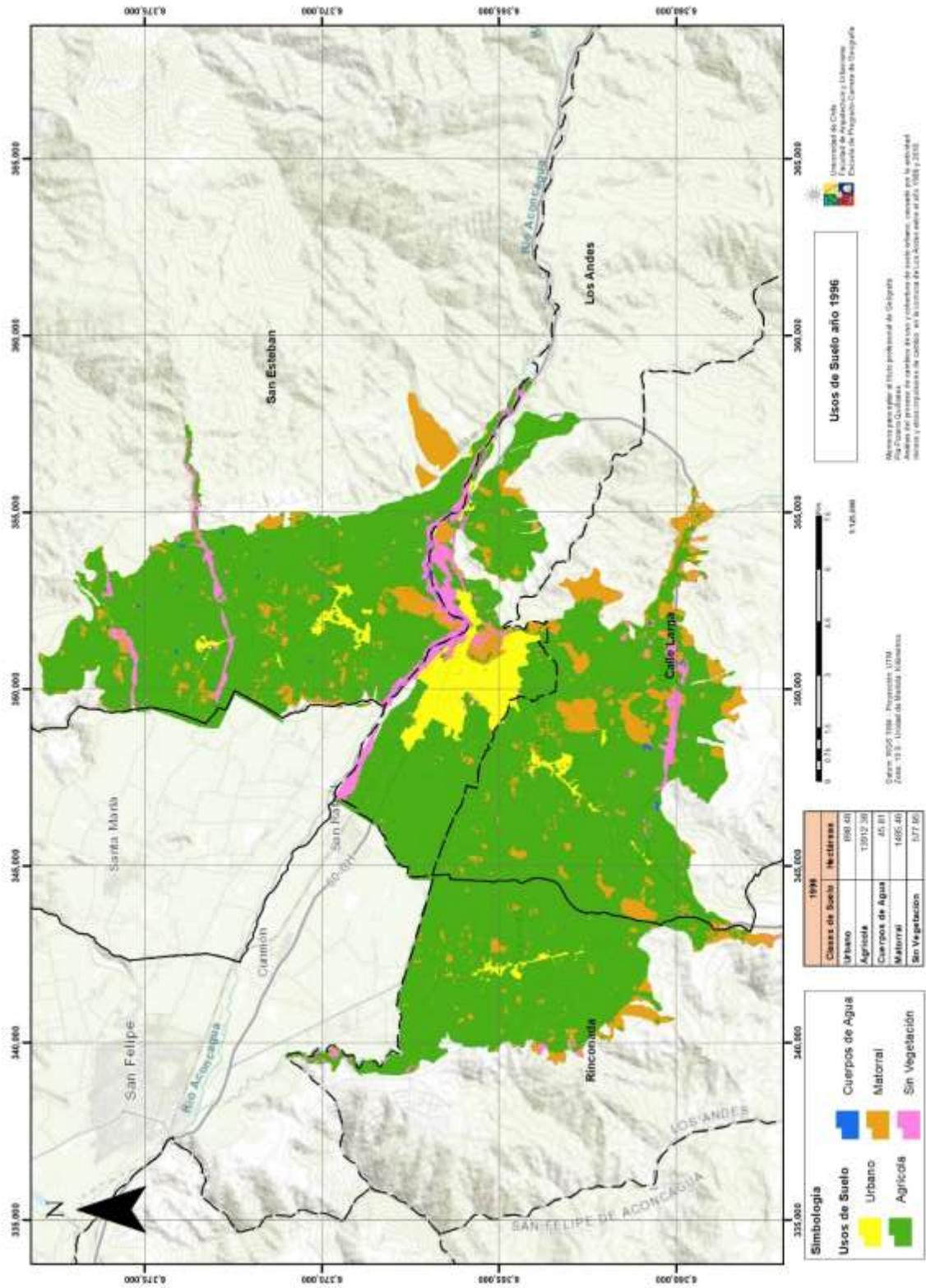


Figura 18. Usos de suelo en el área de estudio año 1996.
 Fuente. Elaboración propia.

4.1.3 Descripción de usos de suelo año 2006

Respecto a la verificación de los resultados de la clasificación supervisada se llevó a cabo a través de una matriz de confusión, que arrojó una precisión de 89.338%, consistente con un valor de 0,893 del índice estadístico de Kappa (para mayor información de la matriz de confusión ver anexo 6).

Los resultados de la clasificación supervisada para el año 2006 muestran que los suelos predominantes en el área de estudio al igual que los años anteriores fueron los suelos agrícolas que abarcaron el 78% de la superficie total del área de estudio, disminuyendo en 2 puntos porcentuales respecto al año 1996 y en un punto respecto al año 1986, lo que equivale a 647 hectáreas, en un segundo lugar, se encuentra el uso de suelo urbano, que abarcó el 10% del área de estudio, aumentando en 5 puntos porcentuales respecto al año 1996 (equivalente a 763 hectáreas) y siete puntos respecto al año 1986. En tercer lugar, se encuentra la superficie matorral, que abarcó el 7% del área de estudio, disminuyendo en dos puntos porcentuales respecto al año 1996 (equivalente a 290 hectáreas) y siete puntos desde el año 1986. En cuarto lugar, se encuentra los suelos sin vegetación que ocuparon el 4% del área de estudio, aumentando en un punto porcentual respecto a los años 1996 (equivalente a 47 hectáreas) y 1986. Finalmente, la cobertura y uso de suelo cuerpos de agua que abarcó el 1% de la superficie del área de estudio, aumentando en un punto porcentual respecto a los años anteriores, lo que equivale a 126 hectáreas (ver figura 19).

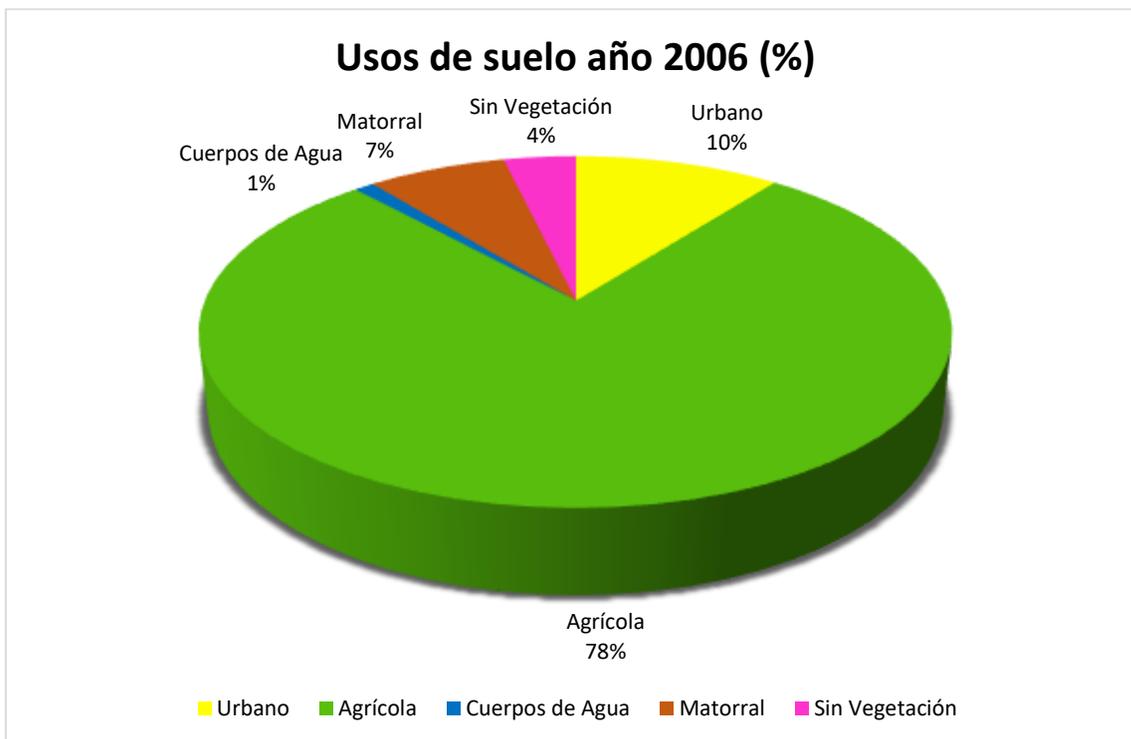


Figura 19. Distribución (%) de usos y coberturas año 2006.
Fuente. Elaboración propia.

Respecto a la distribución del espacio, la superficie de uso de suelo agrícola al igual que los años anteriores es la que tiene mayor preponderancia, especialmente en las comunas de San Esteban, Calle Larga y Rinconada, sin embargo, los núcleos urbanos de estas tres comunas se han desarrollado al punto de fragmentarse en varias áreas, estas áreas urbanas están ligadas principalmente a condominios, que buscan desarrollarse en zonas más alejadas del centro histórico de las comunas y muchas veces en medio de superficies agrícolas. En la comuna de los Andes se observa el aumento del suelo urbano, especialmente hacia oeste y sur de la comuna, llegando al límite con la comuna de Calle Larga. La cobertura matorral sigue concentrándose en cerros y en las laderas de estos, sin embargo, ha disminuido respecto a los años anteriores, siendo ocupada, específicamente por suelos agrícolas y urbanos. La cobertura sin vegetación continúa asociada a las áreas de bordes de ríos y quebradas y no presenta mayores cambios de superficie respecto a los años anteriores. La cobertura y uso de suelo cuerpos de agua se localiza en tranques asociados a la actividad agrícola, quebradas y en el Río Aconcagua, sin embargo, se visualiza una diferencia de caudal, respecto a los años anteriores (Ver figura 20).

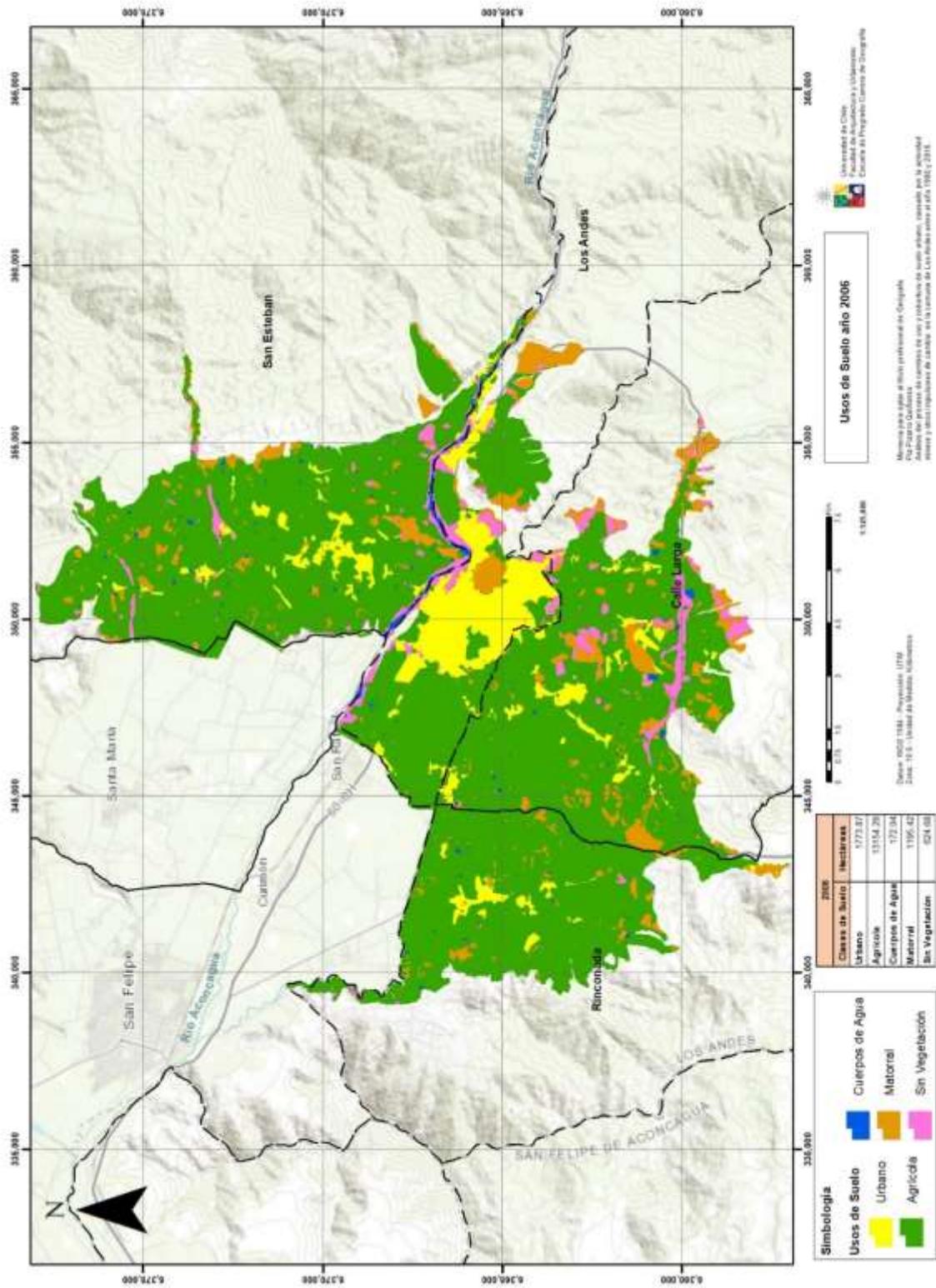


Figura 20. Usos de suelo en el área de estudio en el año 2006.
 Fuente. Elaboración propia.

4.1.4 Descripción de usos de suelo año 2016

Respecto a la verificación de los resultados de la clasificación supervisada se llevó a cabo a través de una matriz de confusión, que arrojó una precisión de 94,075%, consistente con un valor de 0,940 del índice estadístico de Kappa (para mayor información de la matriz de confusión ver anexo 7).

Los resultados de la clasificación supervisada para el año 2016 muestran que los suelos predominantes en el área de estudio fueron los agrícolas, al igual que los años anteriores, ocupando el 73% del área de estudio, sin embargo, disminuyeron en 5 puntos porcentuales respecto al año 2006 y 7 puntos porcentuales respecto al año 1986, lo que equivale aproximadamente 1.118 hectáreas. En segundo lugar, se encuentra el uso de suelo urbano, que abarcó el 18% del área de estudio, aumentando 7 puntos porcentuales respecto al año 2006 y 15% porcentuales respecto al año 1986, lo que equivale a un aumento de aproximadamente 2.427 hectáreas. En un tercer lugar se encuentra la cobertura Matorral que abarcó un 5% del área de estudio, disminuyendo en 2 puntos porcentuales respecto al año 2006 y 9 puntos porcentuales al año 1986, lo que equivale a una disminución de 1.383 hectáreas. En un cuarto lugar se encuentra la superficie sin vegetación que abarcó el 3% del área de estudio al igual que el año 1986, sin embargo, disminuyó en un punto porcentual respecto al año 2006, lo que equivale aproximadamente 67 hectáreas. Y finalmente en un quinto lugar se encuentra la superficie cuerpos de agua que abarcó el 0,1% del área de estudio, al igual que los años 1986 y 1996, pero disminuyó un punto porcentual respecto al año 2006, lo que equivale 111 hectáreas (ver figura 21).

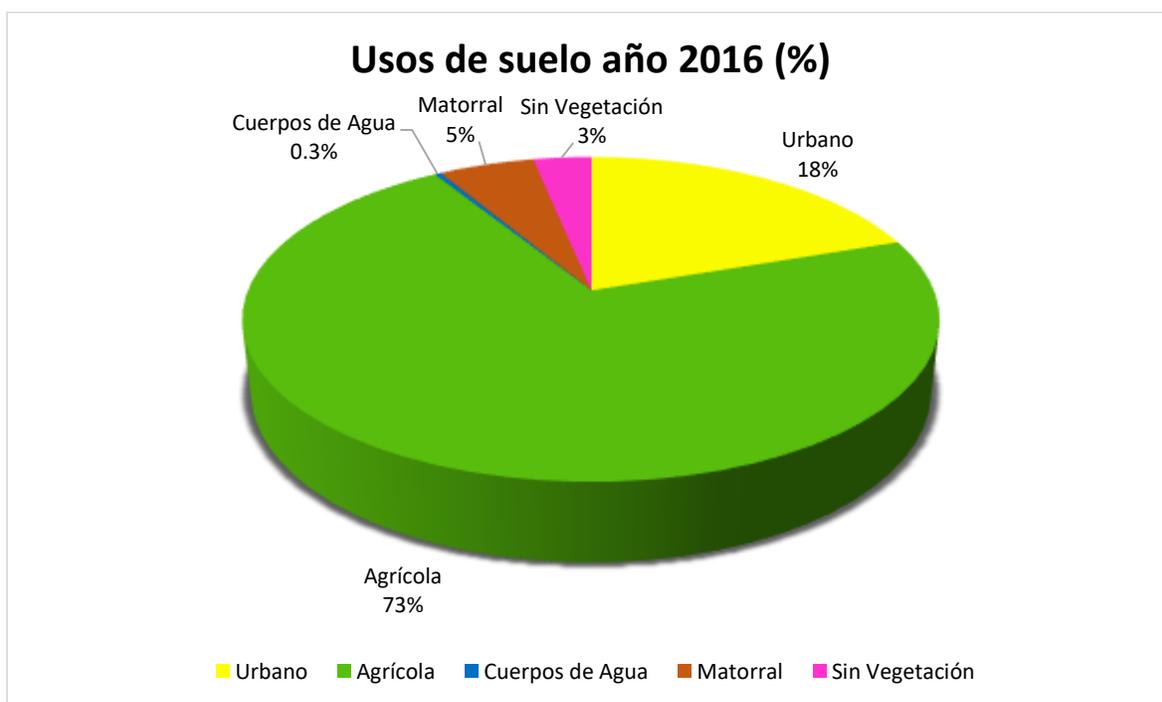


Figura 21. Distribución (%) de usos y coberturas de suelo año 2016.
Fuente. Elaboración propia.

Respecto a la distribución del espacio, la superficie de uso de suelo agrícola al igual que los años anteriores es la que tiene mayor preponderancia, especialmente en las comunas de San Esteban, Calle Larga y Rinconada, sin embargo, se evidencia de mayor grado el aumento de la superficie urbana en estas tres comunas, desarrollándose núcleos urbanos en diversas áreas, y al igual que el año 2006 estas están asociados mayormente a condominios y parcelas de agrado que se han expandido en zonas que anteriormente eran agrícolas. En la comuna de Los Andes se evidencia un aumento de la superficie urbana alrededor del gran núcleo urbano. En el sector norte de la comuna, la expansión llega al límite del Río Aconcagua y de la comuna de San Esteban, en el sector sur la expansión urbana sobrepasa el límite comunal, abarcando la zona norte de la comuna de Calle Larga. En el sector este, la expansión se desarrolla alrededor de Río Aconcagua y la ruta 60 o también llamada Camino Internacional, que une Chile y Argentina y en el sector oeste de la comuna, continúa desarrollándose un pequeño núcleo urbano en el sector de San Rafael. La superficie matorral ha disminuido respecto a los años anteriores, y continúa en áreas de cerros y laderas, sin embargo, las áreas de laderas de cerros que se encuentran en medio del área de estudio han sido ocupadas mayormente por el uso de suelo agrícola. Los suelos sin vegetación continúan asociados a superficies de bordes de ríos y quebradas, situación similar a los años anteriores. Finalmente, la cobertura cuerpos de agua, se observa en tranques en medio de la superficie agrícola y en Río Aconcagua respectivamente (ver figura 22).

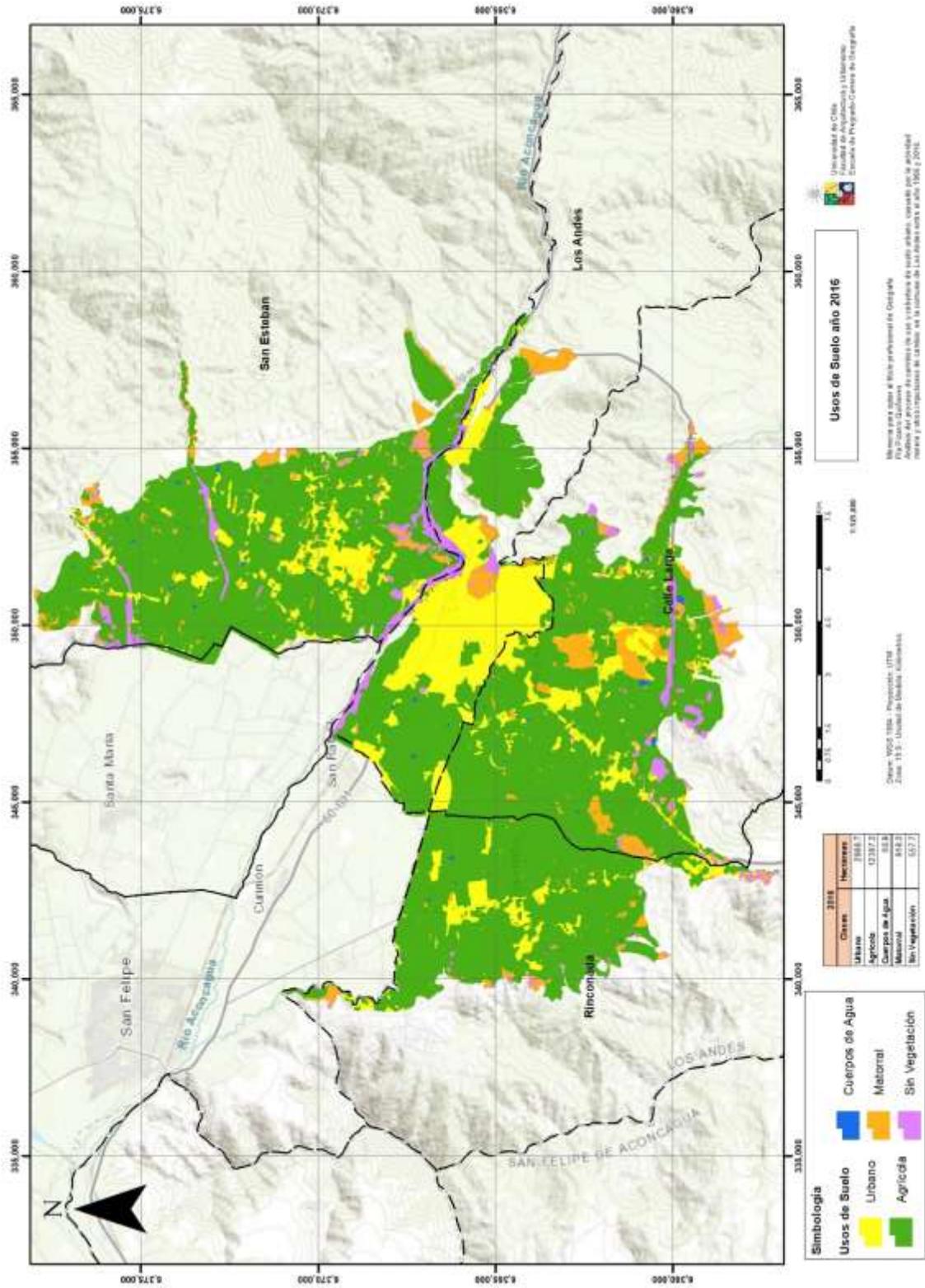


Figura 22. Usos de suelo en el área de estudio año 2016.
Fuente. Elaboración propia.

4.1.5 Cambio en el uso de suelo entre 1986-2016

Tras la realización de la clasificación supervisada, se pudo obtener el contexto en cuanto a los usos y coberturas de suelo previamente establecidos para cada período. La superficie de dichos usos de suelo reveló un cambio en ellos de período en período.

Entre los años 1986 y 1996 la superficie de suelo urbano, agrícola y sin vegetación aumentaron su extensión. La superficie de suelo urbano aumentó en 2 puntos porcentuales pasando del 3% al 5% del área de estudio, la superficie de suelo agrícola aumentó en 2 puntos porcentuales pasando del 80% al 82% de la superficie del área de estudio, la superficie de la cobertura sin vegetación o mixto aumentó en un 0,6% pasando de un 2,8% a un 3,4 % del área de estudio. Los usos de suelo y coberturas que disminuyeron su extensión fueron; cuerpos de agua, disminuyó en un 0,13%, pasando de 0,4% a 0,27% del área de estudio y la cobertura matorral que disminuyó en cuatro puntos porcentuales, pasando de un 14% a un 9% de la superficie total del área de estudio.

Entre los años 1996 y 2006 los usos y coberturas de suelo que aumentaron su superficie fueron; uso de suelo urbano, cuerpos de agua y sin vegetación. La superficie de suelo urbano aumentó 5 puntos porcentuales, pasando de un 5% a un 10% del área de estudio. La superficie cuerpos de agua aumentó aproximadamente en un 0,7%, pasando de un 0,3% a un 1% del área de estudio. La superficie de suelo sin vegetación aumentó en 0,3 %, pasando de 3,4% a 3,7% del área de estudio. Los usos y coberturas de suelo que disminuyeron su extensión fueron, uso de suelo agrícola y matorral. La superficie de suelo agrícola disminuyó 4 puntos porcentuales, pasando de un 82 % a un 78% del área de estudio. La cobertura matorral disminuyó en 1,7%, pasando de un 8,8% a un 7,1% del área de estudio.

Entre los años 2006 y 2016 el uso y cobertura de suelo que más aumentó su superficie fue el uso de suelo urbano, que creció en 8 puntos porcentuales, pasando de un 10% a un 18% del área de estudio. Los usos y coberturas que disminuyeron su extensión fueron; agrícola, cuerpos de agua, matorral y sin vegetación. La superficie de suelo agrícola disminuyó en 5 puntos porcentuales, pasando de un 78% a un 73 % del área de estudio. La superficie cuerpos de agua disminuyó en un 0,6%, pasando de un 1% a un 0,4% del área de estudio. La superficie matorral disminuyó en dos puntos porcentuales, pasando de un 7% a un 5% del área de estudio. La superficie sin vegetación disminuyó en un 0,4%, pasando de un 3,7% a un 3,3% del área de estudio.

Finalmente, entre los años 1986 y 2016 los usos y coberturas de suelo que aumentaron su superficie fueron; uso de suelo urbano que aumentó su extensión en 15 puntos porcentuales, pasando de un 3% en el año 1986 a un 18% en el año 2016 y la cobertura sin vegetación que aumentó en un 0,4% de superficie, pasando de un 2,9% en el año 1986 a un 3,3% en el año 2016. Los usos y coberturas de suelo que disminuyeron su superficie fueron; uso de suelo agrícola que disminuyó 7 puntos porcentuales, pasando de un 80% en el año 1986 a 73% en el año 2016, la superficie cuerpos de agua se mantuvo en un 0,4% y, por último, la superficie matorral disminuyó 9 puntos porcentuales, pasando de un 14% en el año 1986 a un 5% en el 2016.

4.2 Cambio de uso de suelo urbano entre 1986 y 2016

Del análisis previo, se pudo observar como ha aumentado la superficie urbana entre el año 1986 y el año 2016, por esto, se calculó la tasa de cambio de superficie urbana por período de año. Para ello, se consideró la superficie del final del período, menos la superficie inicial del período, para luego dividirla por la cantidad de años del período de estudio en cuestión y así obtener la tasa de cambio de la superficie urbana (Ver tabla 6).

4.2.1 Tasa de cambio suelo urbano

Tasa de cambio suelo urbano					
Período de años	Superficies (ha)		Superficie de Cambio	Años	Tasa de Cambio
1986-1996	561,31	898,48	337,17	11	30,7
1996-2006	898,48	1662,02	763,54	11	69,4
2006-2016	1662,02	2988,66	1326,64	11	120,6

Tabla 6. Tasa de cambio superficie urbana a nivel Provincial entre los años 1986 y 2016.
Fuente. Elaboración Propia.

De la tabla 6 se desprende que en los tres períodos de análisis el balance de superficie urbana fue positivo y para los tres períodos la tasa de cambio fue aumentando. Entre los años 1986 a 1996 la superficie urbana aumentó en 337,17 hectáreas, entre los años 1996 a 2006 la superficie urbana aumentó en 763,5 hectáreas y finalmente entre los años 2006 a 2016 se produjo el mayor aumento alcanzando las 1.326,64 hectáreas.

Gracias al análisis del cambio en la superficie de los usos de suelo, y posteriormente, a la tasa de cambio de suelo urbano a nivel provincial, se pudo determinar que efectivamente que hubo una variación en la superficie de este último. Ahora bien, a continuación, se presenta el balance en la superficie urbana, es decir, las pérdidas de superficie hacia otros usos de suelo, seguido de las ganancias de superficie que provienen desde otros usos y que finalmente se transformaron en tierras urbanas.

4.2.2 Balance superficie Urbana 1986-1996

Para el año 1986 existían 561 hectáreas de superficie urbana de ellas se perdieron 53 hectáreas, que fueron cedidas a otros usos y coberturas de suelo; 41 hectáreas fueron cedidas al uso de suelo agrícola, a cuerpos de agua 0,03 hectáreas, a la cobertura matorral 3 hectáreas y a suelos sin vegetación 9 hectáreas aproximadamente (ver figura 23 y anexo 8). Por otro lado, la superficie urbana, también recibió aportes provenientes de otros usos de suelo. Entre 1986 y 1996, se adicionó 389 hectáreas de nueva superficie urbana; donde el uso de suelo agrícola cedió 306 hectáreas, la cobertura cuerpos de agua 1 hectárea, la

cobertura matorral 55 hectáreas y el uso de suelo sin vegetación 27 hectáreas (ver figura 23 y anexo 8).

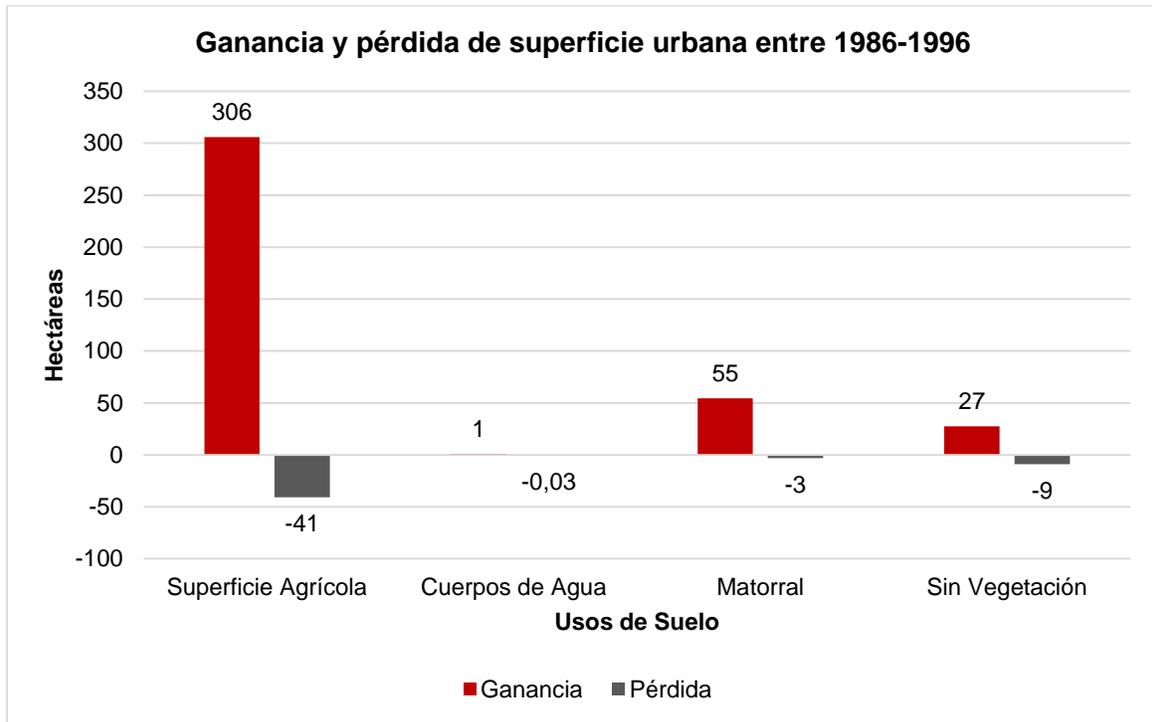


Figura 23. Ganancia y pérdida de superficie urbana entre los años 1986 y 1996.
Fuente. Elaboración Propia.

4.2.3 Balance Superficie Urbana 1996-2006

Para el año 1996 existían 989 hectáreas de superficie urbana de ellas se perdieron 72 hectáreas, que fueron cedidas a otros usos y coberturas de suelo; 62 hectáreas fueron cedidas al uso de suelo agrícola, a cuerpos de agua 2 hectáreas, a la cobertura matorral 3 hectáreas y a suelos sin vegetación 5 hectáreas aproximadamente (ver figura 24 y anexo 9). Por otro lado, la superficie urbana, también recibió aportes provenientes de otros usos de suelo. Entre 1996 y 2006, se adicionó 853 hectáreas de nueva superficie urbana; donde el uso de suelo agrícola cedió 752 hectáreas, la cobertura cuerpos de agua 2 hectáreas, la cobertura matorral 49 hectáreas y el uso de suelo sin vegetación 32 hectáreas (ver figura 24 y anexo 9).

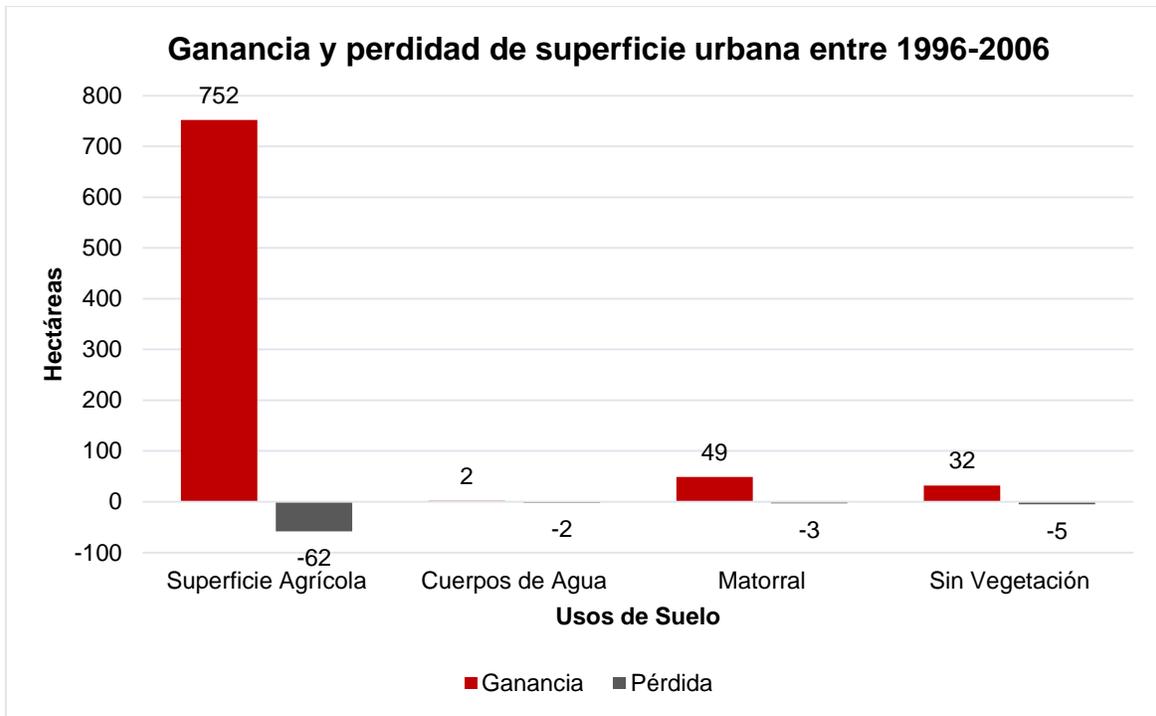


Figura 24. Ganancia y pérdida de superficie urbana entre los años 1996 y 2006.
Fuente. Elaboración Propia.

4.2.4 Balance Superficie Urbana 2006-2016

Para el año 2006 existían 1662 hectáreas de superficie urbana de ellas se perdieron 117 hectáreas, que fueron cedidas a otros usos y coberturas de suelo; 96 hectáreas fueron cedidas al uso de suelo agrícola, a cuerpos de agua 0,5 hectáreas, a la cobertura matorral 13 hectáreas y a suelos sin vegetación 9 hectáreas aproximadamente (ver figura 25 y anexo 10). Por otro lado, la superficie urbana, también recibió aportes provenientes de otros usos de suelo. Entre 2006 y 2016, se adicionó 1.444 hectáreas de nueva superficie urbana; donde el uso de suelo agrícola cedió 1.258 hectáreas, la cobertura cuerpos de agua 19 hectáreas, la cobertura matorral 69 hectáreas y el uso de suelo sin vegetación 98 hectáreas (ver figura 25 y anexo 10).

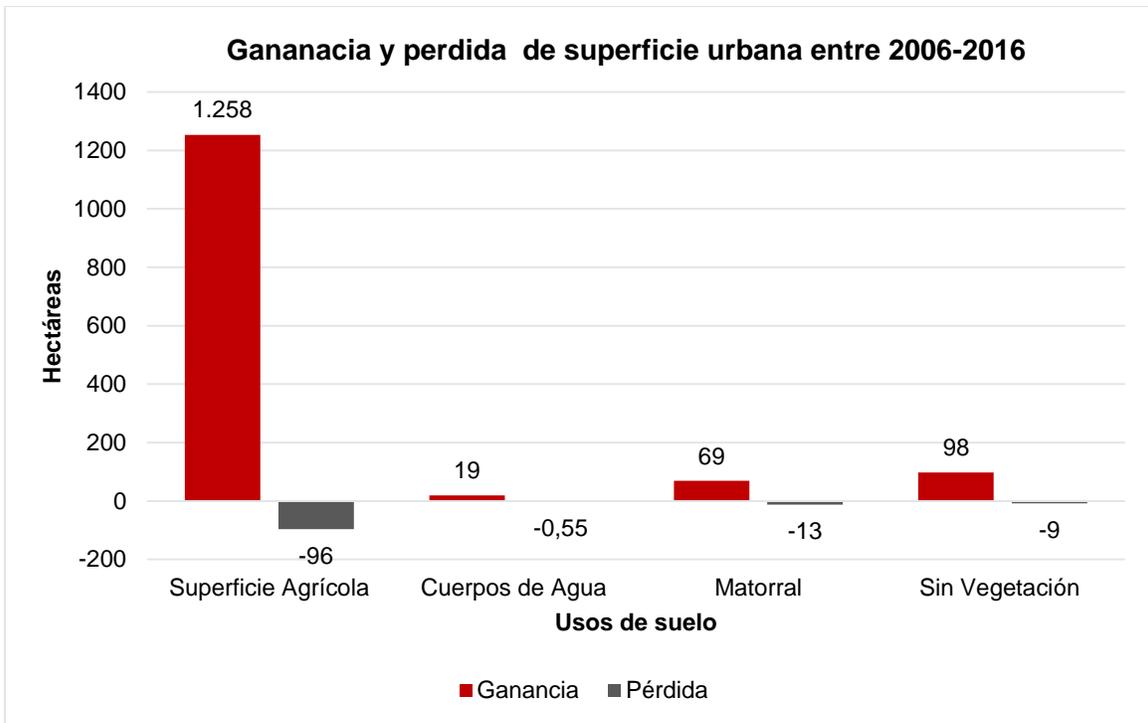


Figura 25. Ganancia y pérdida de superficie urbana entre los años 2006 y 2016.
 Fuente. Elaboración Propia

4.3 Relación entre la Producción de cobre y el crecimiento urbano de la Provincia de Los Andes

La Producción de Cobre, corresponde a la cantidad de cobre fino contenido en productos de cobre, la unidad de medida de este valor es en TMF, lo que quiere decir, toneladas métricas de cobre fino (producida en un año). Este es uno de los principales indicadores con lo que se mide a la gran minería, ya que implica un conjunto de actividades orientadas a la transformación del recurso, tales como, la implementación de nueva tecnología, y recursos humanos.

A nivel mundial y nacional la producción de cobre ha tenido un aumento sostenido desde el año 1986 (COCHILCO, 2018). La tabla 7 refleja que a nivel nacional la producción de este mineral ha ido en aumento, registrando un incremento de más de 4.000.000 de toneladas anuales desde el año 1986 al año 2016, lo que implica un crecimiento de más de un 39% en 30 años, sin embargo, en la década del 2000 se evidenciaron algunas fluctuaciones, como las registradas en el año 2002, 2008 y 2011, donde la producción bajo respecto a los años anteriores.

La situación en Codelco Andina, es similar a la que se refleja a nivel nacional, desde el año 1986 ha aumentado el nivel de producción sostenidamente, lo que equivale a un crecimiento de más de 100.000 toneladas anuales, que se traduce en un incremento de un 186% en 30 años. El aumento más significativo se produjo en la década del 2000, donde la producción aumentó en alrededor de 90.000 toneladas anuales, sin embargo, es en esta década, también, cuando se registraron las mayores fluctuaciones en la producción, como las reflejadas en los años 2002, 2007 y 2010. Es en este último año, donde se alcanzó el valor más bajo de producción de la década, con solo 185.000 toneladas de cobre fino anual.

Producción de cobre Anual (Miles de TM)							
Año	Mundial	Chile	Andina	Año	Mundial	Chile	Andina
1986	8393,2	1401,1	118,1	2002	13565,4	4580,6	218,7
1987	8746,5	1418,1	121,6	2003	13653	4904,2	235,8
1988	8686,7	1451	131,7	2004	14682,4	5412,5	239,9
1989	9025,3	1609,3	124,3	2005	15126,5	5320,5	248,2
1990	8956,5	1588,4	119,1	2006	15173,2	5360,8	236,4
1991	9099,4	1814,3	114,2	2007	15538,3	5557	218,4
1992	9458,1	1932,7	128,9	2008	15653,2	5327,6	219,5
1993	9474,4	2055,4	133,9	2009	15863,8	5394,4	209,7
1994	9574,9	2219,9	136,4	2010	16114,3	5418,9	188,5
1995	10181,4	2488,6	145,8	2011	16262,7	5262,8	234,4
1996	11110,7	3115,8	154,4	2012	16880,4	5433,9	249,9
1997	11478,8	3392	145,5	2013	18187,6	5776	236,7
1998	12272,7	3686,9	164	2014	18559,3	5761,1	232,4
1999	12749,4	4391,2	249,3	2015	19333	5772,1	224,3
2000	13246,5	4602	258	2016	20719,9	5552,6	193,4
2001	13756,7	4739	253,3	2017			220

Tabla 7. Producción de cobre fino anual, a nivel mundial, nacional y de CODELCO Andina.

Fuente. COCHILCO, 2018.

Para analizar la relación entre la producción de cobre de CODELCO Andina y el crecimiento de la superficie urbana en La Provincia de Los Andes se modeló el crecimiento del uso de suelo urbano a través de la aplicación de una ecuación de regresión lineal múltiple y así se estimó la dependencia del crecimiento urbano de la actividad minera. La tabla número 8 muestra el resultado de la modelación de la ecuación $y=510,92e^{0.0563x}$, cuyo coeficiente de determinación (R²) es de 0,9969.

Superficie urbana en base a clasificación supervisada de imágenes LANDSAT y modelo estadístico (ha)					
Año	Clasificación Supervisada	Modelo Estadístico	Año	Clasificación Supervisada	Modelo Estadístico
1986	561,3	540,5	2002		1330,5
1987		571,8	2003		1407,6
1988		604,9	2004		1489,1
1989		640,0	2005		1575,3
1990		677,0	2006	1662,0	1666,6
1991		716,2	2007		1763,1
1992		757,7	2008		1865,2
1993		801,6	2009		1973,2
1994		848,0	2010		2087,5
1995		897,1	2011		2208,4
1996	898,5	949,1	2012		2336,3
1997		1004,1	2013		2471,6
1998		1062,2	2014		2614,7
1999		1123,7	2015		2766,2
2000		1188,8	2016	2988,7	2926,4
2001		1257,7	2017		

Tabla 8, Superficie urbana clasificación supervisada y modelada.
Fuente. Elaboración Propia.

La figura 26 refleja la relación entre la producción de cobre de CODELCO Andina y el crecimiento de la superficie urbana, la variable independiente es la Producción de cobre y la variable dependiente el crecimiento urbano. La relación lineal registrada en el gráfico refleja que, en los primeros años de análisis, entre 1986 a 1998, la superficie urbana mostraba una relación lineal con la producción de cobre anual, lo que está sustentado principalmente en el aumento sostenido de la producción de cobre y de la superficie urbana. Sin embargo, a partir del año 1999 la relación se dispersa, lo que indica que no existiría una relación lineal entre ambas variables, esto se explica por las fluctuaciones en la producción del cobre que se registraron a partir de la década del 2000. A pesar de esto, a partir del año 2007 hasta el año 2010 la relación se estrecha, lo que se explica en el aumento sostenido de la producción de cobre durante estos años, sin embargo, a partir del año 2010 la relación se aleja debido a que ambas variables no presentan un aumento sostenido.

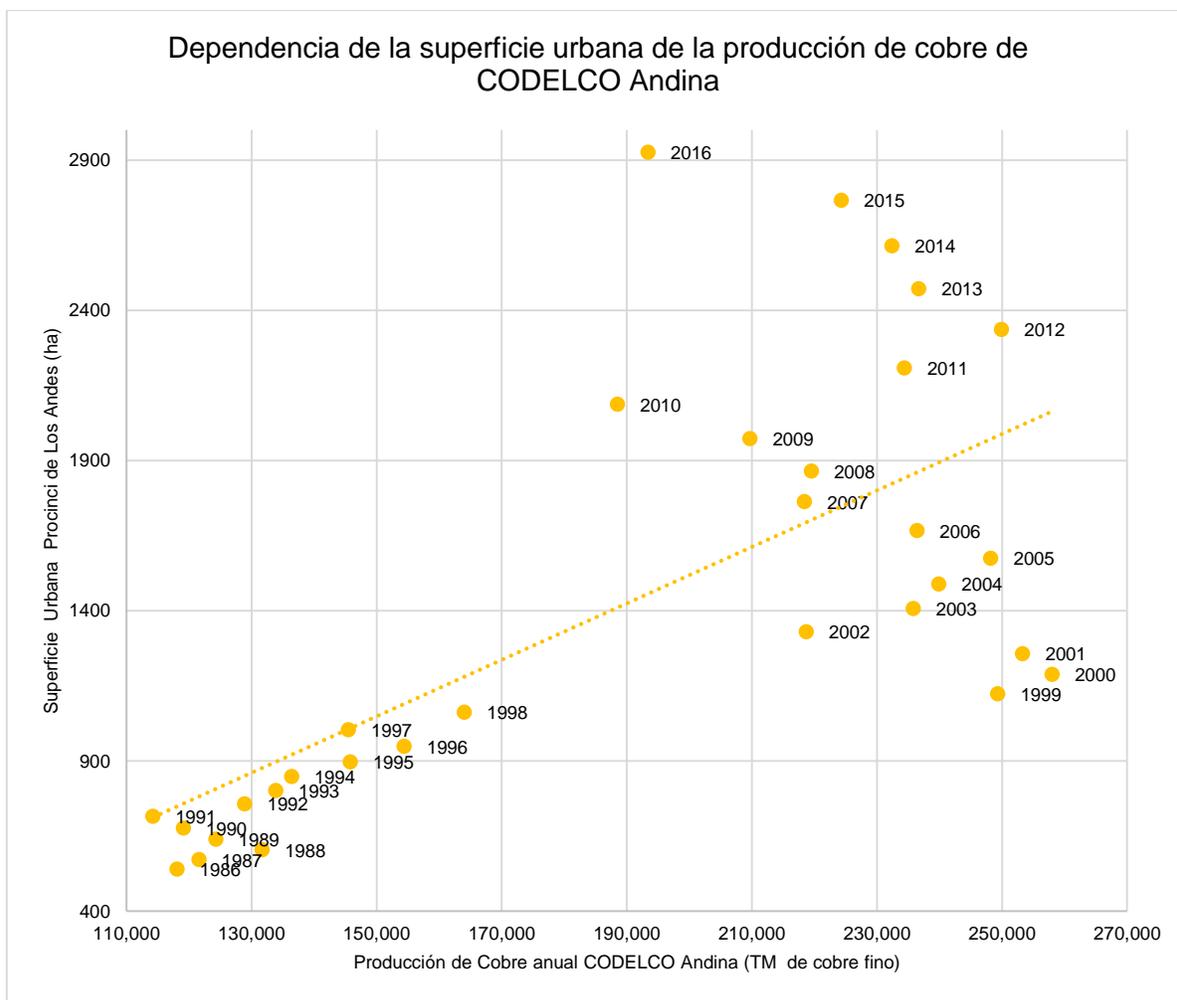


Figura 26. Gráfico de dispersión que refleja la relación entre la Producción de cobre y la superficie urbana (ha) entre los años 1986 y 2016.

Fuente. Elaboración en base a datos de COCHILCO, 2018 y resultados de la clasificación supervisada.

4.4 Crecimiento urbano a nivel comunal

A nivel Provincial, la superficie del suelo urbano creció más de 5,3 veces su tamaño desde el año 1986 hasta el año 2016. El período donde se registró el mayor crecimiento fue entre los años 2006 y 2016, con una tasa de cambio de 120,6 hectáreas anuales, como lo indica la tabla 9. Por otro lado, el período donde se registró el menor crecimiento, fue entre los años 1986 y 1996, con una tasa de cambio de 30,6 hectáreas anuales.

A nivel comunal, la figura 27 muestra el crecimiento urbano de las cuatro comunas que conforman la Provincia de Los Andes. Por un lado, la comuna de Calle Larga creció desde el año 1986 al año 2016 más de 600 hectáreas, aumentando más de 12 veces su tamaño. El período de mayor crecimiento fue entre el año 2006 y el año 2016, con una tasa de cambio de 30 hectáreas anuales, por el contrario, el período de menor crecimiento fue entre el año 1986 y el año 1996 con una tasa de cambio de 2,8 hectáreas anuales. La comuna de Los Andes creció desde el año 1986 al año 2016 aproximadamente 1.120 hectáreas,

aumentando más de 2,5 veces su tamaño. El período de mayor crecimiento fue entre el año 2006 y el año 2016, con una tasa de cambio de 35 hectáreas anuales, y el período de menor crecimiento fue entre el año 1986 y el año 1996 donde aumentó 19 hectáreas anuales. La comuna de Rinconada creció entre el año 1986 y el año 2016 alrededor de 370 hectáreas, aumentando en más de 9,4 veces su tamaño, el período de mayor crecimiento fue entre el año 2006 y el año 2016, con una tasa de cambio de 20 hectáreas anuales y el período de menor crecimiento fue entre el año 1986 y el año 1996 aumentando 0,9 hectáreas anuales, siendo la comuna que menos creció en la Provincia en este período. La comuna de San Esteban creció entre el año 1986 y el año 2016 aproximadamente 640 hectáreas, aumentando su tamaño en más de 18 veces, siendo la comuna que más creció en la Provincia. El período de mayor crecimiento fue entre el año 2006 y el año 2016 con una tasa de cambio de 34 hectáreas anuales y el período de menor crecimiento fue entre el año 1986 y el año 1996 con una tasa de cambio 7,3 hectáreas anuales.

Tasa de cambio suelo urbano por comuna			
Comunas	1986-1996	1996-2006	2006-2016
Calle Larga	2,84	20,63	30,26
Los Andes	19,54	24,83	35,29
Rinconada	0,96	8,01	20,11
San Esteban	7,33	15,93	34,90
Total	30,68	69,40	120,6

Tabla 9. Tasa de cambio de superficie urbana a nivel comunal.
 Fuente Elaboración Propia.

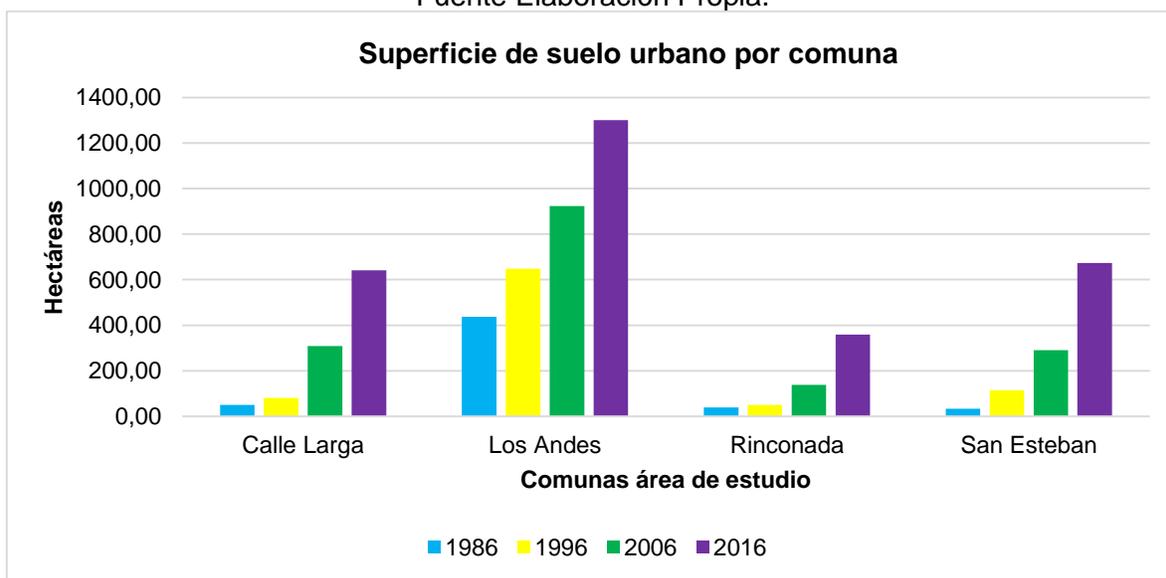


Figura 27. Distribución de la superficie urbana a nivel comunal, entre los años 1986 y 2016.

Fuente. Elaboración propia.

4.4.1 Tipos de Expansión a nivel comunal

Las distintas formas de expansión se muestran en la figura 28, donde se aprecia que la comuna de Los Andes presenta una forma de crecimiento urbano más desarrollado y consolidado que las otras comunas de la Provincia. Entre los años 1986 y 2006 se distingue un crecimiento radial o de acreción por adherencia, ya que las nuevas áreas urbanas se van extendiendo en la periferia de la ciudad. Entre los años 2006 y 2016 la superficie urbana continúa creciendo alrededor del gran núcleo urbano, llegando incluso a sobrepasar los límites comunales, hacia las comunas de Calle Larga y San Esteban. Sin embargo, comienza a vislumbrarse de manera más consolidada el tipo de crecimiento urbano llamado “salto de rana”, principalmente en el área oeste de la comuna, hacia el límite de la Comuna de San Felipe, en el sector de San Rafael.

Las comunas de Calle Larga, Rinconada y San Esteban desarrollaron un patrón similar de crecimiento en los 30 años de análisis, entre los años 1986 y 1996 predominó el crecimiento urbano llamado “tentacular”, debido a que la superficie urbana se expandió en torno a las principales vías de transporte, en el caso de la comuna de Calle Larga en torno a la ruta E-57, la comuna de Rinconada en torno a la ruta E-89 o Carretera San Martín y la comuna de San Esteban en torno a la principal vía de acceso a la comuna, la carretera E-755. Es alrededor de estas vías donde se construyeron las principales edificaciones comunales, como la Municipalidad y la plaza de armas. Entre los años 1996 y 2006, comienza a desarrollarse el crecimiento urbano llamado “salto de rana”, caracterizado por presentar núcleos urbanos aislados, y es este tipo de crecimiento el que predominó en las tres comunas a partir de la década del 2000. El crecimiento de “salto de rana” en las tres comunas, está ligado principalmente a Villorrios y Condominios privados de baja densidad. Por otro lado, a raíz de la proliferación de Condominios privados, se desarrollaron distintos tipos de servicios en torno a estos, donde la principal función es, abastecer a estos complejos residenciales, aislándolos aún más del núcleo urbano histórico (ver anexo 11 y 12).

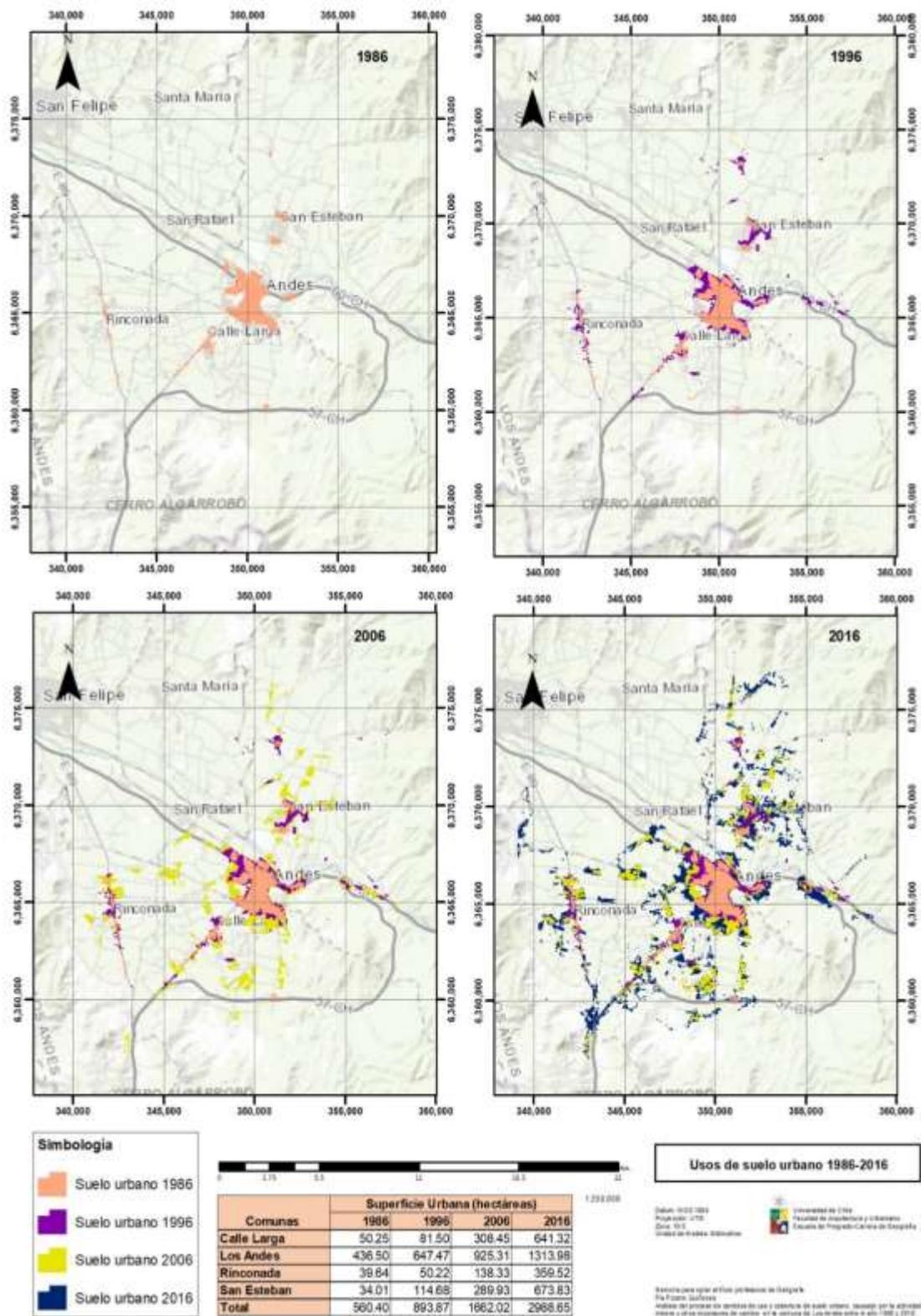


Figura 28. Crecimiento urbano entre los años 1986 y 2016.
Fuente. Elaboración propia.

4.4.1 Dirección de la expansión urbana (Baricentro Urbano)

El Baricentro urbano nos muestra la dirección que toma la expansión urbana en los 30 años de este análisis. Las coordenadas del baricentro para los años 1986, 1996, 2006 y 2016 de las cuatro comunas se muestran en la tabla 10 y los cambios de dirección de la expansión urbana se muestran en la figura 29. A nivel comunal el comportamiento de la expansión urbana fue distinto para cada comuna, y en general estuvo ligado a la forma de la expansión de cada una de ellas en los distintos períodos de años.

En el caso de la comuna de Calle Larga, entre los años 1986 y 1996, la expansión urbana fue mayormente hacia el noroeste de la comuna, con una distancia de 590 metros entre ambos baricentros, en el año 1986 el baricentro estuvo más alejado del centro de la ciudad, debido al poco desarrollo urbano en esa época y para el año 1996 el baricentro se traslada hacia el centro de la ciudad, debido a que comienza a desarrollarse la zona urbana en torno a la carretera San Martín, lo que responde al crecimiento tentacular de la superficie urbana. Para el período de 1996 y 2006 la expansión urbana se trasladó hacia el sureste con una distancia de 395 metros entre los baricentros de ambos años. Para el período entre los años 2006 y 2016 la superficie urbana se expandió hacia el suroeste, a 597 metros de distancia entre ambos baricentros. El cambio de baricentro entre el año 2006 y 2016 se debe a que es en la década del 2000 donde empieza a desarrollarse el sector sureste de la comuna, y hoy en día existen una serie de proyectos inmobiliarios en esa zona (ver anexo 13), sin embargo, todos los baricentros se localizan cercanos a la Ruta E-57, debido al tipo de crecimiento urbano tentacular, que es el que predomina en la comuna de Calle Larga y es a este tipo de crecimiento que debe su nombre.

Para la comuna de Los Andes entre los años 1986 y 1996 el suelo urbano se expandió en dirección noreste con una distancia de 178 metros entre los baricentros de ambos años, estos se localizaron cercanos al centro histórico de la ciudad. Entre los años 1996 y 2006 el suelo urbano se expandió hacia el este con una distancia de 220 metros entre ambos baricentros y entre los años 2006 y 2016 el suelo urbano se expandió en dirección opuesta hacia el suroeste con una distancia de 800 metros, debido a que la ciudad creció por el Sur, traspasando el límite administrativo de la comuna, llegando a la comuna de Calle Larga y por el oeste se fortaleció la zona de San Rafael.

Para la comuna de San Esteban, entre los años 1986 y 1996, el suelo urbano se expandió mayormente en dirección noreste, con 405 metros de distancia entre los baricentros, en el año 1986 el baricentro se localiza cercano al centro urbano de la comuna y luego en el año 1996 se traslada hacia el norte de la comuna. Entre los años 1996 y 2006 el suelo urbano continuó expandiéndose en dirección noreste, con 343 metros de distancia entre ambos baricentros, la dirección continúa hacia el norte de la comuna debido a que se desarrollan pequeñas áreas urbanas en el sector norte de esta. Por último entre los años 2006 y 2016 el suelo urbano continuó expandiéndose en la misma dirección que los años anteriores con 154 metros de distancia entre los baricentros de ambos años.

Para la comuna de Rinconada entre los años 1986 y 1996 el suelo urbano se expandió mayormente en dirección noroeste, con una distancia de 169 metros entre los baricentros de ambos años, estos se localizaron cercanos a la principal vía de transporte, la carretera

San Martín, lo que también responde al crecimiento tentacular de la superficie urbana. Entre los años 1996 y 2006 el suelo urbano continuó expandiéndose mayormente en dirección noroeste con 540 metros de distancia entre ambos baricentros, el baricentro del año 2006 al igual que los años anteriores se localiza cercano a la carretera San Martín, sin embargo, comienza aparecer en el sector norte de la comuna las primeras parcelas de agrado y complejos residenciales privados, lo que hace que la fuerza de la expansión se traslade en esta dirección. Finalmente, entre los años 2006 y 2016 el suelo urbano se expandió hacia el sureste a 749 metros de distancia entre ambos baricentros, la dirección que toma la expansión en el año 2016 responde a que comienza a urbanizarse el sector de Auco, donde en los últimos años se han localizado una serie de proyectos inmobiliarios privados (Anexo 14).

Baricentro urbano entre 1986 y 2016								
Comunas	1986		1996		2006		2016	
	Norte	Este	Norte	Este	Norte	Este	Norte	Este
Calle Larga	6.362.627	348.345	6.363.070	347.955	6.362.711	348.120	6.362.555	347.564
Los Andes	6.365.725	350.203	6.365.838	350.341	6.365.816	350.560	6.365.694	349.768
San Esteban	6.369.746	351.736	6.369.975	352.070	6.370.272	352.242	6.370.411	352.309
Rinconada	6.364.281	342.245	6.364.341	342.087	6.364.845	341.890	6.364.348	342.452

Tabla 10. Coordenadas del baricentro urbano entre los años 1986 y 2016.

Fuente. Elaboración Propia.

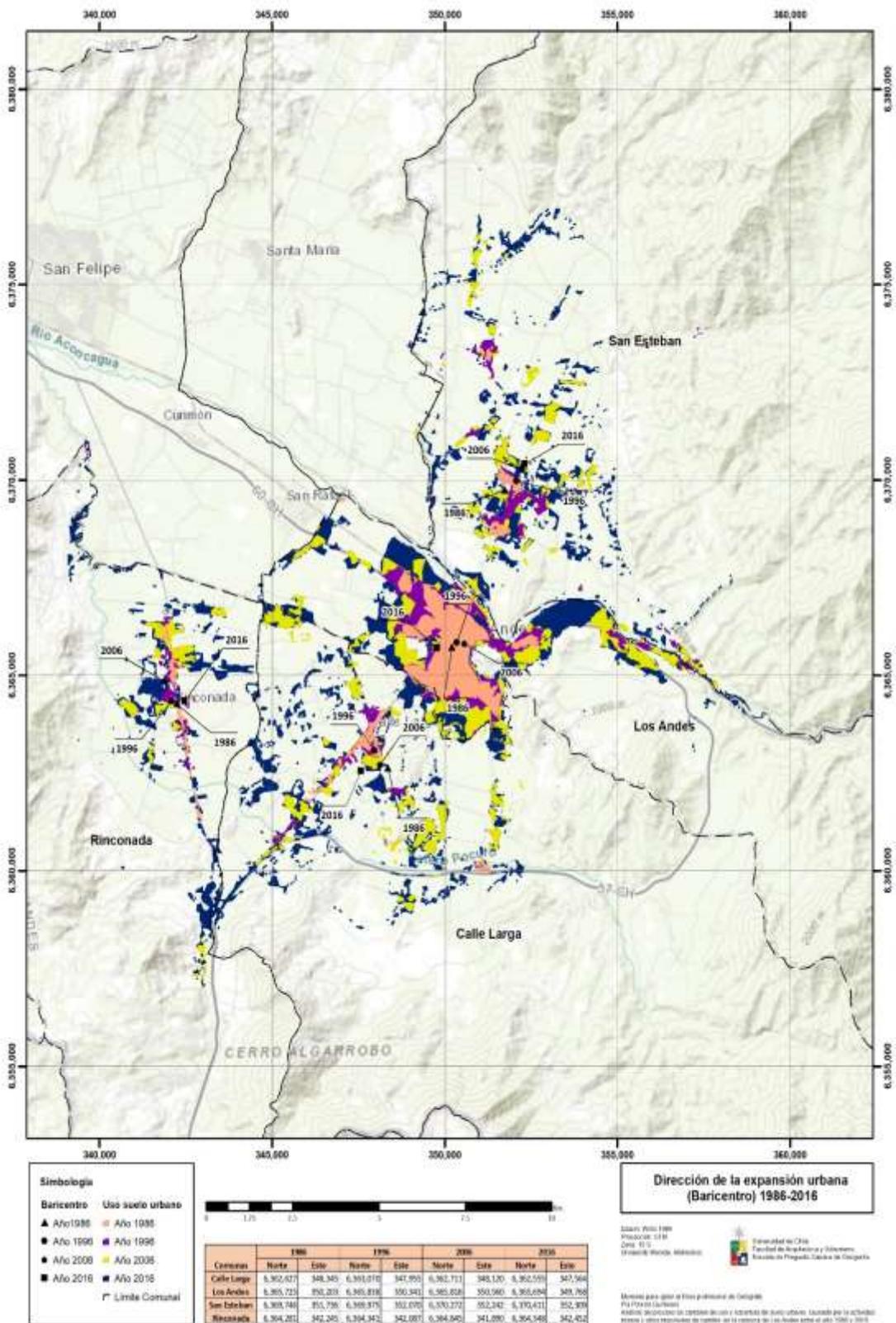


Figura 29. Cambios de dirección de la expansión urbana.
Fuente. Elaboración propia.

4.4.2 Índice de Compacidad Urbana

El índice de compacidad urbana nos permite determinar la forma de la ciudad, entre lo compacto y lo disperso, mientras más cercano a 1 es el valor del índice, más compacta es la forma de la ciudad.

De la tabla 11 y de la figura 30 se desprende que la comuna de Calle Larga disminuyó su nivel de compacidad desde el año 1986 al 2016, el valor más compacto lo alcanzó en el año 1996 con un índice de 0,072 y el menos compacto en el año 2016 con un índice de 0,027, estos bajos valores de compacidad reafirman el crecimiento urbano de la comuna, que en un principio fue creciendo a la largo de la ruta E- 57 y posteriormente el crecimiento urbano fue a través de pequeñas áreas aisladas que pertenecen principalmente a condominios privados, por otro lado, el hecho que los índices de compacidad fueran disminuyendo afirma que no existió un enriquecimiento interno (relleno) de las áreas ya urbanizadas.

La comuna de Los Andes disminuyó los valores de compacidad urbana desde el año 1986 al año 2016, el valor más alto lo alcanzó en el año 1986 con un índice de 0,148 y el más bajo en el año 2016 con un índice de 0,084, si bien los valores de compacidad de la comuna de Los Andes son los más altos de la Provincia, fueron disminuyendo a lo largo de los 30 años de análisis, lo que reafirma que el crecimiento urbano ha sido en torno al núcleo urbano, en la periferia y el crecimiento interno (de relleno) ha sido muy bajo.

La comuna de Rinconada disminuyó su índice de compacidad, especialmente en los últimos 10 años de análisis, alcanzando el valor más alto en el año 2006 con un índice de 0,074 y el más bajo en el año 2016 con un índice de 0,041, lo que da cuenta del acelerado crecimiento urbano en los últimos 10 años, que se ha localizado preferentemente en áreas alejadas del centro histórico, y se ha concentrado, específicamente, en pequeñas zonas urbanas que están ligadas a condominios privados (crecimiento de "salto de rana").

La comuna de San Esteban a lo largo del período de investigación fue disminuyendo su índice de compacidad, alcanzado el valor más alto en el año 1986 con un índice de 0,151 y el valor más bajo en el año 2016 con un índice 0,024, esta comuna fue la que alcanzó el valor más alto y bajo de compacidad de la Provincia, el más alto en el año 1986 y el más bajo en el año 2016, esta disminución sostenida se debe, al igual que las comunas de Calle Larga y Rinconada, al acelerado crecimiento urbano en forma de salto de rana que ha predominado en los últimos años y que se refleja a través de condominios alejados del centro histórico y zonas rurales que se han urbanizado (Anexo 15).

Comuna	Índice de compacidad urbana por comuna			
	1986	1996	2006	2016
Calle Larga	0,067	0,072	0,042	0,027
Los Andes	0,148	0,127	0,090	0,084
Rinconada	0,067	0,07	0,074	0,041
San Esteban	0,151	0,073	0,050	0,024

Tabla 11. Valores de índice de compacidad urbana.
Fuente. Elaboración propia.

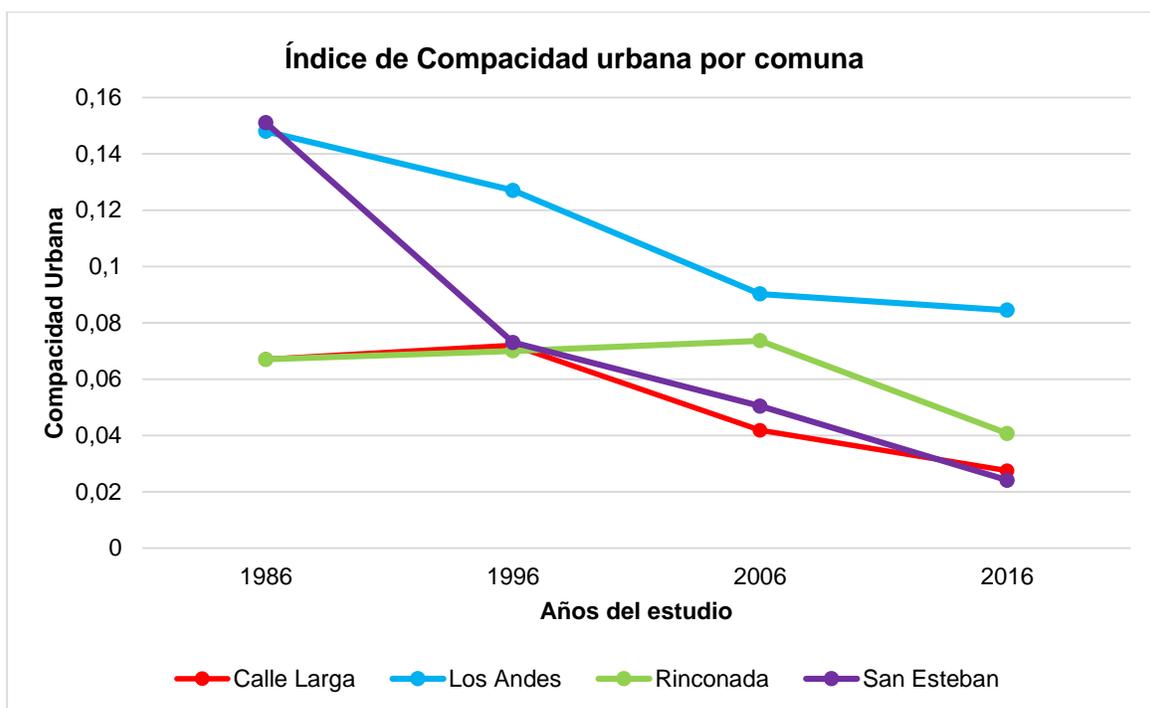


Figura 30. Índice de compacidad urbana por comuna.
Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

A partir de este análisis y de la metodología realizada, se desprende que la expansión urbana en la Provincia de Los Andes está en pleno desarrollo, con tasas de crecimiento urbano cada vez más altas, por lo tanto, tal como señala Romero et al (2007) y Henríquez et al (2006a; 2006b), el suelo urbano reemplazará progresivamente a las coberturas vegetales naturales o seminaturales, o como lo evidencia este análisis el uso de suelo urbano reemplazará también al uso de suelo agrícola.

La expansión urbana en el área de estudio ha sido uno de los factores responsables de la pérdida de tierras cultivables y matorrales. A nivel de paisaje el suelo agrícola disminuyó en más de 1.500 hectáreas y los mayores cambios fueron registrados en los últimos 10 años de análisis, entre los años 2006 y 2016, donde alrededor 1.000 de las 1.500 hectáreas fueron pérdidas y cedidas al suelo urbano. La cobertura matorral perdió alrededor de 1.400 hectáreas a lo largo del estudio, sin embargo, estas fueron pérdidas progresivamente, y cedidas a suelo urbano, agrícola y sin vegetación.

Por otro lado, los patrones de expansión urbana en la Provincia de Los Andes reflejan que, la tasa de cambios de la superficie urbana a nivel comunal fue aumentando a lo largo del análisis en las cuatro comunas, sin embargo, los valores más altos se registraron en los últimos 10 años, desde el año 2006 al 2016. La orientación de la expansión urbana, fue cambiando respecto a los diferentes períodos de estudio, los baricentros de las cuatro comunas no marcaron algún tipo de patrón o una orientación definida, más bien, la evidencia muestra que las distintas orientaciones de los baricentros en los distintos períodos de años respondían a una expansión desordenada y difusa. Respecto a la compacidad urbana en el área de estudio, esta fue disminuyendo en el transcurso del análisis, lo que evidencia el aumento de las superficies urbanas fuera del casco histórico, como fue en el caso de la comuna de Los Andes, donde el crecimiento fue de forma radial o de acreción por adherencia, en los primeros años, y desde la década del 2000 surgieron zonas urbanas aisladas en el sector de San Rafael al oeste de la comuna. En el caso de las comunas de San Esteban, Calle Larga y Rinconada el índice de compacidad fue disminuyendo drásticamente a lo largo del estudio, por lo tanto, mientras creció el uso de suelo urbano, lo hizo de manera desordenada y difusa. En los primeros años la forma de la expansión fue la llamada por Romero (2007) “tentacular” y estaba ligada principalmente a los ejes de transporte, donde un conjunto de obras públicas, específicamente, acceso viales y vías de alta circulación contribuyeron a intensificar cambios en el paisaje urbano (Hidalgo y Borsdorf, 2005a), a pesar de esto, en los últimos años la expansión de las tres comunas se concentró en zonas aisladas del centro históricos que responden mayormente a complejos residenciales privados.

Respecto, a los cambios en la producción de cobre de la mayor minera de la Región de Valparaíso, estos fueron aumentando progresivamente, pero los valores más altos de producción se alcanzaron en la década del 2000, donde en el transcurso de dos años la producción pasó de 164.000 toneladas anuales (1998) a 258.000 toneladas anuales (2000), a pesar que desde la década del 2000 se registraron las primeras fluctuaciones en la producción anual de cobre fino, registrando en el año 2010 valores por debajo de las

200.000 toneladas anuales. Por otro lado, en el año 2012 se anunció el proyecto de mayor envergadura de la División, que pretendía posicionar a la División Andina como unas de las más importantes a nivel nacional, el proyecto CODELCO Andina 244.

La mayor alza en la producción de cobre coincide con el mayor crecimiento urbano de la Provincia de Los Andes. Según muestran los análisis es en la década del 2000 donde se alcanzan los mayores valores de producción de cobre y el suelo urbano aumentó al doble su superficie, sin embargo, el gráfico de dispersión reflejó que la relación lineal entre ambas variables se registró al inicio del análisis, entre 1986 y 1998, y a partir de la década del 2000 la relación se dispersa, específicamente, porque la producción de cobre comienza a registrar diversas fluctuaciones en la producción anual, sin embargo, entre los años 2007 y 2010 la relación vuelve a estrecharse parcialmente.

A pesar que la relación lineal entre la producción de cobre y superficie urbana se dispersa en la década del 2000, los mayores cambios en la superficie urbana se registraron a partir de esta década, por un lado, la tasa de cambio de la superficie urbana aumento a más del doble, la compacidad urbana registro los menores valores, y se evidencio y prolifero el crecimiento de “salto de rana” en las cuatro comunas que conforman la Provincia.

Los resultados de la relación entre el crecimiento urbano y la producción de cobre demuestran que el desarrollo de la actividad minera, no contribuyó por sí solo, a la expansión urbana en la Provincia de Los Andes, sin embargo, juntos a otros agentes dinamizadores o factores de conducción urbana, tan relevantes e importantes, han contribuido o conducido este proceso en estas últimas décadas. Estos agentes dinamizadores son, por ejemplo; Políticas gubernamentales (Henríquez, 2009), los Instrumentos de planificación territorial, la Geografía del paisaje y el sistema socioeconómico (Liu, 2002), entre muchos otros. Este estudio no pretende establecer cuáles son los agentes que aceleraron el proceso de expansión urbana en la Provincia, sino, establecer que la actividad minera contribuyo a este proceso.

Dado que las fuerzas impulsoras son una parte importante de investigaciones sobre la expansión urbana, un análisis profundo de esos factores en un futuro estudio valdría la pena, para entender mejor los mecanismos de evolución urbana, así como también las interrelaciones entre factores de conducción. Además, los factores de conducción varían con el tiempo debido a las características dinámicas y temporales de la expansión urbana. Identificar y examinar los efectos de los factores dinamizadores de la expansión urbana es crucialmente importante para el diseño de estrategias de planificación y gestión (Li et al., 2013).

En el futuro previsible, la expansión urbana será una de los problemas más serios en el área de estudio, ya se evidencia una conurbación entre las comunas de la Provincia y CODELCO Andina continua en sus planes de expansión. Por lo tanto, se deben presentar estrategias a fin de controlar la expansión urbana y aliviar contradicciones del uso de la tierra. Se han desarrollado algunas teorías a fin de abordar este tema, tales como, crecimiento inteligente, ciudad compacta, renovación urbana, etc., sin embargo, tal como indica Zhang et al. (2013) estas son demasiado abstractas para la contención urbana en una zona de minería. Por lo tanto, el uso de la tierra debería mejorarse en las siguientes

medidas; en primer lugar, las estructuras de uso de la tierra y el diseño industrial deberían optimizarse llevando a cabo una planificación urbana efectiva, y estos planes deberían tomar en cuenta el desarrollo de la minería en áreas que son afectadas por esta y, en segundo lugar, se debe mejorar la eficiencia del uso de la tierra, especialmente para aumentar la compacidad del suelo urbano.

5.2 Conclusión

A partir del análisis realizado en la presente investigación queda demostrado que las comunas de la Provincia de Los Andes están presentando un proceso constante de expansión urbana desde 1986 al 2016, y este proceso se ha visto acelerado en los últimos años, especialmente, a partir de la década del 2000.

El análisis de los usos de suelo desde 1986 a 2016 reflejaron que solo el uso de suelo urbano creció progresivamente a lo largo del estudio, mientras el uso de suelo agrícola creció solo hasta el año 1996 y a partir de ese año comenzó a disminuir progresivamente. La cobertura matorral disminuyó considerablemente su extensión en el área de estudio, siendo reemplazada por el uso de suelo agrícola y urbano. Y los usos sin vegetación y coberturas de agua mantuvieron relativamente su superficie.

Según el balance de uso de suelo urbano, la superficie urbana perdió muy pocas hectáreas, a lo largo del análisis solo cedió alrededor de 200 hectáreas, principalmente suelo agrícola, mientras que, ganó más de 2.334 hectáreas, y están en su mayoría fueron cedidas desde el uso de suelo agrícola y matorral.

Respecto a los patrones de expansión urbana el análisis de los usos de suelo en los diferentes períodos de años, evidenció que la comuna de Los Andes en los primeros años de análisis creció en torno al núcleo urbano ya establecido, específicamente en la zona periférica y a partir de la década del 2000 se vislumbró zonas aisladas de la mancha urbana. Las otras tres comunas de la Provincia, en el año 1986, estaban muy poco desarrolladas, al punto de que la superficie urbana era mínima, sin embargo, fueron creciendo en torno a los principales ejes de transporte y a partir de la década del 2000 el patrón de expansión cambia a saltos de rana, esto, debido a que diversos proyectos inmobiliarios se localizaron en distintas zonas aisladas de las tres comunas, lo que significó que crecieron de manera desordenada y difusa.

La actividad minera en la región mostró un aumento progresivo a lo largo del estudio, este crecimiento como se evidenció, fue coincidente con el aumento de la superficie urbana y con los distintos patrones de expansión presentados en la Provincia, sin embargo, el análisis de la relación entre el aumento de la superficie urbana y la producción de cobre año a año entre 1986 y 2016 nos muestra que, la actividad minera no es el único y principal agente dinamizador en la Provincia de Los Andes, existirían otros agentes dinamizadores igual de relevantes en el proceso de expansión urbana, que en el caso de este análisis se reflejaron a partir de la década del 2000, lo que demuestra que si bien, la actividad minera actuó como agente dinamizador de la expansión urbana, no explica por sí sola, el aumento

de la superficie urbana y con ello todos los procesos morfológicos que se han desarrollado en el área urbana de la Provincia, como el crecimiento urbano desordenado y difuso.

Finalmente, el presente estudio deja pendiente el análisis y efectos de los agentes dinamizadores de expansión urbana en áreas afectadas por la actividad minera y como deberían abordarse estrategias de planificación efectivas a fin de contribuir a la compacidad de la superficie del suelo urbano y a la pérdida de coberturas naturales y seminaturales en este tipo de regiones.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

ALDANA DEZZEO, A. y BOSQUE SENDRA, J. (2008). "Cambios ocurridos en la cobertura/uso de la tierra del Parque Nacional Sierra de la Culata. Mérida-Venezuela. Período 1988-2003". Revista GeoFocus, N° 8, Pp. 139-168. [En línea]: <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/141/290>

ARMIJO, M (2009): "Manual de Planificación Estratégica e indicadores de desempeño en el Sector público" ILPE/CEPAL, Áreas de políticas presupuestarias y Gestión Pública. 130 pp . [En línea]: https://www.cepal.org/ilpes/publicaciones/xml/8/44008/SM_69_MA.pdf

AZÓCAR, G., SANHUEZA, R. y HENRIQUEZ, C. (2003). "Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central". Revista EURE. Vol. XXIX. N° 87. Santiago de Chile, septiembre 2003. Pp. 79-92. [En línea]: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S025071612003008700006&lng=es&nrm=iso

BAROS, M. (2010): "Río Blanco y Andina", Visión de Chilenos. Editorial Oligrafic Ltda., Chile. 191p

BCN (S/N) "La región de Valparaíso" [En línea]: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5>

BOCCO, G., MENDOZA, M. y MASERA, O. (2001). "La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía". UNAM México. N° 44. Pp. 18-38. [En línea]: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112001000100003

CASTILLO. A. (2016). "Estudio espacio-temporal del cambio en la superficie agrícola: el caso del área Metropolitana de Santiago, 1975-2015". Memoria para optar al título de Geógrafa, Universidad de Chile. [En línea]: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143514>

CASTRO, C. y BRIGNARDELLO, L. (1998). "Metabolismo y estructuración urbana del Gran Valparaíso: consideraciones ambientales y alcances territoriales del desarrollo urbano en la zona costera". Revista Geográfica de Chile Terra Australis N° 42. Pp. 81-92.

CAMPODÓNICO H. y ORTIZ G. (2002). "Características de la inversión y del mercado mundial de la minería a principios de la década de 2000". CEPAL. 61p. [En línea]: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6409-caracteristicas-la-inversion-mercado-mundial-la-mineria-principios-la-decada-2000>

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). (2014). "Capas de Información Geográfica asociadas al Estudio Agrológico de Suelos". [En línea]: <https://www.ciren.cl/descarga-de-capas/>

CHEN, Y. (2011). "Derivation of the functional relations between fractal dimension of and shape indices of urban form". Comput. Environ. Urban Syst., Pp. 442–451. [En línea]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971511000585>

CHUVIECO E. (2010) "Teledetección Ambiental: La observación de la tierra desde el espacio". Editorial Ariel, S.A.

COHEN, B. (2004). "Urban growth in developing countries: A review of current trends and a caution regarding existing forecasts." *World Dev.*, Pp. 23–51. [En Línea]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X03001967>

COMISIÓN CHILENA DEL COBRE (COCHILCO) (2018): "Producto Interno Bruto por Clase de Actividad Económica". [En línea]: <http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/pages/tabla4/buscar.jsf>

CONAF (2003) "Actualización Catastro de Uso del Suelo y Vegetación, Región de Valparaíso" [En línea]: <http://sit.conaf.cl/exp/ficha.php>

CONSEJO MINERO, (2018). Cifras Actualizadas de la minería. [En línea]: <http://consejominero.cl/wp-content/uploads/2018/05/Cifras-actualizadas-de-la-miner%C3%ADa-Abril-2018.pdf>

DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA (2007) "Mejora de los Sistemas de Cartografía del Territorio Colombiano: Capítulo 3 Teledetección" [En línea]: ftp://ftp.ciat.cqjar.org/DAPA/planificacion/GEOMATICA/Teledeteccion/Teledeteccion_Modulo.pdf

DU, N., OTTERNS, H., y SLIUZAS, R. (2010). "Spatial impact of urban expansion on surface water bodies—A case study of Wuhan, China." *Landscape Urban Plann.*, Pp. 175–185.

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL. (2013): "Proyecto de Expansión Andina 244" CODELCO Chile. "Resumen Ejecutivo" 29 p. Presentación del Proyecto. 26p. Descripción del Proyecto" 261p. [En línea]: http://www.andeshandbook.org/media/comunidad/Resumen_Ejecutivo_Proyecto_Expansion_Andina.pdf

FERNÁNDEZ I. y ATIENZA M. (2009): "Rendimientos crecientes, ventaja comparativa e historia: la formación de la ciudad minera de Antofagasta". Serie GEOlibros N° 12. Pp. 111-131. [En línea]: http://geografia.uc.cl/images/serie_GEOlibros/del_pais_urbano/Fernandez_Atienza.pdf

FIGUEROA M., FUENTES, L. (2009): Expansión urbana y desarrollo económico; El caso del sistema urbano Iquique- Alto Auspicio". Serie GEOlibros N° 12. Pp 149-159. [en línea]: http://geografia.uc.cl/images/serie_GEOlibros/del_pais_urbano/oscar_Figueroa_Luis_Fuentes.pdf

GARCÉS, E. (2010): "Las ciudades del Cobre. Del campamento de montaña al hotel minero como variaciones de la company town ". Comisión Bicentenario, Chile. 159p. [En línea]: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0250-71612003008800006&lng=es&nrm=iso

HERNÁNDEZ, H.J., GALLEGUILLOS, M. y ESTADES, C. (2016). Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014: Descripción del Producto. Laboratorio GEP, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. [En línea]: http://www.gep.uchile.cl/Landcover_CHILE.html

HENRÍQUEZ, C. y AZÓCAR, G. (2007). Propuesta de modelos predictivos en la planificación territorial y evaluación de impacto ambiental. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona, vol. XI, núm. 245 (41). [En línea]: <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-24541.htm>

HENRIQUEZ, C., AZÓCAR G. y ROMERO, H. (2006a). Monitoring and modelling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. Habitat International N° 30. Pp. 945–964. [En línea]: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-4eec110a-2ff4-3a2b-a5cb-395b272b3664>

HENRIQUEZ, C., AZÓCAR, G. y AGUAYO, M. (2006b). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. Revista de Geografía Norte Grande, N° 36. Pp. 61-74. [En línea]: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022006000200004

HENRIQUEZ, C. (2009). El proceso de perifragementación del paisaje urbano en la ciudad intermedia de Chillan y Chillán Viejo. En HIDALGO, DE MATTOS, ARENAS (eds.) Chile: del país urbano al país metropolitano. Colección GEOlibros, Instituto de estudios urbanos y territoriales, Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile. Pp. 369-386. [En línea]: http://geografia.uc.cl/images/serie_GEOlibros/del_pais_urbano/Cristian_Henriquez.pdf

HIDALGO, R., BORSODORF, A. y SANCHEZ, R. (2007a). La expansión residencial amurallada en la reconfiguración metropolitana en Santiago de Chile. Taller Nacional sobre “Migración interna y desarrollo en Chile: diagnóstico, perspectivas y políticas”, Santiago, Chile 10 de abril 2007. [En línea]: <https://www.cepal.org/celade/noticias/paginas/5/28295/RHidalgo.pdf>

INE (Instituto Nacional de Estadística) (2017). Resultados XVIII Censo Población 2017. [En línea]: https://redatam-ine.ine.cl/redbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CENSO_2017&lang=esp

INE (Instituto Nacional de Estadística) (2012). Resultados XVIII Censo Población 2012. [En línea]: http://www.inevalparaiso.cl/contenido.aspx?id_contenido=13

INE (Instituto Nacional de Estadística) (2002). Resultados XVIII Censo Población 2002. [En línea]: https://redatam-ine.ine.cl/redbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CENSO_2002&lang=esp

INE (Instituto Nacional de Estadística) (1992). Resultados XVIII Censo Población 1992. [En línea]:

https://redatamine.ine.cl/redbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CENSO_1992&lang=esp

LINARD C., TATEM A. y GILBERT M. (2013). "Modelling spatial patterns of urban growth in Africa". Appl. Geogr., Pp. 23–32. [En línea]:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622813001707>

LIU, S. H. (2002). "Spatial patterns and dynamic mechanisms of urban land use growth." Prog. Geogr., Pp 43–50.

LONG, R., CHEN, H., LI, H., y WANG, F. (2013). "Selecting alternative industries for Chinese resource cities based on intra- and inter-regional comparative advantages." Energy Policy, Pp. 82–88. [En línea]:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512009329>

LÓPEZ, M (1981): "Expansión de Las Ciudades" EURE, Vol. 8 núm. 22, Pp. 31-42. [En línea]:

<http://www.eure.cl/index.php/eure/article/viewFile/919/34>

LUNGO M. (2000): "Expansión urbana y regulación del uso del suelo en América Latina". [En línea]:

<https://www.lincolninst.edu/publications/articles/expansion-urbana-regulacion-del-uso-del-suelo-en-america-latina>

MERTINS, G. (2000). "Ciudades medianas en América Latina: criterios, indicadores y el intento de un modelo de su diferenciación socio-espacial y funcional". Espacio y Desarrollo, Pp. 123-140. [En línea]:

http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/10028/08.ciudadesmedianas.pdf

MOLINA, M. (2007). "Efectos de los tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área metropolitana de Santiago sobre la generación y comportamiento de micro islas de calor". Memoria para optar al Título de Geógrafo, Universidad de Chile, 119p.

MOSCOSO, C. (2006). Expansión física y cambios de coberturas y usos de suelo en el Área Metropolitana de Valparaíso, V Región, Chile: período 1975-2004. Informe Practica Profesional, Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio Departamento de Geografía. Universidad de Chile, 119p.

PAULEIT, S., ENNOS, R., y GOLDING Y. (2005). "Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change: a study in Merseyside, UK". Landscape and Urban Planning N° 71, Ed. Elsevier. [En línea]:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204604000830>

POLE, K. (2009). Diseño de metodologías mixtas. Una revisión de las estrategias para combinar metodologías cuantitativas y cualitativas. Renglones, revista arbitrada en ciencias sociales y humanidades, núm.60. Tlaquepaque, Jalisco: ITESO [En línea]: http://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/252/katrhryn_pole.pdf?sequence=2

ROMERO, H., ORDENES, F. y VASQUEZ, A. (2003). Ordenamiento Territorial y desarrollo sustentable a escala regional, ciudades intermedias en Chile. En: FIGUEROA, E. y SIMONETTI, J. (eds.) Globalización y biodiversidad: oportunidades y desafíos para la sociedad Chilena. Santiago: Programa interdisciplinario de estudios de Biodiversidad (PIEB), Universidad de Chile. Pp. 167-224.

ROMERO, H. (2006). Análisis espacial del crecimiento urbano y de sus efectos sobre la sostenibilidad ambiental de las metrópolis y ciudades intermedias chilenas. Tesis Doctoral dirigida por el doctor José maría Cuadrat Prats Zaragoza, España primavera de 2006. 521p.

ROMERO, H. y VASQUEZ, A. (2005a). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. EURE (Santiago), vol.31, no.94, Pp. 97-117. ISSN 0250-7161. [En línea]: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612005009400006

ROMERO, H. y VÁSQUEZ, A. (2005b). La comodificación de los territorios urbanizables y la degradación ambiental en Santiago de Chile Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona, vol. IX, núm. 194 (68). [En línea]: <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-194-68.htm>

ROMERO, H., MOLINA, M., MOSCOSO, C., SARRICOLEA, P., SMITH, P. y VASQUEZ, A. (2007). "Caracterización de los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la expansión urbana de Santiago, análisis estadístico de sus factores explicativos e inferencias ambientales". En DE MATTOS C., HIDALGO R. (Editores), Santiago de Chile, Movilidad Espacial y Reconfiguración Metropolitana. Pp. 251-270. [En línea]: <https://www.researchgate.net/publication/40883144>

ROMERO, H. & X. TOLEDO (1998a). "Crecimiento económico y desigualdades regionales en Chile; indicadores de evaluación ambiental estratégica". Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas: Pp. 537-570.

ROJAS C., OPAZO S., y JAQUE E. (2009). "Dinámica y patrones de crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción. Tendencias de las últimas décadas". Serie GEOlibros N° 12. Pp. 257-268. [En línea]: http://geografia.uc.cl/images/serie_GEOlibros/del_pais_urbano/CRojas_Opazo_EJaque.pdf

SANDOVAL, G. (2009). Análisis del proceso de cambio de uso y cobertura de Suelo en la Expansión Urbana del Gran Valparaíso, su evolución y Escenarios Futuros. Memoria para optar al Título de Geógrafo, Universidad de Chile. Pp. 25-28.

SARRICOLEA, P (2008). Análisis de la sustentabilidad del crecimiento urbano de la ciudad de Santiago y sus efectos sobre la configuración de las temperaturas superficiales. Tesis para optar al grado de Magister en Geografía. Universidad de Chile. Pp.31. [En línea]: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/101166/aqsarricolea_pa.pdf?sequence=3

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN) (2018). “Mapa Minero”. [En línea]: <http://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/mapa-minero-de-chile.pdf>

S&P GLOBAL MARKET INTELLIGENCE (2018). “World Exploration Trends”. S&P Global [En línea]: <http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/2018-World-Exploration-Trends-Report-2018-SP-Global-Market-Intelligence.pdf>

SOJA, E. Seis discursos sobre la pos metrópolis. En: MARTÍN, A. (ed.). Lo Urbano en 20 autores contemporáneos. Barcelona: Escola Técnica Superior d’ Arquitectura de Barcelona, 2004, Pp. 91-98.

TAO, L., XUE, X., SHI, L., y GAO, L. (2013). “Urban spatial expansion and its impacts on island ecosystem services and landscape pattern: A case study of the island city of Xiamen, southeast China.” *Ocean Coastal Manage.*, Pp. 90–96. [En línea]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569112002086>

USGS (U.S GEOLOGICAL SURVEY). (2018). EarthExplorer. [En línea]: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

VAN, D., y VOOGD, H. (2001). “Sustainability and planning: Does urban form matter?” *Int. J. Sustainable Dev.*, Pp. 59–74. [En línea]: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSD.2001.001546>

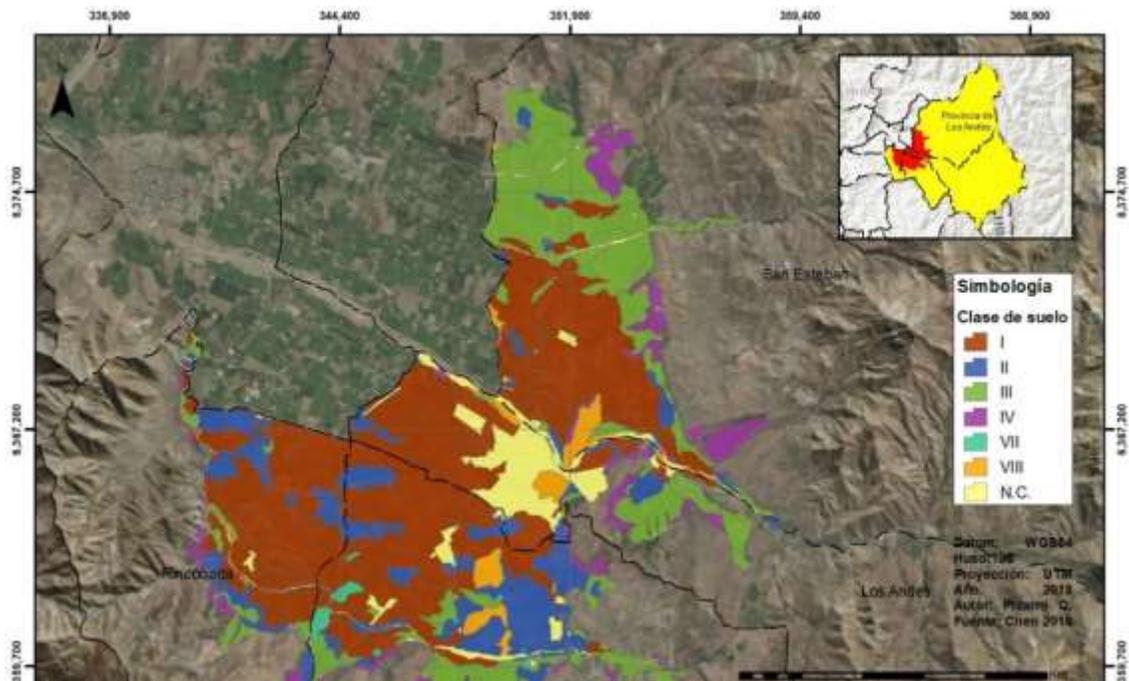
WANG, H., HE S., LIU X., DAI L., PAN P., HONG S. y ZHANG W. (2013). “Simulating urban expansion using a cloud-based cellular automata model: A case study of Jiangxia, Wuhan, China.” *Landscape Urban Plann.*, Pp. 99–112. [En línea]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204612002976>

WANG X., y BAO, Y. (1999). “Study on the methods of land use dynamic change research.” *Progress Geogr.*, Pp. 83–89 (in Chinese).

WEBER C. y PUISSANT A. (2003). “Urbanization pressure and modeling of urban growth: Example of the Tunis metropolitan area.” *Remote Sens. Environ.*, Pp. 341–352. [En línea]: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/urbanization-pressure-and-modeling-of-urban-growth-example-of-the-51lz9VtkGx>

ZHANG X., BAI Z. FAN X., LU Y., YINGU C., ZHAO Z., SUN Q. y PAN J. (2016). “Urban Expansion Process, Pattern, and Land Use Response in an Urban Mining Compositated Zone from 1986 to 2013”. *American Society of Civil Engineers*, Pp. [En línea]: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29UP.1943-5444.0000327>

ANEXOS



Anexo 1: Clases de suelo área de estudio.

Fuente. Ciren 2014.



Anexo 2. Fotografía de Villa Minera Andina, construida en la década del 70, comuna de Los Andes (tomada en julio 2018).

Clases de suelo	1986		1996		2006		2016	
	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%
Urbano	561.31	3.32	898.48	5.31	1662.02	9.82	2988.66	17.66
Agrícola	13515.94	79.88	13912.38	82.22	13265.09	78.40	12397.21	73.26
Cuerpos de Agua	67.86	0.40	45.81	0.27	172.04	1.02	60.80	0.36
Matorral	2302.04	13.60	1485.46	8.78	1195.42	7.07	918.19	5.43
Sin Vegetación	473.72	2.80	577.95	3.42	625.72	3.70	557.74	3.30

Anexo 3. Superficies (hectáreas) de usos de suelo entre 1986 a 2016.

	Urbano	Agrícola	Cuerpos de agua	Matorral	Sin Vegetación	Clasificación overall	Producer accuracy (precision)
Suelo	640	35	1	26	0	702	91.17%
Agrícola	12	636	0	1	0	649	98.00%
Cuerpos de agua	0	0	44	0	0	44	100%
Matorral	16	0	0	646	0	662	97.58%
Sin Vegetación	0	0	0	0	239	239	100%
Truth overall	668	671	45	673	239	2296	
User accuracy (recall)	96%	95%	97.78%	96%	100%		

Anexo 4: Matriz de confusión año 1986.

Fuente: Confusion matrix online calculator

<http://www.marcovanetti.com/pages/cfmatrix/?noc=5>

	Urbano	Agrícola	Cuerpos de agua	Matorral	Sin Vegetación	Clasificación overall	Producer accuracy (precision)
Urbano	316	13	0	4	4	337	93.77%
Agrícola	13	217	0	0	0	230	94.35%
Cuerpos de agua	0	0	24	0	0	24	100%
Matorral	8	0	0	184	24	216	85.19%
Sin Vegetación	13	7	0	15	112	147	76.19%
Truth overall	350	237	24	203	140	954	
User accuracy (recall)	90.29%	91.56%	100%	90.64%	80%		

Anexo 5. Matriz de confusión año 1996.

Fuente: Confusion matrix online calculator

<http://www.marcovanetti.com/pages/cfmatrix/?noc=5>

	Urbano	Agrícola	Cuerpos de agua	Matorral	Sin Vegetación	Clasificación overall	Producer accuracy (precision)
Urbano	448	31	0	4	10	493	90.87%
Agrícola	19	689	0	1	0	709	97.18%
Cuerpos de agua	2	1	19	4	2	28	68%
Matorral	6	0	0	246	27	279	88.17%
Sin Vegetación	77	0	0	14	257	348	73.85%
Truth overall	552	721	19	269	296	1857	
User accuracy (recall)	81.16%	95.56%	100%	91.45%	87%		

Anexo 6. Matriz de confusión año 2006.

Fuente: Confusion matrix online calculator

<http://www.marcovanetti.com/pages/cfmatrix/?noc=5>

	Urbano	Agrícola	Cuerpos de agua	Matorral	Sin Vegetación	Clasificación overall	Producer accuracy (precision)
Urbano	378	41	1	4	4	428	88.32%
Agrícola	9	1385	0	0	1	1395	99.28%
Cuerpos de agua	0	0	31	0	0	31	100%
Matorral	12	0	0	290	61	363	79.89%
Sin Vegetación	7	0	0	15	377	399	94.49%
Truth overall	406	1426	32	309	443	2616	
User accuracy (recall)	93.10%	97.13%	97%	93.85%	85%		

Anexo 7. Matriz de confusión año 2016.

Fuente: Confusion matrix online calculator

<http://www.marcovanetti.com/pages/cfmatrix/?noc=5>

Usos de suelo año	Cambio uso de suelo período 1986-1996				
	Urbano	Superficie agrícola	Cuerpos de Agua	Matorral	Sin Vegetación
Urbano	507.98	-40.84	-0.03	-3.07	-8.99
Superficie Agrícola	-306.12	12398.23	-5.23	-601.88	-179.29
Cuerpos de Agua	-1.1	-11.44	22.02	-1.72	-31.27
Matorral	-54.54	-1277.72	-1.47	849.6	-100.33
Sin Vegetación	-27.36	-156.45	-16.89	-16.97	255.11

Anexo 8. Tabla de superficies de cambio de los usos de suelo entre 1986 y 1996.

Usos de suelo año 1996-2006	Cambio uso de suelo al año 1996-2006				
	Urbano	Superficie agrícola	Cuerpos de Agua	Matorral	Sin Vegetación
Urbano	826.70	-62.22	-2.29	-2.83	-4.75
Superficie Agrícola	-752.17	12195.65	-56.59	-649.96	-230.73
Cuerpos de Agua	-1.66	-4.07	34.51	-0.97	-4.28
Matorral	-49.06	-767.96	-8.57	495.46	-148.60
Sin Vegetación	-32.21	-205.59	-69.12	-36.70	230.91

Anexo 9. Tabla de superficies de cambio de los usos de suelo entre 1996 y 2006.

Usos de suelo	Cambio uso de suelo período 2006-2016				
	Urbano	Superficie agrícola	Cuerpos de Agua	Matorral	Sin Vegetación
Urbano	1544.56	-95.78	-0.55	-12.52	-8.54
Superficie Agrícola	-1258.45	11485.28	-10.01	-310.41	-179.42
Cuerpos de Agua	-18.93	-45.36	44.64	-5.77	-56.46
Matorral	-68.69	-558.73	-2.34	464.05	-92.94
Sin Vegetación	-98.07	-188.82	-2.81	-116.52	215.38

Anexo 10. Tabla de superficies de cambio de los usos de suelo entre 2006 y 2016.



Anexo 11. Fotografía de la Ilustre Municipalidad de Rinconada, ubicada al costado de la carretera San Martín (tomada en julio del 2018)



Anexo12. Fotografía de Villorrio en la comuna de San Esteban (tomada en julio del 2018).



Anexo 12. Fotografía de entrada a un condominio en la comuna de San Esteban (tomada en julio del 2018).



Anexo 13. Fotografía de condominio en la comuna de Calle Larga (tomada en julio del 2018)



Anexo 14. Fotografía de condominio en el sector de Auco, comuna de Rinconada (tomada en julio del 2018)



Anexo 15. Fotografía de Condominio "El Golf", en la comuna de Rinconada. Ubicado a 3 Km de la carretera San Martín (tomada en julio del 2018)

