UNIVERSIDAD DE CHILE
VICERECTORIA DE ASUNTOS ACADÉMICOS
DEPARTAMENTO DE POSTGRADO Y POSTÍTULO
PROGRAMA INERFACULTADES

CONSIDERACIONES AMBIENTALES PARA LA EVALUACIÓN DE LOS USOS ALTERNATIVOS DEL SUELO EN LA CUENCA DEL ESTERO CARÉN, SECTOR PONIENTE DE SANTIAGO

Tesis para optar al Grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental

MELISSA VERÓNICA CARREÑO PITTY

Director de Tesis:

DR. HUGO I. ROMERO ARAVENA

Santiago, CHILE
2009

UNIVERSIDAD DE CHILE
VICERECTORIA DE ASUNTOS ACADÉMICOS
DEPARTAMENTO DE POSTGRADO Y POSTÍTULO
PROGRAMA INERFACULTADES

CONSIDERACIONES AMBIENTALES PARA LA EVALUACIÓN DE LOS USOS ALTERNATIVOS DEL SUELO EN LA CUENCA DEL ESTERO CARÉN, SECTOR PONIENTE DE SANTIAGO

MELISSA VERÓNICA CARREÑO PITTY

Director de Tesis:

Prof. Dr. Hugo Romero Aravena _____

Comisión Evaluadora de Tesis

Presidenta: Prof. MSc M. Adriana Carrasco _____

Informante 1: Prof. Dr. Itato Serey _____

Informante 2: Dr. Wilfredo Alfaro _____

Santiago, CHILE
2009

A mis padres, Heraido y Argelis.
Mis hermanas, Marissa y Argelis.
A mi abuela América, por estar presentes aún en la distancia.
Y a ti, querida tía Beby, por todo tu legado.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Agencia de Cooperación Internacional de Chile, por brindarme la oportunidad de perfeccionarme profesionalmente, a través del programa de Becas de Cooperación Horizontal República de Chile. A las señoras Paulina Soto y Sonia González, por el apoyo brindado durante la realización de mis estudios.

Al Dr. Benjamín Colamarco, Ministro de Obras Públicas y a la señora Blanca Amaya, por la confianza depositada en mí y las gestiones realizadas para extender mi licencia por estudios.

De igual manera, al Dr. Hugo Romero Aravena, director del Magister de Gestión y Planificación Ambiental de la Universidad de Chile y director de tesis por permitirme ser parte de su equipo de trabajo; por compartir sus conocimientos, experiencias y opiniones, por ser ejemplo de perseverancia y dedicación en la ardua tarea del investigador ambiental.

A mis compañeros del Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio de la Escuela de Geografía de la Universidad de Chile, por sus orientaciones, sugerencias, tiempo y amistad.

También agradezco a los profesores miembros de la comisión de evaluación María Adriana Carrasco, Italo Serey y Wilfredo Alfaro, por las correcciones y comentarios emitidos con la finalidad de mejorar esta investigación.

Y finalmente, a todos los buenos amigos que durante este tiempo, pasaron a ser parte de mi familia en Chile.

TABLA DE CONTENIDOS

Pág.

RESUMEN 9
ABSTRAC 10
INTRODUCCIÓN 11
CAPÍTULO 1
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Presentación del problema 14
1.2 Descripción del área de estudio 17
1.2.1 Características generales 17
1.2.2 Características del suelo 19
1.3 Objetivos 23
1.4 Hipótesis 23

CAPÍTULO 2
METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1 Determinación del área de estudio 24
2.2 Identificación de usos/coberturas de suelo 25
2.3 Estimación del coeficiente de escorrentía 27
2.3.1 Cálculo del coeficiente de escorrentía superficial 30
2.4 Simulación de usos/coberturas de suelo para el año 2018 33
2.5 Análisis de la participación de los usos/coberturas de suelo en la variación del coeficiente de escorrentía 39
2.6 Distribución espacial de las zonas con riesgos de inundación y su interrelación con las zonas de expansión urbana 40

CAPÍTULO 3
EXPANSIÓN URBANA Y MEDIO AMBIENTE

3.1 Características del proceso de expansión urbana 41
3.2 Urbanización de cuencas 42
3.2.1 Urbanización y ciclo hidrológico 44
3.2.2 Pérdida de servicios ambientales 45
3.3 Evolución del plan regulador metropolitano de Santiago 47
3.3.1 Parque científico tecnológico de la Universidad de Chile 50
3.3.2 Proyecto Praderas 52
3.4 Análisis de las declaraciones de impacto ambiental de los PDUC dentro de la cuenca del estero Carén. 55

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Pág.

4.1 Evolución de usos y coberturas de suelo en la cuenca del estero Carén 58
4.1.1 Usos/coberturas de suelos para el año 1996 60
4.1.2 Cambios en los usos/coberturas de suelo 1996-2001 62
4.1.3 Cambios en los usos/coberturas de suelo 2001-2007 63
4.1.4 Usos/coberturas de suelo para el año 2018 66
4.2 Cambios en el coeficiente de escorrentía superficial 71
4.2.1 Participación de los usos/coberturas de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial 77
4.3 Relación de las zonas con riesgo de inundación y las zonas de Expansión urbana. 80

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 Discusión de resultados 83
5.2 Conclusiones 90
5.3 Recomendaciones 92

BIBLIOGRAFÍA 94
ANEXOS 100

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ANEXOS

FIGURAS Pág.

Figura 1. Área de estudio. 18
Figura 2. Población del área de estudio según el censo de 2002. 19
Figura 3. Series de suelos dentro del área de estudio. 22
Figura 4. Módulo hydrology, extensión spatial analyst de ArcGis 9.2 25
Figura 5. Series de suelo dentro del área de estudio. 29
Figura 6. Matriz de comparación de pares. 34
Figura 7. Ponderaciones para forzamientos del uso industrial. 34
Figura 8. Imágenes de aptitud simulación 2018. 38
Figura 9. Módulo land change modeler, Idrisi Andes 39
Figura 10. Escurrimiento superficial pre y post-urbanización en cuencas Urbanas. 22
Figura 11. Recarga y descarga de acuíferos. 43
Figura 12. Plan maestro de uso de suelos, parque científico tecnológico de la Universidad de Chile. 52
Figura 13. Proyecto con desarrollo condicionado Praderas 53
Figura 14. Plan maestro PDUC Praderas. 54
Figura 15. Evolución de los usos de suelo urbanos. 59
Figura 16. Evolución de los usos de suelo no urbanos. 60
Figura 17. Usos/coberturas de suelos, 1996. 61
Figura 18. Cambios de uso/cobertura de suelo, 1996-2001. 63
Figura 19. Cambios de uso/cobertura de suelo, 2001-2007. 64
Figura 20. Usos/coberturas de suelos del área de estudio, 2001-2007 65
Figura 21. Comparación de usos/coberturas de suelos 2007-2018. 67
Figura 22. Evolución de los usos de suelo urbanos, 1996-2018. 68
Figura 23. Evolución de los usos de suelo no urbanos, 1996-2018. 69
Figura 24. Cambios de usos/coberturas de suelo, 2007-2018. 70
Figura 25. Tasa de impermeabilización por uso/cobertura de suelo 71
Figura 26. Coeficientes de escorrentía de la cuenca del estero Carén, 1996-2018. 73
Figura 27. Estados del coeficiente de escorrentía superficial durante el período de estudio, 1996-2018. 75
Figura 28. Coeficiente de escorrentía superficial, microcuenca Lo Aguirre. 76
Figura 29. Participación de los usos de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial, 1996. 77
Figura 30. Participación de los usos de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial, 1996-2001. 78
Figura 31. Participación de los usos de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial, 2001-2007. 78

Figura 32. Participación de los usos/coberturas de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial, 2001-2007 79
Figura 33. Zonas con riesgo de inundación, cuenca del estero Carén. 81
Figura 34. Profundidad de acuíferos, cuenca del estero Carén. 82

TABLAS

Tabla 1. Tipología de los usos/cobertura del suelo. 26
Tabla 2. Grupos hidrológicos. 28
Tabla 3. Clasificación de los suelos de las comunas de Pudahuel y Lampa según grupo hidrológico y condición de infiltración. 28
Tabla 4. Restricciones y forzamientos de la evaluación multicriterio 35
Tabla 5. Usos de suelo parque científico tecnológico 51
Tabla 6. Superficies generales proyecto Praderas 54
Tabla 7. Superficies de los usos/coberturas de suelos, 1996-2007. 58
Tabla 8. Superficies de los usos/coberturas de suelos, 1996-2018. 66
Tabla 9. Máximo potencial de retención (S), escorrentía real (Pe) y coeficiente de escorrentía superficial, según uso y cobertura de suelo. 72

ANEXOS

Anexo 1. Fotografía del área de estudio 100
Anexo 2. Tipología de usos/coberturas de suelo utilizados para la fotointerpretación. 101
Anexo 3. Precipitación total anual dentro de la cuenca del estero Carén 103
Anexo 4. Índice de escorrentía superficial para la cuenca del estero Carén 103
Anexo 5. Índice de escorrentía superficial para la microcuenca Lo Aguirre 103
Anexo 6. Proyectos con desarrollo condicionado dentro de la cuenca Carén y Microcuenca Lo Aguirre. 104

RESUMEN

La falta de suelos urbanizables dentro de la ciudad de Santiago, promueve los cambios de uso de suelo en áreas tradicionalmente agrícolas, ejerciéndose presión sobre las grandes extensiones de terrenos ubicados al poniente (comunas de Pudahuel y Lampa).

Con el propósito de evaluar los efectos ambientales de estos cambios, se analizaron la escorrentía superficial y las zonas con riesgo de inundación observadas en la cuenca del estero Carén, a través del reconocimiento de los patrones de crecimiento urbano para el período 1996-2007, y la simulación de los mismos para el año 2018, a través de los sistemas de información geográfica (SIG).

Las áreas totales impermeables dentro de la cuenca, alcanzan el 3,8% de la superficie total de la misma, evidenciando que las intervenciones antrópicas hasta el momento han sido mínimas y por ende las variaciones del coeficiente de escorrentía también. Sin embargo al aumentar las superficies impermeables asociadas a la urbanización, el coeficiente de escorrentía aumentaría para el año 2018, potenciando las zonas con riesgo de inundación.

De acuerdo a los resultados, el área de estudio requerirá de planes de conservación de la naturaleza y gestión integrada de cuencas, con el objetivo de contrarrestar los efectos de la expansión urbana.

Palabras claves: cambios de uso de suelo, superficies impermeables, coeficiente de escorrentía, riesgo de inundación, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

The lack of land for housing in the city of Santiago de Chile, promotes changes in land use in traditional agricultural areas, the pressure on large tracts of areas on the west side of the city(district lamps and Pudahuel).

With the aim of assessing the environmental impacts of these changes, the runoff and flood risk areas, were analyzed in the basin of Caren's estuary, through the recognition pattern of urban growth from 1996 to 2007 and simulating it in the year 2018, using geographic information systems (GIS).

The total impervious area within the basin, reaches 3.8% of the same, showing that anthropics intervention at the time has been minimal, and for this reason, the variation of runoff coefficient has the same change. However, the increase in impervious surfaces associated with urban development, could increase the runoff coefficient for 2018 and increased the flooding risk.

According to the results, the study area needs to a plan for nature conservation and watersheds integrated management, to reduce the effects of urban sprawl.

Keywords: land changes, impervious surfaces, runoff coefficient, flooding risk, geographic information systems.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las áreas urbanas, es uno de los problemas más significativos de las ciudades modernas, principalmente por su impacto y permanencia (Rogers y Burens, 2005). Los países latinoamericanos no escapan de esta realidad (Borsdorf, 2000) al observarse la expansión de las ciudades hacia zonas periféricas, donde predominan los suelos de tipo agrícola y remanentes de coberturas naturales, como bosques, humedales y matorrales.

América Latina y el Caribe, son las regiones más urbanizadas, con el 77% de su población viviendo en áreas urbanas y se espera que continúe urbanizándose dentro de las próximas dos décadas, cuando la proporción de la población urbana alcance el 85% (UN-HABITAT, 2008b).

Como parte de la región, la ciudad de Santiago de Chile, ha experimentado un acelerado crecimiento de sus superficies urbanas desde 1975 hasta la actualidad, debido a la economía liberalizada que rige el sistema (Romero y Vásquez, 2006), pasando de ser una ciudad compacta a una ciudad fragmentada, creciendo hacia las periferias y reemplazando coberturas naturales por urbanas (Fuentes, 2009). La ciudad registró un crecimiento de 12.049,60 hectáreas, aumentando su superficie en un promedio de 1.339 hectáreas por año entre 1991 y 2000, cifra muy superior a las observadas en décadas anteriores. El conglomerado urbano creció en todas las direcciones, con una marcada diferencia en el uso del suelo: los urbanos (de uso residencial) hacia el oriente y los industriales (combinados con uso residencial) hacia el poniente, siendo este último el escenario observado en comunas como Colina, Maipú y Pudahuel (Ducci, 2002).

Actualmente, la ciudad de Santiago se enfrenta a una nueva modalidad de expansión de la superficie urbana, que involucra directamente a las empresas inmobiliarias. Esto se debe a las nuevas directrices de planificación territorial de la ciudad, que emanan de la modificación hecha en 2003 al Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS). En este contexto, la comuna de Pudahuel –una de las 18 comunas en que se

ha dividido la ciudad para su administración- se ve afectada pues la modificación propone localizar aquí Proyectos con Desarrollo Urbano Condicionado (PDUC), que validan legalmente la extensión de los bordes urbanos hacia comunas periféricas con disponibilidad de suelo rural (Romero y Vásquez, 2005).

La Comuna de Pudahuel se sitúa al poniente de la ciudad y sirve de interfaz entre la llanura y la Cordillera de la Costa, siendo drenada por numerosos cauces fluviales, entre los cuales se encuentra el estero Carén. Esta cuenca constituye un remanente de espacios naturales, que aunque intervenido antrópicamente, conserva rasgos que la transforman en atractiva para propósitos de conservación y recreación. Esta última es frecuentemente practicada por los habitantes de este sector de la ciudad, mayoritariamente de bajos recursos económicos y que viven en zonas con importantes déficits de áreas verdes y sitios de recreación.

Este estudio pretende reconocer los patrones de crecimiento urbano del sector poniente de la ciudad de Santiago, comunas de Pudahuel y Lampa, y evaluar los efectos de la incorporación de los PDUC, contemplados en el Plan Regulador Metropolitano de Santiago, sobre paisajes rurales que, de permanecer sin este tipo de intervenciones, podrían servir mejor a los propósitos de conservación ambiental.

Para ello se han seleccionado dos indicadores ambientales, el coeficiente de escorrentía (CE) superficial y las áreas totales de impermeabilización (ATIs), que permiten cuantificar el grado y magnitud de las intervenciones antrópicas que han ocurrido en años recientes y que podrían suceder en los próximos, de concretarse los planes de localización de nuevas áreas urbanas. El coeficiente de escorrentía, se define como el cociente entre la cantidad de agua que escurre superficialmente (Pe) y la precipitación de tormenta (P) (Henríquez et al., 2006), considerando las características naturales del suelo y las superficies impermeables asociadas principalmente a usos urbanos. En tanto las ATIs, representan la totalidad de las áreas impermeables dentro de la cuenca, que resultan de la adición ponderada de las superficies impermeables por cada uso/cobertura de suelo (calles, patios, estacionamientos y cubiertas pavimentadas, etc.). Las ATIs aumentan con la

urbanización de las cuencas y por lo tanto se relacionan directamente el CE (Romero y Vásquez, 2005).

Por otro lado, se aplicará un modelo de simulación de cambio de usos/coberturas de suelo para el año 2018, con el fin de prever los impactos que sobre el medio ambiente ejerce la expansión urbana (Henríquez, 2006), particularmente a través del coeficiente de escorrentía.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Presentación del problema

Los efectos ambientales del cambio de uso de suelo y el crecimiento de las superficies urbanas, han sido evaluados en las ciudades de Viña del Mar, Valparaíso, Los Ángeles, Concepción y en las cuencas del Piedemonte Andino de la ciudad de Santiago, evidenciándose la alteración de los componentes del ciclo hidrológico, la pérdida de coberturas vegetales en desmedro de la biodiversidad y la reducción/desaparición de hábitats, la pérdida de servicios ambientales y los cambios en las temperaturas superficiales de las ciudades (Romero y Vásquez, 2005; Henríquez, 2006; Moscoso, 2007; Smith, 2007; Fuentes, 2009; López, 2009).

Sin embargo, las condiciones hídricas, ambientales y geográficas, así como los usos de suelo dentro de la cuenca del estero Carén, difieren de las encontradas en otras zonas, además de tratarse de una parte de la ciudad sometida a un intenso, reciente y rápido proceso de expansión urbana y sustitución de los usos y coberturas de suelos rurales. Se pretende entregar antecedentes sobre la relación entre la expansión urbana, la escorrentía superficial y el aumento de zonas con riesgo de inundación en el área de estudio y así, aportar información útil para el proceso de toma de decisiones de naturaleza estratégica. Entre las decisiones estratégicas que vale la pena considerar se encuentra la necesidad de evitar o regular ampliamente la urbanización de estas áreas que rodean la ciudad, siendo posiblemente más valioso que favorecer el crecimiento de la ciudad, asegurar que se mantengan las condiciones rurales y con ello, las fuentes de servicios y bienes ambientales que son mayormente demandados por los sectores sociales más vulnerables que aquí residen. Las comunas del poniente de la ciudad registran los mayores índices de concentración de partículas contaminantes de la atmósfera, así como la mayor ocurrencia de anegamientos e inundaciones, debido tanto a su localización en los márgenes del río Mapocho como al hecho que se trata de las áreas topográficamente más deprimidas del sitio en que se asienta la urbe. Lamentablemente, el proceso indiscriminado de expansión urbana de la ciudad, no ha considerado hasta ahora la necesidad de proteger espacios y paisajes naturales, debido a su valor intrínseco en medio del avance irreversible del cemento.

Por otro lado, las evidencias permiten indicar que hasta ahora el patrón de urbanización es algo más complejo y diferente que otras áreas de la ciudad. Por un lado, se encuentran los proyectos con desarrollo urbano condicionado, que contemplan áreas residenciales segregadas y excluyentes para habitantes de grupos sociales de ingresos medios y medio altos, que hasta ahora han sido minoritarios en las comunas del poniente. No se conocen aún los efectos socioambientales de estas penetraciones sociales en espacios previamente homogéneos y se discute si contribuyen a disminuir la segregación social debido a la aproximación física de sus residentes o bien si se trata sólo de un cambio de escala, que aumentará la segregación y exclusión entre grupos social, económica y culturalmente diferentes. Igualmente, la complejización de las infraestructuras, tales como el aumento de las autopistas, la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad que se encuentra en las cercanías y en torno al cual se están construyendo enormes superficies urbanas ocupadas por residencias, industrias, bodegas, servicios, y el acercamiento que produce entre diversos centros de la ciudad, augura un aumento de las intervenciones que va encerrando y restringiendo paulatinamente áreas como el estero y Laguna de Carén. Adicionalmente, instituciones como la Universidad de Chile proyectan instalar en el área un Complejo Académico y Tecno-Industrial, que no sólo transformará completamente el paisaje con sus construcciones vanguardistas sino que además atraerá sin duda el establecimiento de edificios residenciales, centros comerciales y áreas de servicios, en un corto plazo.

Otro antecedente valioso lo constituye la observación de algunos de los proyectos inmobiliarios instalados en los últimos años, como es el caso de Ciudad de los Valles y Lomas de Lo Aguirre, ubicados ambos en el borde la carretera que une Santiago con Valparaíso y que por ello, asegura un rápido desplazamiento hacia la costa, o bien hacia el centro de la ciudad y hoy hacia el oriente a través de la Costanera Norte o autopista concesionada que vincula fácilmente el poniente y oriente de la ciudad. Si bien existen importantes diferencias en las densidades, diseños urbanos y estratificación social entre los habitantes de Ciudad de los Valles y Lomas de Lo Aguirre, se trata en ambos casos de la intervención intensiva de microcuencas desde las alturas de la Cordillera de la Costa hacia el río Mapocho. Más allá de los riesgos de inundación y remoción en masa que se aprecia en los conos de deyección de

sedimentos que han ocupado- claramente aumentados por la completa desforestación de las laderas de los cerros-, no queda claro en absoluto cuál es el aporte de estos conjuntos habitacionales sobre la naturaleza y el paisaje de sus propios sitios o bien sobre la calidad de vida de sus habitantes. Especialmente en el caso de Ciudad de los Valles, se observa un conjunto habitacional de alta densidad, carente de áreas verdes, servicios y funciones que justifiquen su habilitación fuera de los límites urbanos de la ciudad.

Ante estas dudas en la gestión del espacio urbano y social, el escaso impacto actualmente advertido de la urbanización sobre los paisajes rurales y el eventual valor ecológico y ambiental de algunas áreas, es posible que resulte preferible mantener estos sectores de la cuenca fuera del proceso de expansión urbana o bien regularlo en cuanto a densidades y diseños de los proyectos inmobiliarios, algo que se ha relajado enormemente por la debilitación de los instrumentos de planificación de los territorios urbanos, los intentos de privatización de los espacios públicos, la ausencia de planes de gestión ambiental y la mercantilización de los paisajes y sus recursos.

1.2 Descripción del área de estudio

1.2.1 Características generales

El área de estudio (Figura 1) corresponde a la cuenca del estero Carén, la cual se encuentra inserta dentro de la comuna de Pudahuel. Sin embargo, para el presente trabajo además de incluir parte de esta comuna, también se consideró la zona sur de la comuna de Lampa debido a que ambas se ubican en el sector poniente de la Región Metropolitana, adyacentes a la cordillera de la costa y con grandes extensiones de suelo, propicio para la expansión urbana. Además de la mencionada cordillera, la orografía del sector se complementa con formaciones de menor altura como los cerros Lo Vásquez, Lo Aguirre, Amapola, Las Minas, El Paragua y Lipangue. La zona central está formada por un valle recorrido por los esteros Lampa y Carén los cuales, junto a quebradas y canales de regadío, forman la hidrografía del área. Las aguas del Estero Lampa desembocan en el Río Mapocho, mientras que las del estero Carén lo hacen en la laguna del mismo nombre.

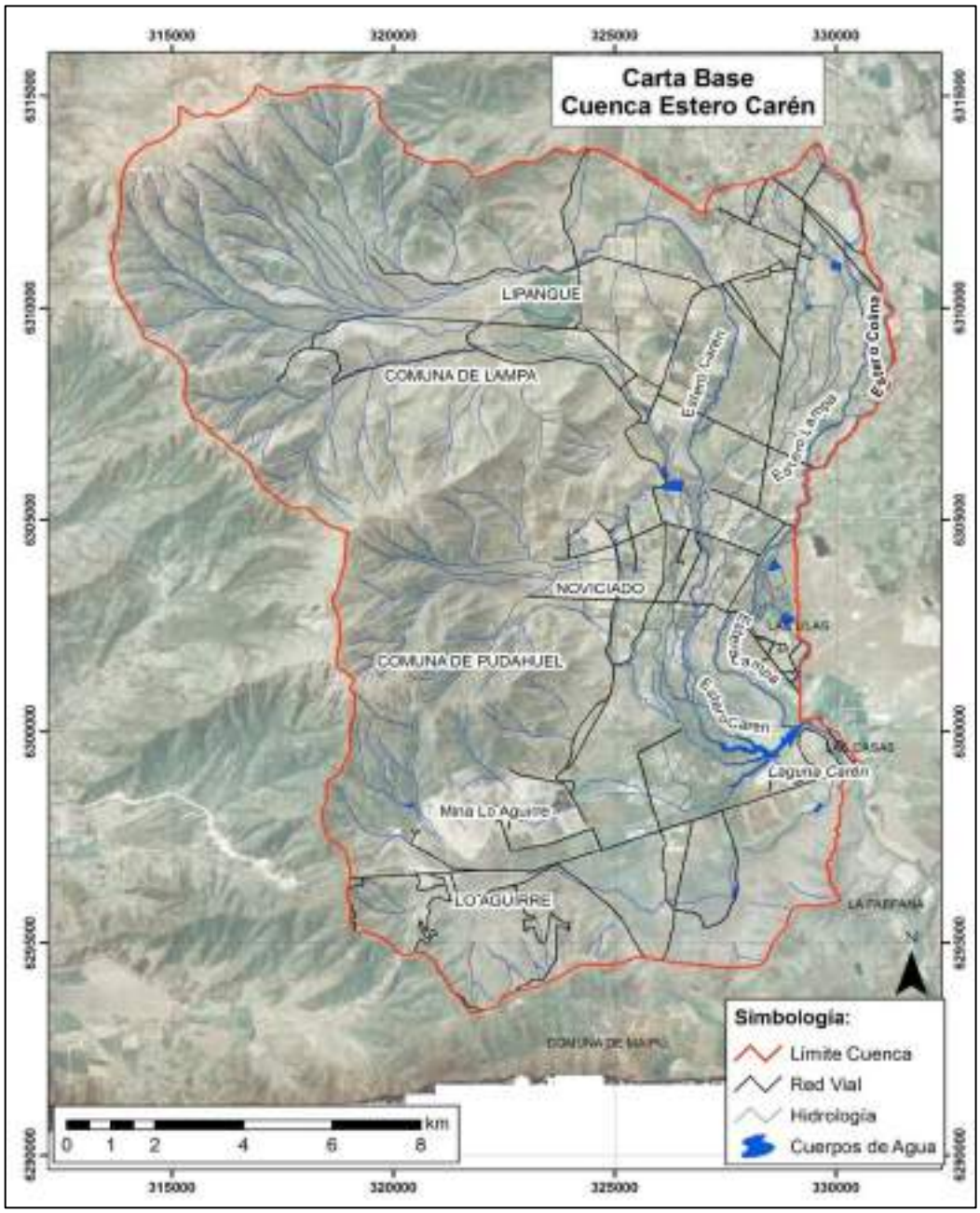
Por encontrarse dentro de la Región Metropolitana, el área de estudio presenta iguales condiciones climáticas: clima templado cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada (entre siete u ocho meses); precipitaciones entre mayo y agosto, alcanzando un promedio anual de 262 milímetros (Anexo 3) y una diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas diarias, que oscila entre los de 14℃ y 16℃ [1], esto quiere decir que en un mismo día la temperatura máxima puede alcanzar los 22℃, mientras que la mínima no supera los 8℃. La cordi llera de la costa, que se presenta alta y maciza, separa completamente la cuenca de Santiago de la costa y no permite la influencia climática marina, a menos que los niveles de inversión térmica (el límite hasta el cual las temperaturas del aire aumentan en vez de disminuir en función de la altura) superen los 1.000 metros de altitud.

Como consecuencia de las limitadas precipitaciones y las relativamente elevadas temperaturas, la región presenta altos niveles de evaporación y un casi permanente déficit hídrico, de lo que resultan sus paisajes áridos. En lo referente a vegetación, el área de estudio se encuentra dentro de la Región Vegetal Matorral y Bosque

1 http://www.meteochile.cl/climas/climas_region_metropolitana.html

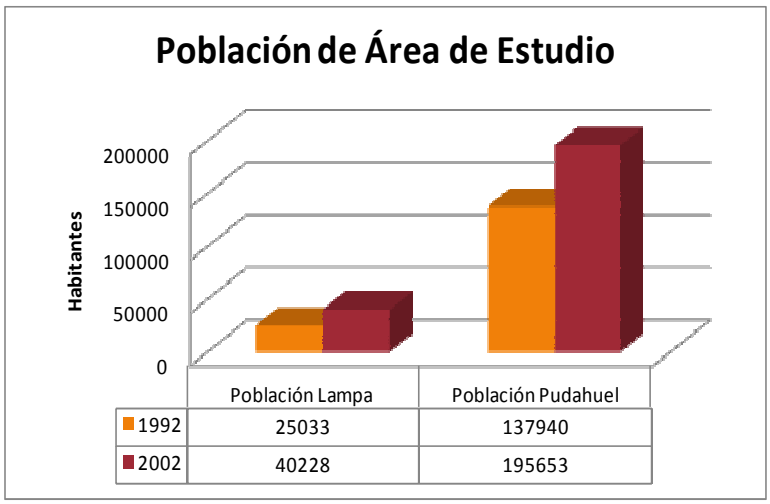
Esclerófilo, sub-región Bosque Esclerófilo y Matorral-Bosque Espinoso (Gajardo, 2004). Aunque predominan los arbustos espinosos como el Algarrobo (*Prosopis chilensis*) y el Espino (*Acacia caven*), la vegetación nativa ha sido eliminada para dar paso a tierras de cultivos y zonas urbanas.

Figura 1. Área de estudio, cuenca del estero Carén.



Hasta hace unos treinta años el área en mención, representaba una realidad eminentemente rural. Sin embargo, el crecimiento del núcleo urbano de Santiago alteró rápidamente esta situación (Anexo 1). Según el censo de 2002 (Figura 2), la comuna de Pudahuel contaba con una población de 195,653 habitantes, una variación de 41.8% con respecto al censo de 1992 y una población urbana de 192,258 habitantes. Por su parte, la comuna de Lampa contaba en 2002 con una población de 40, 228 habitantes, una variación de 60.7% en relación al censo de 1992 y una población urbana de 28,229 habitantes (INE, 2002).

Figura 2. Población del área de estudio según el censo de 2002.



1.2.2 Características del suelo

El área de estudio presenta heterogeneidad respecto de los tipos de suelos; predominan al nororiente y suroriente, suelos franco arcillosos y franco arenosos, con drenajes que van de moderado a bueno; en tanto al sur y en el valle central, donde las pendientes son casi planas, predominan los suelos franco arcillosos a arcillosos limosos con drenajes que van de imperfecto a muy pobre.

Los suelos con perfiles y características similares, se agrupan en series de suelos; pueden presentar diferentes texturas e inclinaciones, dando lugar a variaciones, sin embargo, el nombre de la serie corresponde al perfil predominante. Las características

del suelo relacionadas a su capacidad de infiltración (proceso por el cual el agua penetra al suelo), se describen a continuación para cada una de las series de suelo dentro del área de estudio. Estas se asocian a la pendiente del terreno, textura superficial o el grado de compactación de la superficie, la profundidad de la napa freática, entre otros (Castro, 2006).

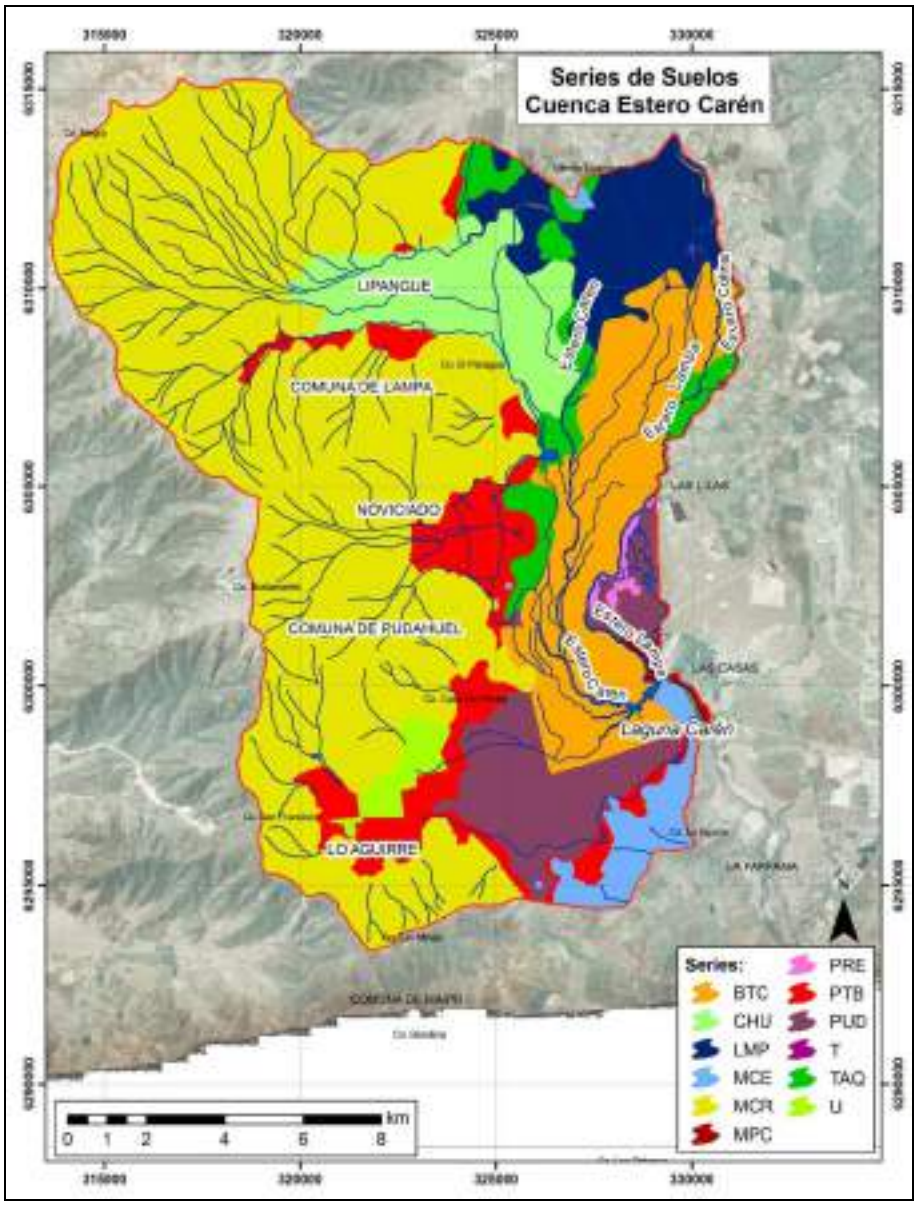
- Serie Lampa (LMP): Suelos franco arenoso de origen-coluvial; drenaje interno bueno, lo que quiere decir que el agua es removida del suelo fácilmente pero no rápidamente; la permeabilidad es rápida (25 cm/hora) (CIREN-CORFO, 1996).
- Serie Chicauma (CHU): Suelos areno francoso sobre substrato aluvial de arenas, gravas y piedras; excesivamente drenado, por lo tanto el agua es removida del suelo muy rápidamente; la permeabilidad es rápida (25 cm/hora) (CIREN-CORFO, 1996).
- Serie Pudahuel (PUD): Suelos planos a casi plano (1-2% de pendiente) de origen fluvio – glacial que descansa sobre un substratum compactado de material pumicítico; el drenaje es imperfecto, lo que quiere decir que el agua es removida del suelo lentamente, suficiente para mantenerlo húmedo por períodos, pero no durante todo el tiempo; permeabilidad moderadamente rápida (12.5 cm/hora) (CIREN-CORFO, 1996).
- Serie Piedmont Cuesta Barriga: Suelos de origen aluvio coluvial, moderadamente profundos en posición de plano ligeramente inclinado y que descansan sobre substrato coluvial de gravas y piedras con matriz franco arcillo arenosa; bien drenados, el agua es removida del suelo fácilmente pero no rápidamente; permeabilidad moderadamente lenta (0.5 cm/hora) (CIREN-CORFO, 1996).
- Serie Mapocho (MPC): Suelos de origen aluvial, profundos, con pendientes dominantes de 0 a 1% en las riberas del río Mapocho; el drenaje varía de bueno a moderado, siendo el agua removida lentamente; la permeabilidad se encuentra entre moderada y moderadamente rápida (2 a 12.5 cm/hora) (CIREN-CORFO, 1996).
- Serie Batuco (BTC): Suelos arcilloso limoso a franco arcillo arenoso; el drenaje es moderadamente bueno, siendo que el agua es removida lentamente, de tal

forma que el pedón está húmedo por poca pero significativa parte del tiempo; la permeabilidad varía de lenta a muy lenta (CIREN-CORFO, 1996).

- Serie Taqueral (TAQ): Suelos franco limoso sobre sustrato arcilloso, aluvial; el agua es removida del suelo fácilmente pero no rápidamente; la permeabilidad varía de moderadamente lenta a muy rápida (0.5 a 25 cm/hora) (CIREN-CORFO, 1996).
- Serie Peralillo (PRE): Suelos arcillosos con características vérticas, saturación y acumulación de sales; suelos muy pobremente drenados, donde el nivel freático permanece en o sobre la superficie en la mayor parte del tiempo; la permeabilidad que presentan es lenta (0.5 cm/hora) (CIREN-CORFO, 1996).
- Tipos Misceláneos de Terrenos: Se usan en cartografía de suelos, para mostrar áreas que tienen poco o casi nada de suelos naturales o bien inaccesibles para un estudio ordenado (CIREN-CORFO, 1996). Dentro del área de estudio se encontraban los siguientes:
    - Misceláneo Cerro (MCE): áreas que teniendo topografía de cerros presentan pendientes superiores a 35%, de difícil acceso y ninguna utilización agrícola (CIREN-CORFO, 1996).
    - Misceláneo Caja de Río o Estero (MCR): formado por gravas y piedras redondeadas; excesivamente drenado, por lo que el agua es removida del suelo muy rápidamente.

La Figura 3, muestra la distribución espacial de todas las series de suelos dentro del área de estudio.

Figura 3. Series de suelos dentro del área de estudio.



1.3 OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar los efectos ambientales que produce sobre la cuenca del estero Carén, la incorporación de los Proyectos con Desarrollo Urbano Condicionado (PDUC), al Plan Regulador Metropolitano de Santiago.

Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento de la escorrentía superficial dentro de la cuenca del Estero Carén, entre los años 1996 – 2007, y proyectarlo para el año 2018, como resultado de la incorporación de PDUC al Plan Regulador Metropolitano de Santiago.

- Identificar los usos/coberturas de suelo, que influyen en el aumento o disminución del coeficiente de escorrentía para el período de estudio 1996-2007, en la cuenca del estero Carén.

- Evaluar la distribución espacial de las zonas con riesgo de inundación y su interrelación con zonas de expansión urbana, en la cuenca del estero Carén.

1.4 HIPÓTESIS

- El impacto de la expansión urbana sobre el coeficiente de escorrentía superficial, varía de acuerdo a la escala de estudio, al tiempo que produce cambios en el patrón de crecimiento de los usos y coberturas de suelos, afectando directamente los componentes del ciclo hidrológico.

- La cercanía de la urbanización a suelos con drenajes moderados o imperfectos, sumado a la profundidad de los acuíferos, potencia los riegos de inundación dentro de una cuenca.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE TRABAJO

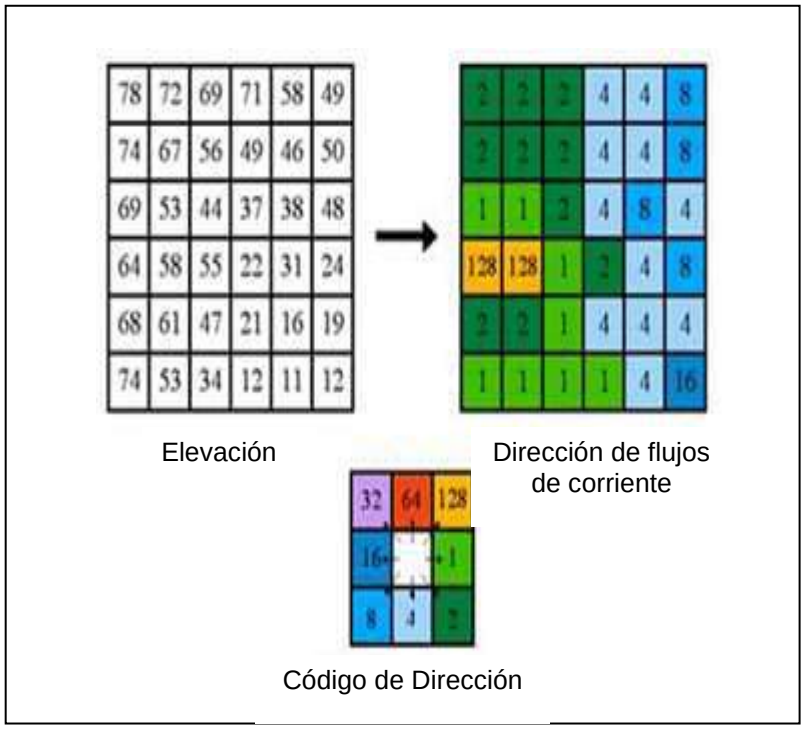
2.1 Determinación del área de estudio

Una cuenca hidrográfica corresponde a un espacio de tierra limitado por características topográficas (divisoria de aguas) que drenan agua ha un destino común como un lago, río u océano. Para el caso de Chile, y particularmente del área de estudio, utilizar la cuenca hidrográfica como unidad de análisis presenta serias dificultades de escala. En estricto rigor, la cuenca hidrográfica correspondería a la del río Mapocho, cuya divisoria de aguas se encuentra en la cordillera de la costa y de los Andes. En este sentido, es un área muy amplia apara implementar procesos de planificación y manejo del medio ambiente. Entonces parece prudente recurrir a subunidades de análisis, como las subcuencas y microcuencas, entendiendo que dentro de esta jerarquía anidada se podrían inferir condiciones de manejo para toda la cuenca.

Tal como lo reconoce la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) una microcuenca es “una pequeña cuenca de primer o segundo orden (…). Desde el punto de vista operativo, la microcuenca posee un área que puede ser planificada por un técnico contando con recursos locales y/o un número de familias que pueda ser tratado como un núcleo social que comparte algunos intereses comunes”. Así se ha elegido la subcuenca del estero Carén como unidad de análisis y la microcuenca de Lo Aguirre por ubicarse dentro de ella los PDUC. Sin embargo para simplificar la lectura del texto, nos referiremos a las mismas como cuenca del estero Carén y microcuenca de Lo Aguirre.

Para la determinación del área de estudio comprendida en la Cuenca del Estero Carén, se procesaron las cotas y curvas de nivel de las comunas de Pudahuel y Lampa, obtenidas del proyecto Ordenamiento Territorial Ambientalmente Sustentable de Santiago (OTAS), a través de las extensiones 3D Analyst y Spatial Analyst del programa ArcGis 9.2. La finalidad de este proceso fue determinar la dirección de los flujos de corriente, mediante el módulo Hydrology de la extensión Spatial Analyst (Figura 4), el cual asigna a cada píxel un valor que indica la dirección de los flujos dentro de una cuenca.

Figura 4. Módulo Hydrology, Extensión Spatial Analyst de ArcGis 9.2



2.2 Identificación de usos/coberturas de suelo

El uso del suelo se define en función de la actividad humana que se realiza sobre él (urbano, industrial, áreas verdes) y el beneficio específico recibido de esa actividad. En tanto, la cobertura de un suelo se define por sus características físicas (cuerpos de aguas, cultivos). Tomando en consideración lo anterior y los estudios realizados por Sekliziotis (1980), Pauleit et al. (2005), Romero (2006), Moscoso (2007) y Fuentes (2007), se elaboró la tipología de usos y cobertura de suelo. Esta tipología (Tabla 1) clasifica la información en tres niveles: primero, considera los usos/coberturas de suelo separándolos en construido y no construido; segundo, identifica propiamente los usos/cobertura del suelo, por ejemplo: industrial, transporte, vegetación; y tercero, clasifica específicamente cada uno de ellos en base a sus características propias, por ejemplo con vegetación densa o con vegetación dispersa.

Tabla 1. Tipología de los usos/coberturas de suelo.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Descripción
Construido	Residencial	Urbano Media Densidad	Áreas continuas de viviendas que presentan espacios con vegetación.
		Urbano Baja Densidad	Áreas continuas de viviendas, de carácter suburbano que presentan espacios con vegetación.
		Parcelas de Agrado	Áreas continuas de viviendas fuera de la red urbana que presentan grandes espacios con vegetación.
	Industrial	Industria	Zonas almacenamiento comercial o agrícola.
	Transporte	Red Vial	Conexiones principales y de segundo orden.
No Construido	Vegetación	Área Verde	Áreas con vegetación creada, tanto en la red urbana como fuera de ella (plazas, parques).
		Agrícola	Zonas dedicadas a la explotación primaria de hortalizas y/o frutas.
		Vegetación Dispersa	Áreas de vegetación herbácea y arbustiva con espacios considerables entre los individuos.
		Vegetación Densa	Formación vegetal. de árboles y arbustos donde cada individuo esta cerca de otro
	Hidrografía	Cursos de Agua	Cursos naturales de drenaje de agua (río, estero, canal)
		Estanque	Acumulación artificial de agua.
	Otros	Minería	Área de actividad extractiva ligada a algún mineral o roca.

Fuente: Elaboración propia, basada en Romero, 2007 y Fuentes, 2007.

La tipología fue aplicada a fotografías aéreas, que proporcionaban mayor detalle al momento de la fotointerpretación. Las fotografías de 1996 y 2001 fueron tomadas por el Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile (SAF) y la Corporación Nacional Forestal junto a la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAF-CONAMA) respectivamente. Para fotointerpretar los usos/coberturas de suelo del año 2007, se elaboró un mosaico de fotografías con la ayuda del programa Google Earth (Anexo 2).

El procesamiento de las fotografías aéreas, fue realizado a través de la elaboración de una grilla (25m x 25m), utilizando para estos efectos el programa ArcView 3.2 y su extensión AV Primed. Posteriormente, se colocó la grilla sobre cada unas de las fotografías para iniciar la fotointerpretación.

2.3 Estimación del coeficiente de escorrentía

El modelo de la curva número (CN) fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS, actualmente Natural Resources Conservation Service - NRCS) de Estados Unidos durante los años cincuenta, con el objetivo de estimar la escorrentía superficial en pequeñas cuencas agrícolas, considerando las condiciones de cobertura y el tipo de suelo determinados. Posteriormente se desarrolló su aplicación para áreas urbanas (Ferrer et al., 2004).

Por lo tanto, la metodología utilizada corresponde al modelo desarrollado por el SCS (Fuentes, 2007; Henríquez et al., 2006; Moscoso, 2007), el cual considera tres variables descritas a continuación:

1. La capacidad del suelo para almacenar agua, la cual determina el grupo hidrológico (Tabla 2) a través de características físicas tales como porosidad, estructura, entre otras. El proyecto OTAS (2002) proporcionó todas las series de suelo dentro del área de estudio, pero para determinar el grupo hidrológico al cual pertenecían, se analizó el Estudio Agrológico del Proyecto Maipo, desarrollado por CIREN-CORFO (1996). Los resultados se muestran en la Tabla 3. Dentro de la información analizada se encontraban la profundidad efectiva del suelo, clase de drenaje, textura del suelo, pedregosidad, pendiente y las variantes dentro de una misma serie de suelo.

Tabla 2. Grupos hidrológico.

Grupo Hidrológico	Descripción
A	Alta infiltración. Suelos profundos, compuestos de arenas o gravillas.
B	Infiltración media. Suelos menos profundos, medianamente ricos en loess y arcillas.
C	Infiltración baja. Suelos poco profundos medianamente arcillosos.
D	Infiltración muy baja. Suelos arcillosos a muy arcillosos.

Fuente: Bertrand-Krajewski, 1990/2000 en Torres, 2004

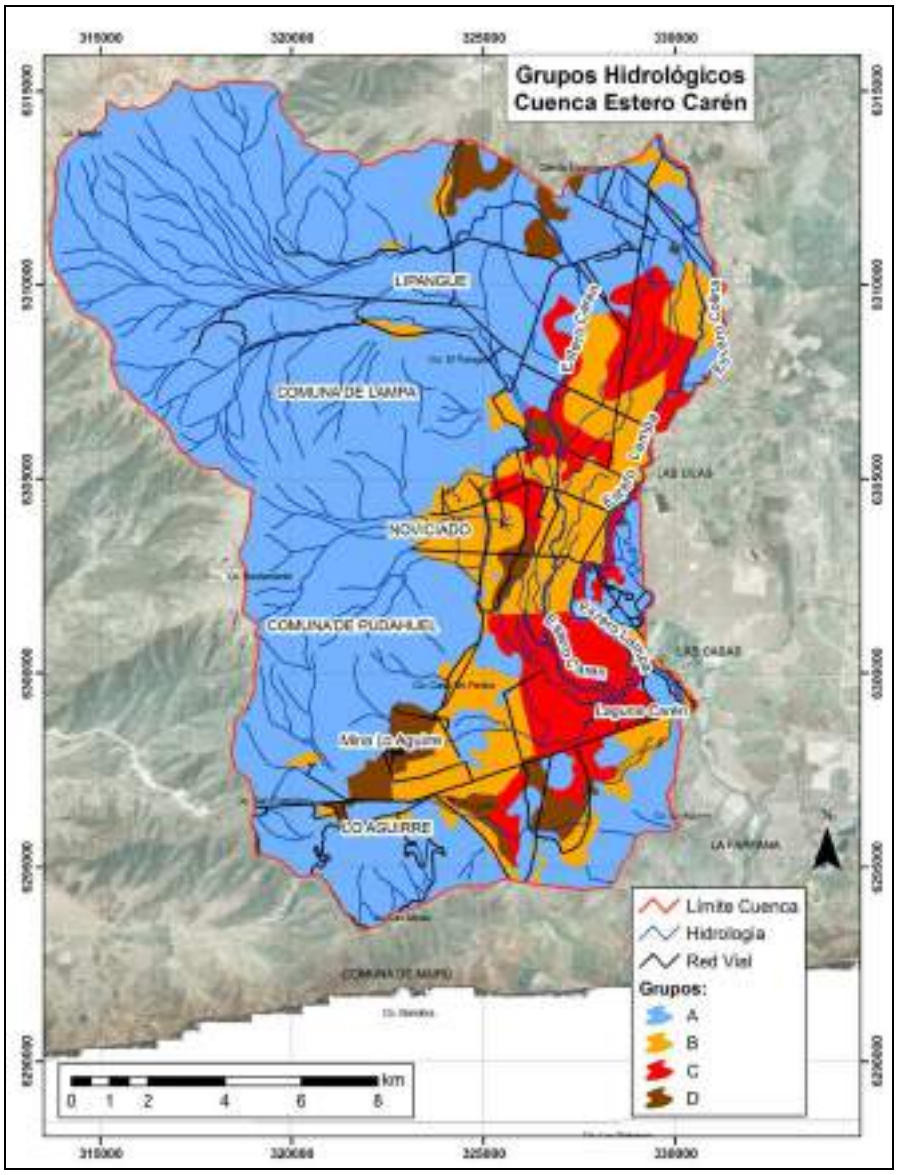
Tabla 3. Clasificación de los suelos de las comunas de Pudahuel y Lampa según grupo hidrológico.

Series de Suelo	Nombre	Clasificación
CHU	Chicauma	A
LMP	Lampa	A
PUD*	Pudahuel	A
PTB	Cuesta Barriga	B
MPC*	Mapocho	B
BTC	Batuco	C
PRE	Peralillo	D
TAQ	Taqueral	D

Fuente: Elaboración propia, basada en CIREN-CORFO, 1996 y Castro, 2006.
*La serie presenta variaciones que se ubican dentro de otro grupo hidrológico (C y D).

La Figura 5, muestra la distribución espacial de los grupos hidrológicos dentro del área de estudio. Puede apreciarse que los suelos próximos a los Esteros Lampa y Carén, se encuentran dentro de los grupos hidrológicos B y C, los cuales presentan una infiltración media y baja, respectivamente. Por su parte el valle central, correspondiente al sector de Noviciado, también presenta suelos pertenecientes al grupo hidrológico B y C, mientras que dentro del sector poniente de la cuenca, se encuentran suelos pertenecientes al grupo A (alta infiltración), relacionados con las pendientes propias de la cordillera de la costa.

Figura 5. Series de suelo dentro del área de estudio.



2. **Áreas totales de impermeabilización** (ATIs), las cuales se determinaron a través de los usos/cobertura de suelo; la identificación se realizó con la ayuda de una grilla, identificando sectores permeables e impermeables.
3. **Precipitación de tormenta**: es el evento de precipitación máxima, registrada dentro de un período de 24 horas, considerando todos los años de estudio. Su importancia radica en que permite estimar el CE para la situación más crítica,

es decir para la mayor precipitación que por ende producirá el mayor escurrimiento superficial. Para el presente trabajo esta precipitación fue extraída de los Anuarios Meteorológicos de la Dirección de Meteorología de Chile; la misma corresponde a 95.50 milímetros, registrados el mes de junio del año 2002.

Una vez determinadas las áreas totales impermeables y el grupo hidrológico del suelo, se estimó el coeficiente de escorrentía.

2.3.1 Cálculo del coeficiente de escorrentía superficial

El coeficiente de escorrentía superficial indica directamente, la proporción de agua que escurre superficialmente durante un evento de precipitación.

Según la metodología utilizada por Fuentes (2007), Frick (2007), Henríquez et al., (2006) se procedió a:

- Asignar un valor de curva número a cada uso de suelo, dependiendo del porcentaje de impermeabilización y el grupo hidrológico de éste; estos valores, debieron ser adaptados a las condiciones del país (Moscoso, 2007). Esto quiere decir que, por ejemplo, para el SCS el uso residencial de media/alta densidad es aquel cuya superficie impermeable representa un 65% de la superficie total; sin embargo para este uso se identificó una tasa de impermeabilización de 88%, por lo cual el valor CN con el que se trabajó, corresponde al de las áreas comerciales con 85% de su superficie impermeable. También se adaptó el valor de CN asignado a la minería, debido a que la tabla del SCS no cuenta con este uso; por lo tanto el valor utilizado fue el correspondiente a calles o carreteras de grava. Los porcentajes de impermeabilización de los demás usos, sí eran similares a los establecidos por el SCS.
- Calcular el Máximo Potencial de Retención (S), valor que indica la magnitud del agua que se necesita que infiltre antes de que pueda producirse la escorrentía.

$$S = (25.400/CN) - 254$$

Dónde **S (mm)** es el máximo potencial de retención y **CN** (Curva Número) representa el número de curva de escorrentía para cada uso y cobertura de suelo.

- Calcular la Escorrentía Real o Precipitación Efectiva (**Pe**), valor que indica la magnitud de la escorrentía en un evento de precipitación:

$$Pe = (P - 0{,}2*S)^2 / (P + 0{,}8*S)$$

Dónde **Pe (mm)** es la escorrentía real, **P** es la precipitación máxima en 24 horas para un año dado y **S** el máximo potencial de retención.

- Calcular el Coeficiente de Escorrentía, el cual expresa la proporción entre el agua que escurre y el agua que se que se infiltra, y puede además expresarse como porcentajes.

$$CE = Pe / P$$

Donde **CE** es el coeficiente de escorrentía, **Pe** es la escorrentía real y **P** es la precipitación máxima en 24 horas en un año dado.

El CE se calcula para cada uso/cobertura de suelo, para luego obtener un valor que represente a toda la cuenca. Con esto se puede observar como el **CE** y los demás índices varían en el área de estudio para cada año, a medida que aumenta las superficies impermeables.

Para determinar el Coeficiente de Escorrentía superficial para el año 2018, se debían simular previamente los cambios en los usos/coberturas de suelo para dicha fecha. Este proceso, se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Cadenas de Markov: Un proceso Markoviano es aquel en el cual, el estado de un sistema en tiempo 2, se puede predecir por el estado del sistema en tiempo 1 (Eastman, 2003). Este módulo del programa Idrisi Andes, permite predecir los cambios en los usos/coberturas de suelo, para tiempos distintos (t_1 y t_2), tomando como base los cambios internos del sistema y sin considerar variables externas. Los productos de este módulo son la Matriz de Probabilidades de Transición y la Matriz de Áreas de Transición. La primera estima la

probabilidad de cambio de un píxel, en el tiempo. La segunda matriz, indica las áreas totales que podrían cambiar en el próximo periodo.

- Imágenes de Aptitud: Para cubrir un objetivo específico, a menudo ocurre que se necesita evaluar varios criterios simultáneamente; tal procedimiento se llama Evaluación Multicriterio (EMC) (Eastman, 2003). La EMC permite asignar usos posibles del suelo, considerando una combinación de factores debidamente ponderados, los conocimientos acumulados y los expertos consultados (Henríquez, 2006). Las Imágenes de Aptitud, son el resultado de la Evaluación Multicriterio, la cual considera restricciones y forzamientos, para cada uno de los usos/coberturas de suelo. Las restricciones limitan la expansión de un uso/cobertura, mientras que los forzamientos pueden potenciar o no la evolución de alguno de ellos.
- Autómatas Celulares: La proximidad es uno de los elementos principales que motivan la dinámica de muchos eventos: los píxeles tienen una tendencia más alta a cambiar a un determinado uso de suelo, cuando existen en su alrededor píxeles que pertenecen a dicho uso (es decir, un fenómeno de expansión). Éstas pueden ser modeladas en forma muy efectiva usando autómatas celulares. Un autómata celular es una entidad celular que varía independientemente, basándose en su estado previo y en el de sus vecinos inmediatos según una regla específica; existe una similitud con el proceso Markoviano, la única diferencia es la aplicación de una regla de transición que depende no sólo del estado previo, sino también del estado de los vecinos locales (Eastman, 2003; Henríquez, 2006).

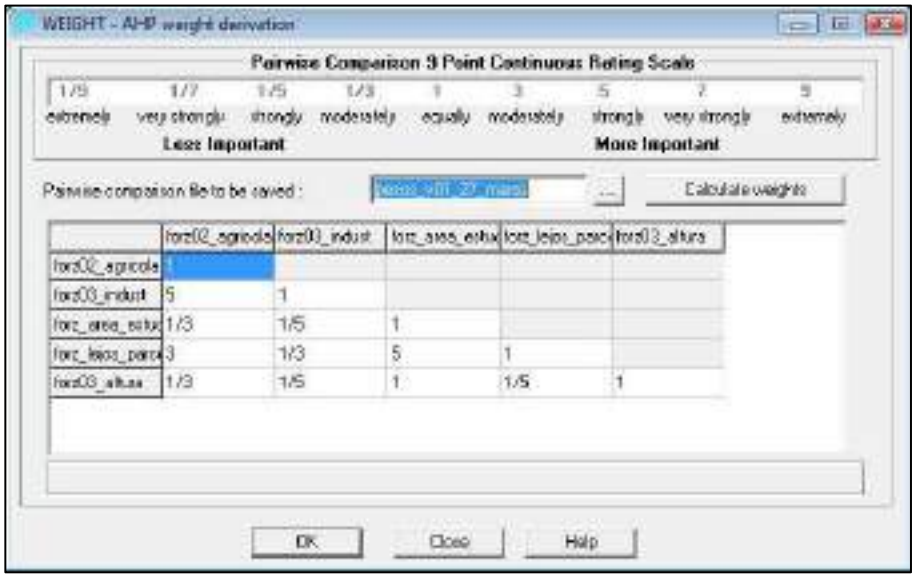
  El módulo CA_MARKOV de Idrisi Andes, permite la simulación en sí, de un área determinada. Para ello utiliza la imagen de referencia más antigua (Usos/Coberturas de Suelo 2007), la Matriz de Áreas de Transición y las Imágenes de Aptitud.

2.4 Simulación de usos/coberturas de suelo para el año 2018.

Utilizando los usos/coberturas de suelo de los años 1996 y 2007, se calculó la matriz de probabilidad de transición y la matriz de áreas de transición, obteniendo un intervalo de tiempo de once años que permitía simular el año 2018. Debido a que se espera que los PDUC sean desarrollados en su totalidad en 30 años, se estimó que en un período de once años, al menos un tercio de su superficie debería estar ejecutada. Por lo tanto la matriz de áreas de transición, que expresa el total de pixeles que esperan cambiar en el próximo período de tiempo (Sandoval, 2008), fue modificada, al agregar las hectáreas (pixeles) correspondientes al uso residencial urbano de media densidad (581.3 has) y las áreas verdes (82.2 has) propios de los PDUC.

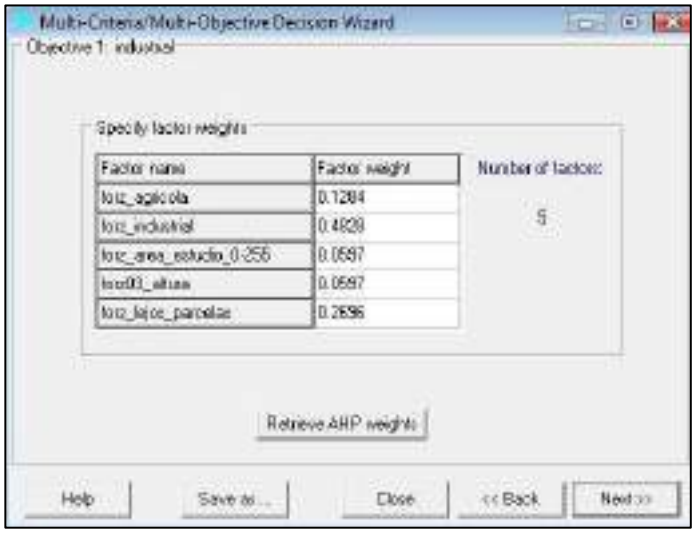
Posteriormente, se debían elaborar Imágenes de Aptitud para cada uso/cobertura de suelo a partir de la Evaluación Multicriterio (EMC). Esta evaluación permite estimar, a través de restricciones y forzamientos, los posibles cambios en usos/coberturas de suelo. Las restricciones están relacionadas con la posibilidad con la que cuenta un uso para emplazarse o no sobre otro (valor 0 ó 1). Por ejemplo, el uso agrícola está restringido de desarrollarse sobre la red vial, el uso industrial y el urbano media densidad. Los forzamientos por su parte, determinan la menor (0) o mayor (255) aptitud con la que cuenta un uso (representado por pixeles) para convertirse en otro. Todos estos forzamientos fueron ponderados a través del *Analytical Hierarchy Process.* Esta ponderación, basada en una matriz de comparación de pares, determinó qué forzamiento era más importante respecto a otro dentro de un mismo uso, fundamentándose la decisión en los patrones de crecimiento registrados hasta la fecha y en criterios de planificación. Los puntajes se proveen sobre una escala continua de 9 puntos, que van desde lo menos importante a lo más importante (Figura 6).

Figura 6. Matriz de comparación de pares.



Es así como por ejemplo, de acuerdo a la ponderación de los forzamientos, se esperaría que el uso industrial se emplazara en zonas industriales (0.4828), lejos de las parcelas de agrado (0.2696), en las cercanías a suelo agrícola (0.1284), bajo los 600m de altura (0.597) y dentro del área de estudio (0.0597) (Figura 7).

Figura 7. Ponderaciones para forzamientos del uso industrial.



La Tabla 4 muestra las restricciones y forzamientos utilizados para cada uso/cobertura de suelo.

Tabla 4. Restricciones y forzamientos de la evaluación multicriterio.

Uso/Cobertura	Restricciones	Forzamientos	Pesos EMC
Agrícola	Altura sobre los 600m	Dentro del área de estudio	0.0863
	Restricciones de usos	Cercanía a uso agrícola	0.4168
		Altura bajo 600m	0.2053
		Lejanía Urb. Media Dens.	0.2053
		Lejanía cuerpos de agua	0.8630
Área Verde	Altura sobre los 600m	Cercanía a PDUC	0.3899
	Restricciones de usos	Cercanía Urb. Media Dens.	0.3899
		Dentro del área de estudio	0.1524
		Cercanía Vegetación Dispersa	0.0679
Cuerpo de Aguas	Altura sobre los 600m	Sobre Cuerpo de Aguas	1.0000
	Todos los usos de suelo		
Estanques	Todos los usos de suelo	Sobre Estanques	1.0000
Industrial	Restricciones de usos	Cercanía a uso agrícola	0.1284
		Cercanía a uso industrial	0.4828
		Altura bajo 600m	0.0597
		Dentro del área de estudio	0.0597
		Lejanía de Parcelas de Agrado	0.2695
Minería	Todos los usos de suelo	Sobre minería	1.0000
Parcelas de Agrado	Restricciones de usos	Cercanía a uso agrícola	0.3036
	Altura sobre los 600m	Cercanía a red vial	0.0971
		Cercanía Vegetación Dispersa	0.0287
		Cercanía Urb. Baja Dens.	0.3036
		Dentro del área de estudio	0.1134
		Lejanía a PDUC	0.1536
Red Vial	Todos los usos de suelo	Sobre Red Vial	1.0000
Urb. Baja Densidad	Restricciones de usos	Cercanía a uso agrícola	0.4750
	Altura sobre los 600m	Lejanía a minería	0.1054
	Pendiente mayor a 30°	Lejanía a PDUC	0.1177
		Dentro del área de estudio	0.0466
		Cercanía a red vial	0.2554
Urbana Media Densidad	Restricciones de usos	Sobre PDUC	1.0000
Vegetación Densa	PDUC	Dentro del área de estudio	0.1000
		Altura sobre 600m	0.3000
		Cercanía Vegetación Dispersa	0.3000
		Cercanía Vegetación Densa	0.3000
Vegetación Dispersa	Restricciones de usos	Dentro del área de estudio	0.1429
		Cercanía a uso agrícola	0.1429
		Cercanía Vegetación Dispersa	0.7143

EMC: Evaluación Multicriterio

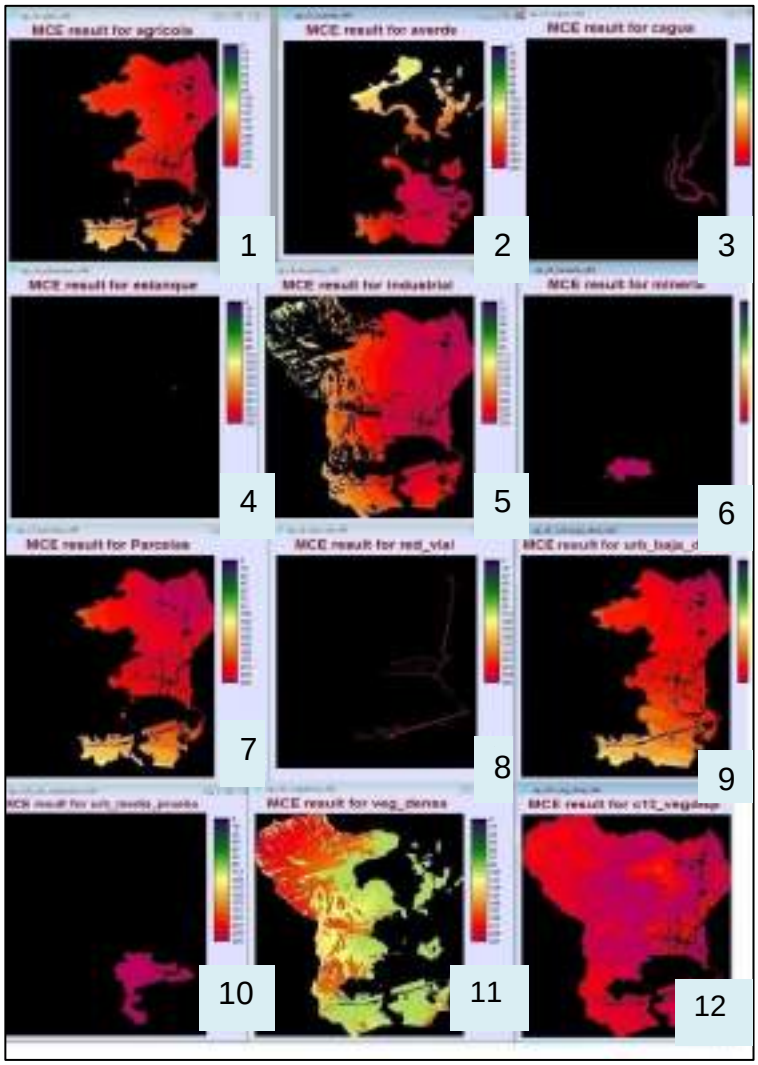
Cuando se habla de restricciones de usos (Tabla 7), se hace referencia a los usos/coberturas de suelo que no pueden ser reemplazados por la categoría evaluada y las condiciones del territorio que impiden su crecimiento; los criterios utilizados para cada una de ellas, se explican a continuación.

- Agrícola: este uso podría reemplazar únicamente a la vegetación dispersa, mientras se restringía su crecimiento sobre otros usos/coberturas. La idea de restringir su crecimiento sobre los 600 m de altura, era proteger principalmente las áreas con vegetación densa. En cuanto a los forzamientos, los mayores pesos fueron asignados a las condiciones de lejanía de los cuerpos de aguas y cercanía al propio uso (agrícola); la primera condición dirigida a evitar la aparición pixeles correspondientes al uso agrícolas, sobre los cuerpos de agua y la segunda, para forzar el crecimiento sobre áreas cercanas a este uso.
- Áreas verdes: estas podían reemplazar a la vegetación dispersa, en tanto que se restringió su crecimiento sobre el resto de los usos/coberturas; por su parte, se potenciaba el crecimiento de las mismas en áreas próximas a los PDUC y la urbanización de medida densidad, debido a que su crecimiento esta relacionado con estos usos.
- Cuerpos de Agua, Estanques, Minería y Red Vial: el crecimiento de estos usos/coberturas no es espontáneo; los cuerpos de aguas y los estanques no crecen al menos que dicha situación sea condicionada por variaciones climáticas estacionales; en el caso de la minería, la DIA del proyecto Praderas, incluía el plan de cierre de la mina Lo Aguirre, por lo tanto tampoco debía aumentar su superficie para el año 2018; por otro lado, es evidente que de aumentar la superficie de los usos urbanos, la red vial también aumentaría, sin embargo, este crecimiento sí es planificado. Por tales motivos, se restringió el crecimiento de los mismos sobre otros usos/coberturas de suelo y se forzó al modelo a mantener las superficies actuales (2007).
- Industrial: este uso, podría reemplazar únicamente a la vegetación dispersa y al uso agrícola, porque esta relacionado con actividades agroindustrial e industriales de bajo impacto (almacenamiento de productos, empacadoras). Por la misma razón, es que se potenció su crecimiento sobre uso agrícola, pero lejos de las parcelas de agrado.

- Parcelas de agrado: para este uso, se restringió el crecimiento sobre los 600 m de altura y sobre todos los usos/coberturas de suelo a excepción de la vegetación dispersa y el uso agrícola, principalmente por la intención de mantener la ruralidad del sector nororiente y valle central de la cuenca. Por su parte, los forzamientos con mayor ponderación fueron la cercanía al uso agrícola, la cercanía al uso residencial de baja densidad y la lejanía a los PDUC, justamente por la razón mencionada con anterioridad.
- Urbano baja densidad: para este uso se restringió su crecimiento sobre los 600 m de altura, las pendientes mayores de 30° y sobre todos los usos/coberturas de suelo a excepción del uso agrícola y la vegetación dispersa; surge nuevamente la intención de mantener la ruralidad del valle central de la cuenca y de proteger la vegetación densa.
- Urbano media densidad: este uso debía restringirse para todas las categorías de usos/coberturas a excepción del propio uso, pues de antemano se conocía la zona donde sería emplazado el mismo en el futuro. Como forzamiento se condicionó la expansión sobre el área establecida de los PDUC y por ende el valor de 1.00.
- Vegetación Densa: esta cobertura sólo podía emplazarse sobre la vegetación dispersa y se potenció su crecimiento sobre los 600 m de altura, las cercanías de la vegetación dispersa y el propio uso.
- Vegetación Dispersa: en realidad es esta cobertura natural, la única que podía ser reemplazada por cualquier otro uso/cobertura, sin contar aquellos que no crecen con el tiempo (cuerpos de agua, estanques, minería, red vial). Para los forzamientos, prevaleció el crecimiento en las áreas próximas al propio uso.

La Figura 8, muestras las imágenes de aptitud territorial de uso del suelo resultante, en el siguiente orden: agrícola (1), área verde (2), cuerpos de agua (3), estanque (4), industrial (5), minería (6), parcelas de agrado (7), red vial (8), urbano baja densidad (9), urbano media densidad (10), vegetación densa (11), vegetación dispersa (12).

Figura 8. Imágenes de aptitud simulación 2018.



Los anteriores resultados junto al método de Autómatas Celulares, permitieron simular los usos del suelo que se esperarían para el año 2018.

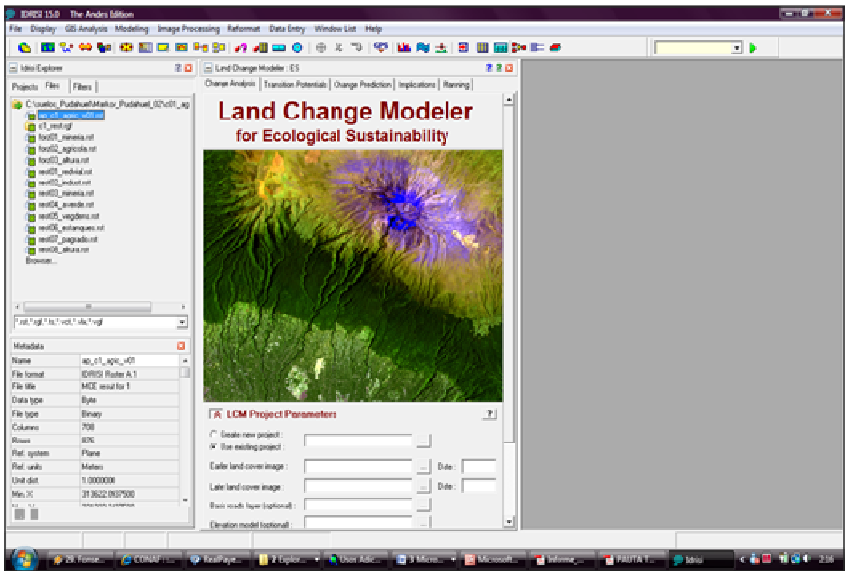
La simulación 2018 fue validada utilizando la misma metodología, pero simulando el año 2007. Esta última, que corresponde a la distribución observada en la actualidad, fue simulada a su vez tomando como base los usos/coberturas de suelo de los años 1996 y 2001; las restricciones, forzamientos y los pesos de estos últimos se mantuvieron iguales. Obtenida la imagen simulada 2007, se comparó con la imagen

2007 observada (fotointerpretada), calculándose el índice Kappa, que determina la similitud entre dos imágenes y la asociación de los datos. El módulo *Crosstab c*alculó dicho índice, el cual fue de 0,9144 lo que se traduce a un 91% de similitud entre los mapas de usos y coberturas de suelo observados y simulados.

2.5 Análisis de la participación de los usos/coberturas de suelo en la variación del coeficiente de escorrentía.

Una vez obtenido el Coeficiente de Escorrentía Superficial para cada año de estudio (Objetivo Específico #1), se pudieron determinar los cambios en los uso/cobertura de suelo, que han influenciado la variación del mismo. Para este proceso se utilizó el programa Idrisi Andes, específicamente el módulo Land Change Modeler (Figura 9), el cual permite cuantificar la ganancia o pérdida de superficie experimentada por cada uso/cobertura de suelo, obteniendo un balance entre ambas en el período de tiempo considerado.

Figura 9. Módulo land change modeler, Idrisi Andes.



2.6 Distribución espacial de las zonas con riesgo de inundación y su interrelación con las zonas de expansión urbana.

En primer lugar, se identificó la distribución territorial de las zonas con riesgo de inundación, la profundidad de las napas subterráneas y el tipo de suelo dentro del área de estudio, a través de la información suministrada por el proyecto OTAS. Para relacionar espacialmente la distribución de todas estas variables, se realizaron procedimientos de geoprocesamiento a través del Sistema de Información Geográfica, ArcGis 9.2.

CAPÍTULO 3: EXPANSIÓN URBANA Y MEDIO AMBIENTE

3.1 Características del proceso de expansión urbana

La urbanización se define como un proceso de cambio complejo, de un estilo de vida rural a urbano (Antrop, 2000a); es la transformación de un paisaje rural a urbano o industrial, que es controlado por las condiciones físicas del lugar y la accesibilidad a través de vías de transporte (Antrop, 2000b; Pacione, 2001 citado en Antrop, 2004).

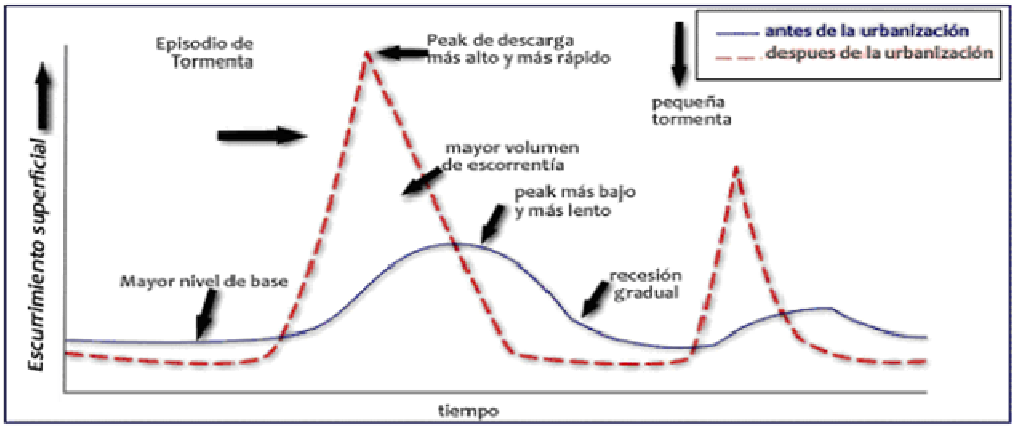
América Latina y el Caribe, son las regiones más urbanizadas dentro el mundo en vías de desarrollo; una quinta parte de la población urbana de estas regiones, vive en ciudades que concentran entre cinco o más millones de habitantes. Sin embargo, una de las características más distintivas de la urbanización, es el rápido crecimiento de pequeñas ciudades que representan alrededor del 40% de la población urbana de la región. Otra particularidad es que en la actualidad, el crecimiento urbano es el resultado de la migración de población de una ciudad a otra y no de zonas rurales a zonas urbanas (UN-HABITAT, 2008a). Por otro lado, el proceso de urbanización también se relaciona a otros factores como lo son la globalización, el intercambio de bienes y servicios, la seguridad, la accesibilidad, la disponibilidad de espacios verdes y suelos propicios para el desarrollo, además de la capacidad del territorio para diversificar y heterogenizar actividades (Antrop, 2004).

Dentro del proceso de urbanización se identifican diversas fases, la primera llamada urbanización propiamente tal, es la concentración de la población en el centro de la ciudad debido a la migración de personas desde la periferia. La segunda o suburbanización, continúa presentando un aumento demográfico en el centro de la ciudad; sin embargo, las zonas periféricas inician una etapa de crecimiento. La tercera conocida también como desurbanización, consiste en la disminución demográfica tanto del centro de la ciudad como de la periferia. La cuarta y última fase, o nueva urbanización, intenta recuperar el escenario inicial del centro de la ciudad y las periferia (Champion, 2001). La descripción de este proceso, es muy similar a realizada por Ortíz y Morales (2002).

3.2 Urbanización de cuencas

Urbanizar una cuenca o cuenca, como lo indican Rojas y Romero (2003) puede llegar a tener efectos sobre el comportamiento de las aguas que caen sobre las laderas cordilleranas y las llanuras, más que nada debido al proceso de deforestación y el reemplazo de vegetación, por superficies impermeables, aumentando así la probabilidad de inundaciones en las partes más bajas de la cuenca. La urbanización de cuencas, también tiende a incrementar las descargas máximas de agua durante las precipitaciones (peak), disminuir el tiempo en que se alcanzan estas descargas y aumentar el volumen de escorrentía (Figura 10) (Campana y Tucci, 2001; English et al., 2004); en otras palabras, con la misma intensidad de lluvia registrada antes de la urbanización, se genera un mayor volumen de escorrentía superficial en un menor tiempo, una vez establecida la ciudad.

Figura 10. Escurrimiento superficial pre y post-urbanización en cuencas urbanas.



Fuente: English et al., 2004

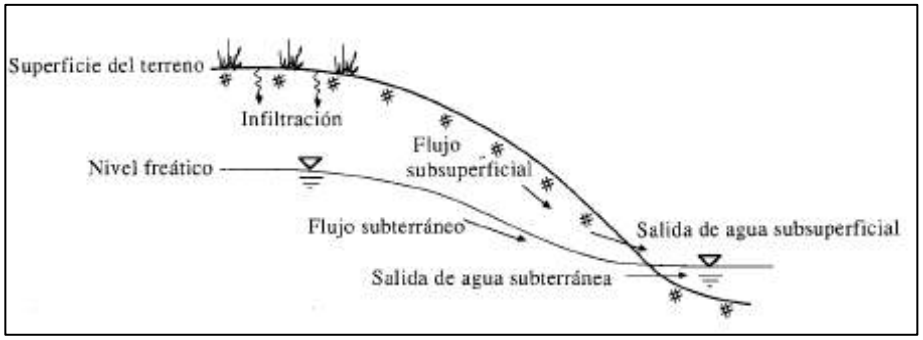
Durante el proceso de urbanización, muchos cursos de agua (ríos, esteros, canales de riego) son interrumpidos, canalizados o conducidos subterráneamente. Además, los humedales son desecados, las zonas riparianas y las llanuras de inundación son reducidas (Rojas y Romero, 2003). Todos estos factores disminuyen las superficies que naturalmente eran recorridas por la escorrentía superficial.

Diversos autores (Arnold y Gibbon, 1996, English et al., 2004), han estimado cómo se distribuye en las cuencas el agua producto de la precipitación. Para cuencas sin

urbanizar el agua que producto de la precipitación se distribuye, aproximadamente, de la siguiente manera: 40% regresa a la atmósfera por evapotranspiración, 10% pertenece a la escorrentía superficial y alrededor del 50 % se infiltra a través del suelo (recarga de acuíferos); sin embargo, en áreas urbanas esta distribución varía considerablemente: 25% del agua producto de la precipitación pertenece a la evapotranspiración, el 43% a la escorrentía superficial (dependiendo del área impermeabilizada) y el 32% se infiltra en el suelo. El tipo de suelo, la distribución de la urbanización, el porcentaje de áreas verdes, también son factores determinantes al momento de realizar la distribución del agua que precipita.

Por lo tanto, al disminuir el porcentaje de agua que se infiltra a través del suelo, disminuye el nivel de recarga de los acuíferos, es decir que es menor el abastecimiento de agua en los períodos de sequía, así como la variabilidad de los flujos que circulan en los cauces naturales (Romero y Vásquez, 2006; Chow et al.;, 1994). La Figura 11, ilustra el proceso de recarga y descarga de los acuíferos, a través de la infiltración del agua producto de la precipitación.

Figura 11. Recarga y descarga de acuíferos.



Fuente: Chow et al.; 1994.

Mardones y Vidal (2001), hacen la diferencia entre anegamiento e inundación fluvial, siendo lo primero la acumulación de un volumen de agua/lluvia sobre la superficie del suelo, debido a factores naturales y antrópicos; mientras que se entiende por inundación, la invasión de un territorio por el escurrimiento descontrolado de un flujo

fluvial, debido a una crecida. El área de estudio presenta, persistentes problemas de anegamientos durante la época de lluvias, las cuales pueden producirse por la tipología de suelo de la zona, la impermeabilización de suelos, la urbanización de planicies de inundación y el afloramiento de napas subterráneas.

La urbanización, junto a todas las actividades que conlleva (compactación e impermeabilización del suelo, nivelación de terrenos, construcción de muros, desvío de drenajes naturales), se convierte en una barrera para el escurrimiento natural del agua durante eventos de precipitación, lo cual deriva en anegamientos. Una vez superados estos obstáculos antrópicos, el agua empieza a escurrir superficialmente, pudiendo afectar sectores que anteriormente no se anegaban o agravando situaciones de anegamiento en otros (Ferrando, 2006).

3.2.1 Urbanización y ciclo hidrológico

La urbanización es la perturbación ambiental más drástica, rápida e irreversible que puede enfrentar el paisaje natural (Rojas y Romero, 2003). Por consiguiente, un desarrollo urbano sostenible comprende un amplio conocimiento de los fenómenos hidrológicos, hidráulicos y ambientales que genera la urbanización y exige que se cuente con numerosas herramientas para la implementación de técnicas innovadoras de reconciliación agua-ciudad (Torres, 2004).

La escorrentía superficial, forma parta del ciclo hidrológico, el cual se define como el proceso a través del cual el agua pasa de la superficie terrestre a la atmósfera en forma de vapor, para regresar a ella en estado líquido ó sólido (Chow et al., 1994). Este ciclo se produce ininterrumpidamente en zonas naturales que no han sido intervenidas por el ser humano; sin embargo, en el medio urbano el flujo del agua se ve alterado principalmente por la impermeabilización de los suelos.

La urbanización de cuencas provoca alteraciones en todos los componentes del ciclo hidrológico (evapotranspiración, precipitación, escorrentía e infiltración), aunque en algunos sea más evidentes que otros; en el caso de la escorrentía superficial, al aumentar las superficies impermeables, se pierde la capacidad natural de infiltración del suelo y por ende se altera el funcionamiento hídrico de las cuencas, trayendo como

consecuencia el aumento del volumen de agua y la rapidez con que la misma desciende por laderas y cauces, especialmente cuando se registran precipitaciones abundantes (Moscoso, 2007).

Los principales efectos de la urbanización sobre el ciclo hidrológico, han sido definidos por Whitford et al., (2001), Arnold y Gibbons (1996), Torres (2004), pudiéndose mencionar entre ellos el aumento en el consumo de agua, la reducción del ancho de los ríos, impermeabilización del suelo y disminución de los tiempos de concentración, crecimiento de los caudales instantáneos de escorrentía y aumento de la frecuencia de inundaciones.

3.2.2 Pérdida de servicios ambientales

Cuando se habla de bienes y servicios ambientales, se hace referencia a los beneficios que la ciudadanía obtiene como consecuencia de los efectos positivos que resultan del funcionamiento de los ecosistemas y sistemas ambientales (Romero y Vásquez, 2006). Por lo tanto, diversos ecosistemas proporcionan diferentes servicios ambientales, pero relacionados entre sí.

La áreas verdes, por ejemplo, disminuyen las temperaturas producidas por las islas de calor urbana, facilitan el intercambio de gases y filtran contaminantes atmosféricos, permiten el regreso del agua a la atmósfera a través de la evapotranspiración y evitan la erosión del suelo. Este por su parte, posee la capacidad de infiltrar el agua producto de la precipitación, permite la recarga de los acuíferos, controla la escorrentía superficial y la contaminación del agua. En tanto, los corredores biológicos permiten la conservación de la biodiversidad (Romero y Vásquez, 2006; Stone, 2004; SINIA, 2004).

La vegetación ripariana o “buffer” también presta servicios ambientales pues evita inundaciones, reduce la erosión del suelo, proporciona condiciones para la germinación de las semillas y también aporta agua suficiente para su desarrollo. Además, asegura la continuidad del ciclo hidrológico, aísla acústicamente las zonas que rodea,

proporcionar alimento a microorganismo e insectos. Por otro lado, la estructura de esta vegetación, permite encontrar diversas especies con variaciones espaciales y temporales, que realizan funciones de filtros químicos, biológicos y físicos, al evitar la descarga directa de contaminantes (sólidos en suspensión, metales, patógenos) a los cuerpos de agua (Romero y Vásquez, 2006; White y Greer, 2006).

Por su parte, los ecosistemas agrícolas ubicados alrededor de las ciudades proporcionan variados servicios ambientales: eliminación de desechos, retención de la humedad del suelo, reducción de la escorrentía superficial, infiltración del agua, contención de la erosión, retención del carbono, dispersión de semillas de plantas silvestres y refugio de algunas especies durante los periodos de sequía (FAO 2004 citado en SINIA, 2004).

Los servicios ambientales permiten evaluar la calidad ambiental de una cuenca a través de indicadores ambientales como el coeficiente de escorrentía superficial, las temperaturas máximas y mínimas de la superficie o los indicadores de biodiversidad (Pauleit et al., 2005).

Evidentemente, muchos de los procesos que permiten disfrutar de los servicios ambientales, disminuyen o se pierden durante las etapas de urbanización de una cuenca, esencialmente por la impermeabilización del suelo y los cambios en la topografía del terreno. Algunos estudios confirman que cuando el porcentaje de impermeabilización de una cuenca supera el 10%, la salud del ecosistema acuático disminuye, en tanto que si este porcentaje alcanza un 30%, dicha cuenca puede presentar severos daños en su salud ambiental (Arnold y Gibbons, 1996, Stone, 2004).

3.3 Evolución del plan regulador metropolitano de Santiago

El Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS), fue aprobado en 1994 por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo con el objetivo principal de establecer los parámetros para el crecimiento de la ciudad. Al momento de su elaboración, se incorporaron comunas a la Región Metropolitana (RM) entre las que se encontraban: Puente Alto, San José de Maipo, San Bernardo, Pirque y Calera de Tango. La finalidad de esta incorporación, era básicamente limitar la expansión de la ciudad y mantener los suelos con aptitudes silvoagropecuarias

En 1997 el PRMS sufre su primera modificación, incorporando alrededor de 9000 ha. de suelos urbano a la Región Metropolitana, pertenecientes a todas las comunas de la provincia de Chacabuco (Colina, Lampa y Til Til).

Sin embargo, la ciudad siguió creciendo y la demanda de suelo urbano también, lo que llevó en el año 2003 a la modificación del Artículo n° 55 de la Ley General de Urbanismo y Construcción, permitiendo la construcción de viviendas sociales y otras de hasta un valor de 1.000 UF fuera del límite urbano, lo que corresponde en su mayoría, a áreas de Interés Silvoagropecuario Mixto (ISAM). Junto con esta modificación, se reevaluó el PRMS y en el año 2006 se incorporan nuevas comunas (Buin, Paine, Padre Hurtado, Peñaflor, Isla de Maipo, El Monte, María Pinto, Curacaví, San Pedro, Alhué); además se introducen mecanismos de desarrollo condicionado entre los que figuran las Zonas Urbanas de Desarrollo Condicionado (ZUDC) y los Proyectos con Desarrollo Urbano Condicionado (PDUC). Los PDUC, permiten la expansión urbana dentro de Áreas de Interés Silvoagropecuario, siempre que cumplan con las condiciones y exigencias establecidas en el Artículo 8.3.2.4 del Ordenanza del PRMS 2006. Entre estas se encuentra la presentación de informes previos favorables por parte de los servicios competentes (SEREMI de Salud, SEREMI de Agricultura, SEREMI de Vivienda y Urbanismo, Municipio correspondiente), que incluyan el cumplimiento de las condiciones de zonificación, condiciones de equipamiento, medidas de compensación/mitigación o reparación, estudios de capacidad vial y transporte, entre otras consideraciones. Por el momento es la comuna de Pudahuel la que cumple con

las condiciones para el desarrollo de estos proyectos. Con anterioridad a la incorporación de los PDUC, el límite urbano de esta comuna coincidía con la avenida Américo Vespucio (sector norponiente) y en otras áreas se ubicaba al poniente de la misma. Los únicos desarrollos inmobiliarios existentes fuera del límite urbano eran Ciudad de los Valles y Lomas de Lo Aguirre, básicamente porque fueron aprobados antes de la modificación del PRMS, en el año 1994.

La más reciente propuesta de expansión urbana en Chile, fue realizada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo en abril de 2008 (Figura 9), argumentado que la ciudad de Santiago debe enfrentar desafíos como: la segregación social y la falta de infraestructuras y servicios, lo que causa demora en los tiempos de viaje, congestionamiento vehicular, inundaciones y la ocupación de tierras valiosas para el medio ambiente; un acelerado deterioro de las áreas centrales de infraestructura y servicios, especialmente en las zonas de vivienda de interés social; problemas ambientales sin resolver y falta de áreas verdes en la mayoría de los sectores sociales vulnerables. Sin embargo el propio Ministerio, contradictoriamente, es consciente de que el Plan Regulador Metropolitano de Santiago, no ha logrado promover una mayor calidad de desarrollo urbano, consolidado los subcentros y aumentando las áreas verdes (Romero et al., 2008). Por lo tanto, pareciera que las modificaciones del PRMS son cíclicas, pues una vez que se extiende el límite urbano y pasan los años, una nueva propuesta debe ser sometida a aprobación.

La propuesta del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, espera ampliar el límite urbano de la ciudad de Santiago en 9266 ha. y reconvertir 1632 ha., destinando un total de 10898 ha. para crecimiento urbano. De este total, un 60% corresponde a uso habitacional mixto (5541 ha. de expansión condicionada y 978 ha. de reconversión industrial) y el 40% restante (4379 ha.) para áreas verdes. Estas últimas se distribuyen de la siguiente manera: un 14% (1550 ha.) serán parques intercomunales, financiados por los urbanizadores por vía de mitigaciones; un 16% (1,758 ha.) serán áreas de forestación para cuñas y cinturón verde, financiadas por el mecanismo de mitigación y un 10% (1,071 ha.) serán forestaciones tanto de cuñas y cinturón verde, pero financiadas con inversión pública. Se espera agregar a través de estas áreas, un total

de 296,000 árboles en los próximos 20 años a la Región Metropolitana de Santiago (SEREMI de Vivienda y Urbanismo, 2008). Sin embargo, Romero et al., (2008) demuestran que el balance total es negativo para las áreas verdes.

La presión inmobiliaria, es otro de los aspectos que induce sin lugar a duda, a la extensión de los límites urbanos. La urbanización de las cuencas del piedemonte andino, es cada vez más limitada, debido a que se alcanzaron los límites previamente establecidos por los planes reguladores metropolitanos y comunales, así como por haber alcanzado las áreas de mayor pendiente y riesgos naturales. Ello ha llevado al mercado inmobiliario a buscar, nuevas zonas de desarrollo, que dispongan de ciertos atractivos ambientales y generen el interés de nuevos compradores. Hasta hace algunos años, los planes reguladores intentaban conservar las áreas que cumplían con funciones y servicios ambientales, pero los instrumentos de gestión territorial de mayor jerarquía, han abierto el compás a la extensión de los límites urbanos (Romero y Vásquez, 2005). Dentro de estos instrumentos se encuentran los Proyectos con Desarrollo Urbano Condicionado (PDUC), los cuales deben cumplir con una serie de exigencias tales como, tener un espacio mínimo de 300 hectáreas, ocupadas por una densidad bruta promedio de 85 habitantes por hectárea. Además, un 12% de las viviendas dentro del proyecto, deben ser sociales y un 18% podrán subsidiarse. También deben destinar uso de suelo a áreas verdes, educación, salud, seguridad, servicios y actividades productivas, sin generar costos adicionales a las municipalidades. En la comuna de Pudahuel se están desarrollando Proyectos de Desarrollo Urbano Condicionado que cuentan con el aval de la Municipalidad. Ello implicará agregar más de 1.500 hectáreas a la zona urbana de esta comuna, en su mayoría para uso habitacional; algunos de estos proyectos inmobiliarios ya se encuentran en pleno desarrollo.

Dentro de los Proyectos con Desarrollo Urbano Condicionado se encuentran Urbanya, ENEA y Praderas. Sin embargo, es este último el que se encuentra dentro del área de estudio, junto con el Parque Científico y Tecnológico de la Universidad de Chile.

3.3.1 Parque científico tecnológico de la Universidad de Chile

La Asociación de Parques Científicos y Tecnológicos de España define un Parque Científico y Tecnológico (APTE, 2003), como un proyecto asociado a un espacio físico que mantiene relaciones formales y operativas con las universidades, centros de investigación y otras instituciones de educación superior; diseñados para promover la formación y el crecimiento de empresas basadas en el conocimiento, normalmente residentes del propio Parque, poseedor de un organismo estable de gestión, que impulsa la transferencia de tecnología y fomenta la innovación entre las empresas y organizaciones usuarias del Parque.

Por otra parte, la Asociación Internacional de Parques Científicos y Tecnológicos (IASP) lo define como una organización gestionada por profesionales especializados, cuyo objetivo es incrementar la riqueza de su comunidad a través de la innovación y competitividad de empresas e instituciones generadoras de saber.

En 1992 la Rectoría de la Universidad de Chile propuso la creación de un Parque Científico en Santiago, basándose en proyectos similares en otros países. En febrero de 1994 el gobierno chileno cede a esta entidad un terreno de 1,066 has en el Valle de Lo Aguirre, comuna de Pudahuel. Es así como en 1995, se constituyó la organización sin fines de lucro llamada, Fundación para la Administración y Desarrollo Tecnológico del Predio de la Universidad de Chile en el Valle Lo Aguirre. Los objetivos de la fundación son: el estudio, la planificación, la preparación, la ejecución y posterior desarrollo de todo tipo de proyectos en el predio propiedad de la Universidad de Chile.

La extensión del predio y su cercanía a la Ruta 68 lo hacen propicio para el desarrollo científico y tecnológico. Sin embargo, el mismo se encuentra dividido por el Estero Carén y por ende, se considera un sitio vulnerable a inundaciones, asociadas al tipo de suelo y a la escasa pendiente. Este sector también se encuentra dentro de las áreas de Interés Silvoagropecuario Mixto.

Estructura del proyecto

Este Parque Científico y Tecnológico, consta de tres sub parques: uno Tecnológico, otro Científico y uno Público. En el primero se establecerán el centro de investigación, el centro de soporte y empresas especiales, a los cuales les interesa localizarse cerca de la Universidad e Institutos. El segundo o Parque Científico, lo constituyen el centro actividades académicas y científicas, además de organizaciones vinculadas a estas áreas. Estos dos parques estarán separados por la Laguna Carén, por lo que se propone un sistema vial jerarquizado para unirlos, es decir, vías principales que permitan la conectividad de ambos con la Ruta 68 y vías secundarias que permitan la conectividad interna. En cuanto al Parque Público, estará constituido por la Reserva Natural del Cerro Amapola, la Laguna Carén, áreas de esparcimiento, instalaciones para deportes náuticos, campos de golf y áreas verdes.

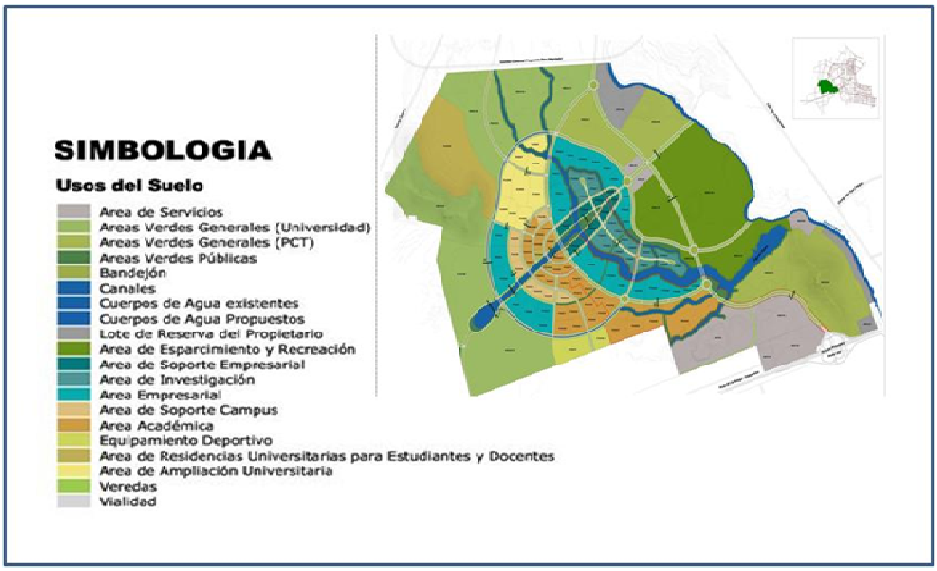
El Plan Maestro de Uso de Suelos (Figura 12), muestra la distribución de cada uno de estos polos, los cuales ocupando las superficies presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Usos de suelo parque científico tecnológico

descripción	áreas (ha.)
Parque Recreativo (incluye laguna)	269
Reserva Futuro Crecimiento	263
Reserva Natural	141
Áreas Comunes	116
Campus Universitario	114
Área Empresas Medianas y Pequeñas	74
Área Investigación	26
Área Empresas Grandes	22
Área de Soporte (servicios/comercios)	11
TOTAL	1035

Fuente: Fundación Valle Lo Aguirre

Figura 12. Plan maestro de uso de suelo, Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Chile.



Fuente: Fundación Valle Lo Aguirre.

3.3.2 Proyecto Praderas

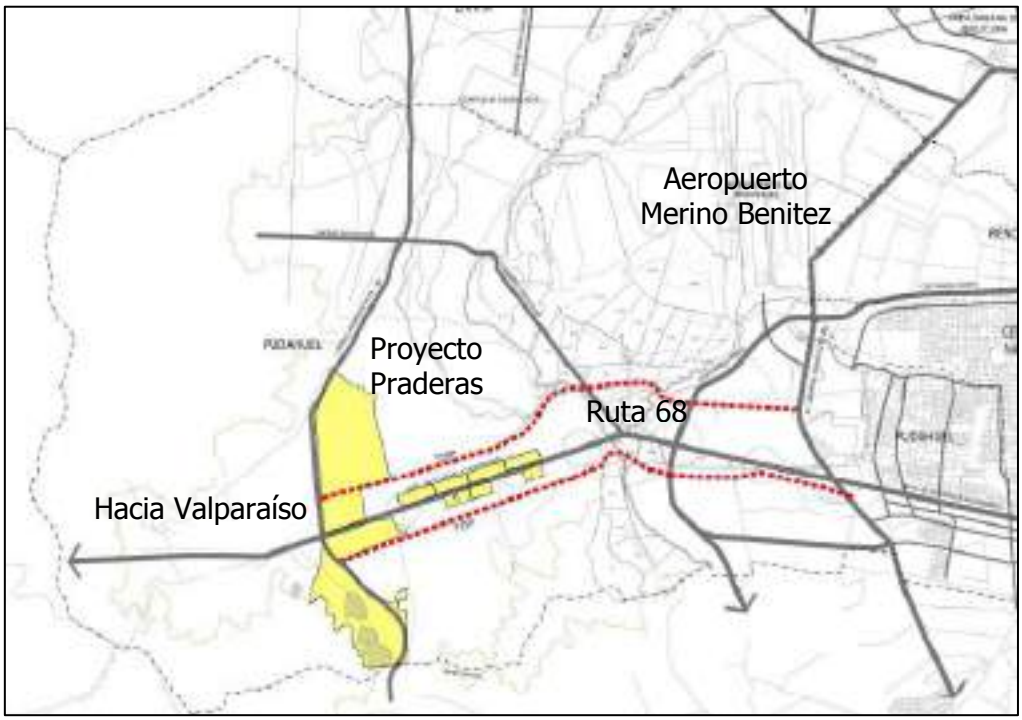
El Proyecto con Desarrollo Condicionado Praderas se encuentra en el Valle Lo Aguirre, contiguo al Parque Científico y Tecnológico de la Universidad de Chile. La empresa El Bosque S.A. es la encargada de esta Comunidad Urbana Desarrollada, como la define su Gerente General Sr. Alejandro Magni.

El sector Poniente de la Región Metropolitana, se proyecta como un polo de desarrollo en términos de inversión e infraestructura, como lo señala Miguel Contreras consultor Urbano de Praderas. Por lo tanto, visualiza que la dinámica de desarrollo en los próximos 20 años, será similar a la que presentaron La Dehesa o Maipú. Esta situación es evidentemente fortalecida por la cercanía del proyecto a la Ruta 68, lo que permite su conexión con las ciudades de Santiago, Valparaíso y Viña del Mar; también por su conectividad con la Costanera Norte y Américo Vespucio, que lo vinculan expeditamente con el oriente, norte y sur de la ciudad, y por la cercanía al Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez.

Por su parte, las características naturales del entorno, también potencian el desarrollo de este proyecto, al encontrarse en terrenos planos, rodeados de laderas con vegetación característica de la zona central del país; por la presencia del Estero Carén y la laguna del mismo nombre, factores que, junto a la posibilidad de contemplar la Cordillera de los Andes, conforman un atractivo escenario.

La Ruta 68, divide el proyecto en dos sectores: Norte y Sur (Figura 13). El sector norte cuenta aproximadamente con 400 ha. urbanizables y muy planas; el sector sur posee aproximadamente 750 ha. destinadas a desarrollo urbano, dividida en dos áreas de similar superficie una al oriente y otra al poniente. Este último sector, cuenta además con unas 1000 ha. destinadas a la preservación ecológica.

Figura 13. Proyecto con desarrollo urbano condicionado Praderas



Fuente: SEREMI de Vivienda y Urbanismo, 2006.

El predio en mención cuenta con una superficie de 2108 ha. de las cuales 1224 ha. corresponden a la superficie efectiva del proyecto; se proyectan emplazar áreas

verdes, áreas residenciales, áreas de equipamiento servicios e infraestructura vial, con la finalidad de satisfacer las necesidades de una población de 114.680 habitantes (Tabla 6).

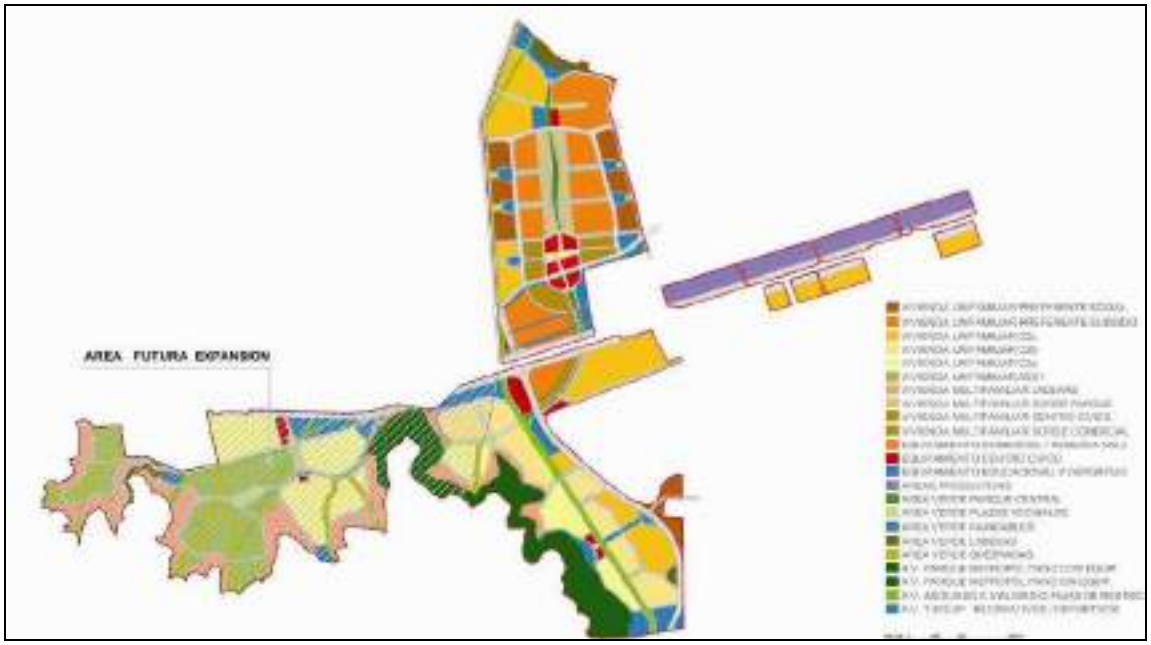
Tabla 6. Superficies generales proyecto Praderas

Superficie del Predio	2108 ha.
Superficie del Proyecto	1224 ha.
Áreas Verdes Totales	130 ha.
Equipamiento y Comercio	59 ha.
Área Productiva	80 ha.
Vivienda	825 ha.
Infraestructura y Otros	130 ha.
Total	**1224 ha.**
Población proyectada	114.680 hab
N°total de Viviendas	28.670 unid

Fuente: El Bosque, S.A.

La Figura 14 muestra la ubicación de las áreas residencias, las áreas de equipamiento y las áreas verdes dentro del proyecto Praderas.

Figura 14. Plan maestro PDUC Praderas.



Fuente: El Bosque, S.A.

3.4 Análisis de las declaraciones de impacto ambiental de los PDUC dentro de la cuenca del estero Carén.

Según la Comisión Nacional del Medio Ambiente, el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), es uno de los principales instrumentos para prevenir el deterioro ambiental; sin embargo el proceso de evaluación de los proyectos que ingresan al sistema, no siempre permite determinar el impacto real causado al medio ambiente, por las diversas etapas que contempla un proyecto.

Un proyecto puede ingresar al SEIA como evaluación de impacto ambiental (EIA) o declaración de impacto ambiental (DIA), esto dependerá del tipo de actividad a realizar y si genera o presenta algunos de los efectos, características o circunstancias mencionadas en el artículo 11 de la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente (riesgo para la salud de la población, efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos, localización próxima a población, recursos y áreas protegidas susceptibles de ser afectadas, alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona, y alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico). Si no presenta ninguno de los efectos señalados en el artículo 11 de dicha ley, el proyecto ingresa al SEIA como declaración de impacto ambiental (DIA) y de manera voluntaria.

Tanto el proyecto Praderas (cuyo nombre original era Ciudad Lo Aguirre) como el Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Chile, ingresaron al SEIA (por separado) como Declaraciones de Impacto Ambiental, con el objetivo de demostrar que generaban ningún efecto ambiental adverso significativo, tanto para la etapa de construcción, como para la de operación.

Para el siguiente análisis, nos enfocaremos en aquellos aspectos relacionados con los componentes del ciclo hidrológico y las características hidrológicas de las zonas donde serán emplazados estos proyectos.

En primer lugar, la DIA del Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Chile establece que el predio a desarrollar, se encuentra en la confluencia de dos cuencas hidrográficas (las del estero Carén y el estero Lampa) que descargan hacia la Laguna Carén, la cual a su vez, recibe la escorrentía superficial de las microcuencas tributarias de Lo Aguirre, Noviciado y Lipangue. Estas tres microcuencas se describen detalladamente, para luego concluirse que "el nuevo Plan Regulador Comunal no contempla autorizar cambios de uso de suelo de rural a urbano en este sector, esperándose un aumento en las parcelaciones de agrado, lo que no constituiría fuente de aumento relevante del coeficiente de escorrentía de la cuenca". Sin embargo, debe recordarse que luego de la aprobación de este proyecto, se modificó el PRMS permitiendo el desarrollo de proyectos inmobiliarios a través de la modalidad de desarrollo condicionado.

Las observaciones de las diferentes Secretarias Regionales Ministeriales, coincidían en la preocupación por el estado de los cuerpos de agua, el tipo de suelo y la descarga de aguas residuales. Las descargas de aguas servidas serán efectuadas en el Estero Lampa (aún presentando un nivel de degradación como consecuencia del vertimiento indiscriminado de residuos líquidos), cumpliendo con lo establecido en el D.S. Nº 90 "Norma de Emisión Para la Regulación de Contaminantes Asociados a la Descarga de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales".

Por su parte, el Proyecto Praderas, enfoca la caracterización del área de estudio, en la presencia de acuíferos, los niveles freáticos, los cauces naturales y las series de suelo predominantes. Se reconoce la presencia de acuíferos someros dentro del área del proyecto, con profundidades entre los dos y cuatro metros. La declaración de impacto ambiental de este proyecto, también reconoce a la laguna Carén, como receptor principal de la escorrentía superficial de la zona, descargando finalmente en el río Mapocho y considera que "si bien el área no presenta un nutrido sistema hídrico, que aparentemente impongan riesgos a los asentamientos humanos en forma permanente, es importante analizar la hoya hidrográfica y los aportes en concepto de aguas lluvias, de manera de estimar los posibles escurrimientos y crecidas de cauces que pudiese ocasionar algún riesgo, especialmente en la época invernal y de deshielos".

En materia de suelo, se determinan la presencia de las series Pudahuel, Piedmont Cuesta Barriga y Lo Aguirre, siendo estos últimos de textura arcillosa; es decir, suelos con drenaje imperfecto; escurrimiento superficial rápido y permeabilidad muy lenta.

Se aprecia como ambos proyectos ingresaron por separada al SEIA; cada uno de ellos presentó individualmente sus impactos y cumplió con la normativa ambiental vinculada al proyecto. No obstante, los impactos acumulativos y sinérgicos no fueron evaluados, como tampoco se evaluarán los de proyectos futuros, en el caso que el PRMS sea modificado nuevamente. Muchas de las observaciones emitidas por los organismos correspondientes, serán acatadas dando cumplimiento a la normativa existente, lo que simplemente es una obligación y escapa a cualquier compromiso ambiental voluntario.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Evolución de usos y coberturas de suelo en la cuenca del estero Carén

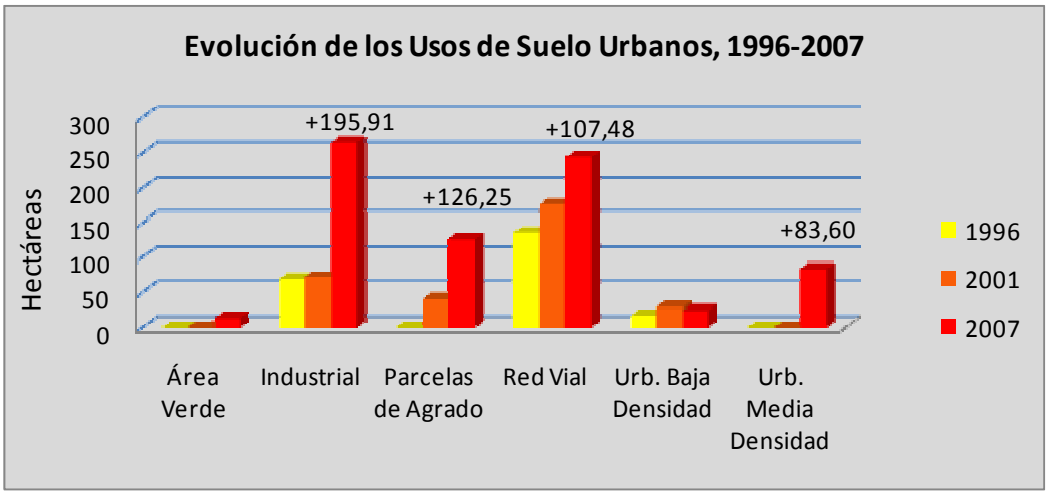
La fotointerpretación de los cambios en las coberturas y usos del suelo del área de estudio durante el período 1996-2007, permitió disponer de las cifras que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Superficies de los usos/coberturas de suelo, 1996-2007.

USOS/COBERTURA DE SUELO	1996 (ha.)	2001(ha.)	2007(ha.)
Agrícola	4563,87	4658,39	4755,97
Área Verde	0,00	0,00	13,30
Cuerpos de Agua	214,82	240,42	233,75
Estanque	3,81	3,77	3,74
Industrial	69,23	71,88	265,14
Minería	416,38	485,13	514,86
Parcelas de Agra	0,00	40,48	126,25
Red Vial	135,96	176,06	243,44
Urbano Baja Densidad	17,39	28,04	23,62
Urbano Media Densidad	0,00	0,00	83,60
Vegetación Densa	4406,96	3418,70	4254,54
Vegetación Dispersa	15132,73	15838,55	14443,67
ÁREA TOTAL	**24961,89**	**24961,89**	**24961,89**

El patrón de evolución de los usos y coberturas de suelo, evidencia el reemplazo paulatino de coberturas naturales (vegetación dispersa principalmente) por usos urbanos, los cuales incluyen a la red vial, las parcelas de agrado, el uso residencia urbano de baja densidad, urbano de media densidad, áreas verdes e industrial (Figura 15). La construcción de vías de acceso durante el período 1996-2007, favoreció este reemplazo; a partir del aumento de la red vial en un 44%, se aprecia un crecimiento de 26% en el uso residencial urbano de baja densidad y 68% en las parcelas de agrado. Por otro lado, no es hasta el año 2007 que aparecen las áreas verdes y el uso residencial urbano de media densidad.

Figura 15. Evolución de los usos de suelo urbanos.

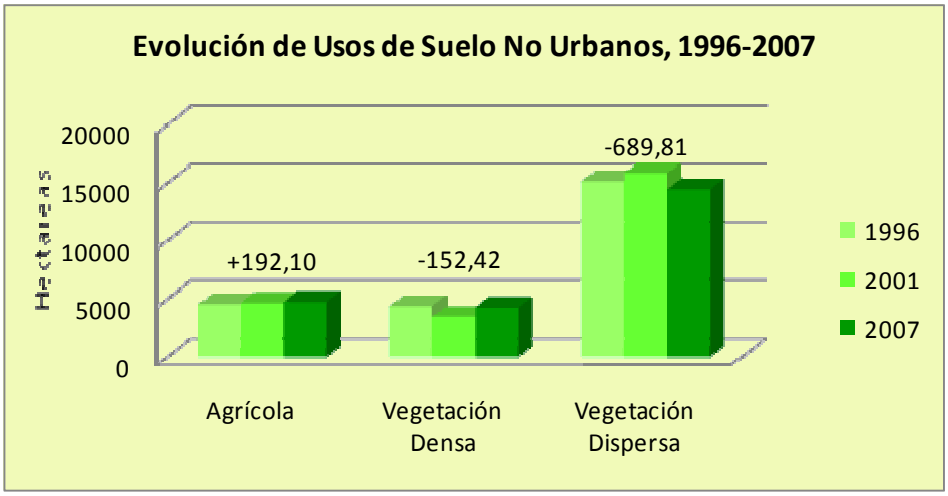


La Figura 16, muestra la evolución registrada en las superficies de las coberturas naturales. La vegetación densa identificada en la parte alta de la cuenca y en los bordes de quebradas, presentó una disminución en el año 2001, recuperándose posteriormente en el año 2007. Cabe destacar que esta cobertura natural, no se ve afectada por otros usos, debido a la restricción de altura, la cual se encuentra en los 600 metros.

La vegetación dispersa, a diferencia de la vegetación densa, pierde y gana superficie por la ocupación de otros usos. Lo anterior quiere decir que la ganancia o pérdida de superficie experimentada por la vegetación densa, está relacionada con las variaciones climáticas interanuales; en tanto la vegetación dispersa, pierde superficie al ser sustituida por otros usos de suelo (industriales, agrícolas, mineras, red vial) y gana superficie producto de las pérdidas experimentadas por la vegetación densa.

Por otro lado, el uso agrícola muestra un aumento en superficie, lo cual no significa que no haya aportado al crecimiento de otros usos.

Figura 16. Evolución de los usos de suelo no urbanos.



4.1.1 Usos/coberturas de suelo para el año 1996.

El área en estudio tiene una superficie de 24.961,89 hectáreas, de las cuales para el año 1996, el 0,89% correspondían a usos urbanos y el 99,11% a usos no urbanos.

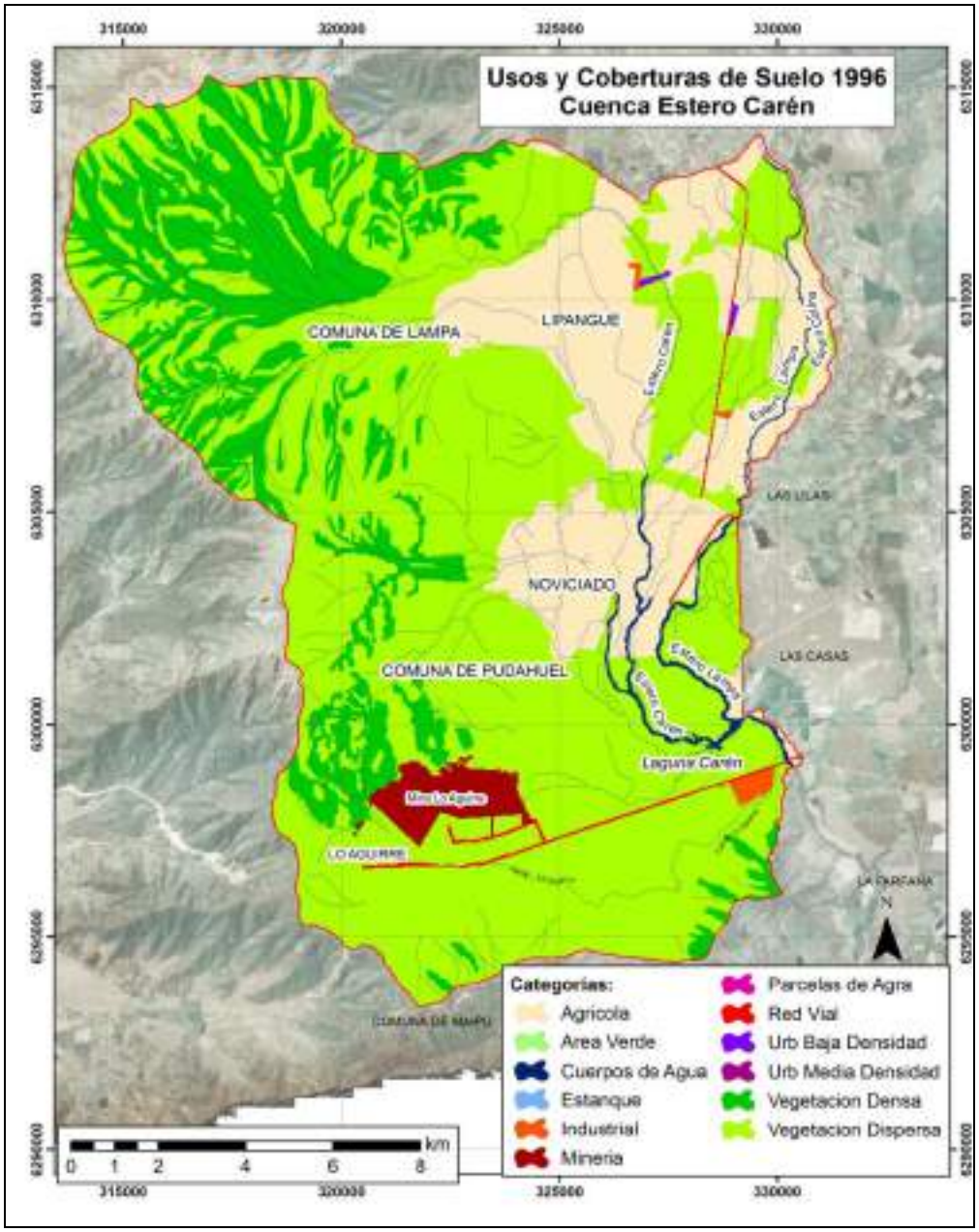
Los usos urbanos se encontraban representados por la red vial, el uso industrial y el uso urbano de baja densidad. Los suelos de uso industrial ubicados en el valle, incluían las agroindustrias relacionadas con el almacenamiento/procesamiento de productos agrícolas; mientras que las industrias ubicadas en el sector sur, incluían galpones de almacenamientos contiguos a la Ruta 68. El uso residencial urbano de baja densidad se encontraba principalmente en el sector de Lipangue (comuna de Lampa), cercanos a la escasa red vial y a superficies dedicadas a la agricultura.

En tanto los usos no urbanos, contaban con el aporte de suelos agrícolas (18,28%), de la vegetación densa (17,65%) y la vegetación dispersa (60,62%).

Los cuerpos de agua representaban el 0,86% de superficie, mientras que la mina Lo Aguirre ocupaba un 1,67% de la superficie total de la cuenca.

La Figura 17, corresponde a la fotointerpretación de los usos/coberturas de suelos para el año 1996.

Figura 17. Usos/coberturas de suelo, 1996.



El predominio de las coberturas naturales, denota el estado natural (sin intervención antrópica) de la cuenca. Por lo tanto, estas coberturas influyen positivamente en todos

los componentes del ciclo hidrológico; el agua precipitada es captada en primer lugar por la vegetación existente, para luego escurrir indirectamente a los cuerpos de agua, al tiempo que se infiltraba favoreciendo la recarga de acuíferos; los posibles eventos de inundación estaban relacionados con la topografía y las características propias de los suelos en la zona.

4.1.2 Cambios en los usos/coberturas de suelo, 1996-2001.

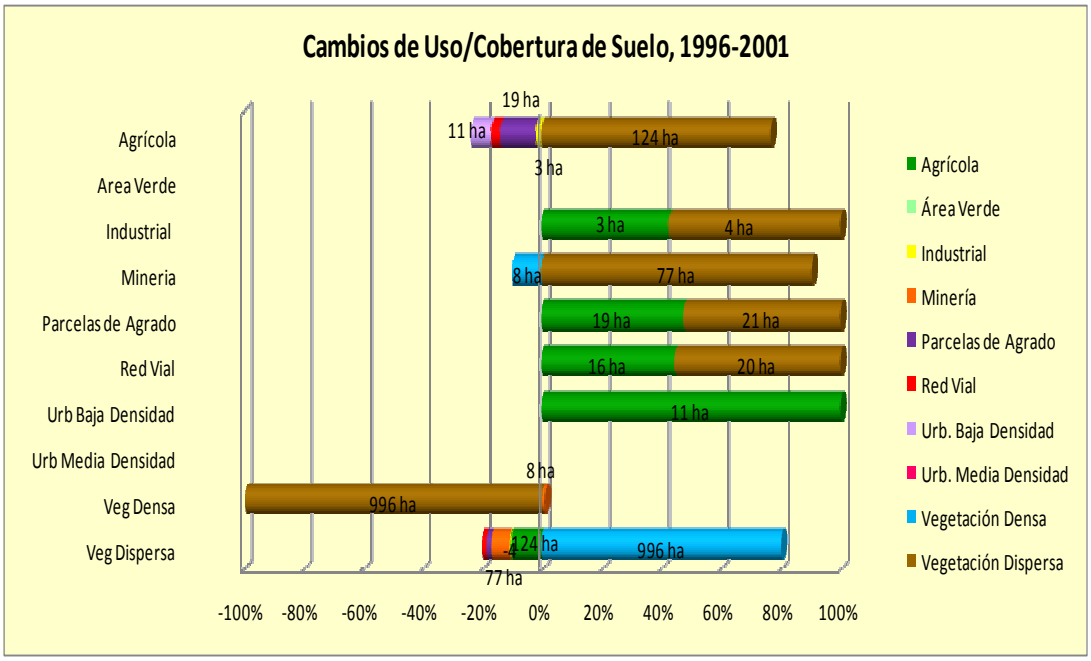
Si analizamos de manera global los cambios ocurridos en este período, es probable que los mismos se consideren poco significativos, sin embargo, al trabajar con cada uso/cobertura de suelo, es posible determinar el por qué de los cambios y cuáles coberturas han aportado al aumento o disminución de otras.

La Figura 18, muestra los cambios en los usos/coberturas de suelos durante el periodo 1996-2001. En el eje vertical se encuentran los usos/coberturas identificados en el año 1996 y en las barras horizontales, se encuentran los usos/coberturas que participaron en los cambios experimentados por los primeros.

La ocupación de los usos urbanos dentro de la cuenca para este período, pasó del 0,89% al 1,26% de la superficie total de la cuenca. Por lo tanto se observa que la superficie de crecimiento del uso urbano de baja densidad fue emplazada en un 100% sobre superficies que pertenecían a terrenos agrícolas; los cambios registrados por el uso industrial, las parcelas de agrado y la red vial se producen en desmedro de la vegetación dispersa (60% aproximadamente) y el uso agrícola (40% aproximadamente).

La minería creció sobre la vegetación dispersa, mientras que, parte del perímetro de la mina fue ocupada por vegetación densa (sector cercano al túnel Lo Aguirre); por su parte el aumento en superficie de la vegetación dispersa, fue producto de la degradación de las coberturas de vegetación densa, al tiempo que las superficies ocupadas por vegetación dispersa fueron sustituidas por usos del suelo industriales, agrícolas, mineras y red vial.

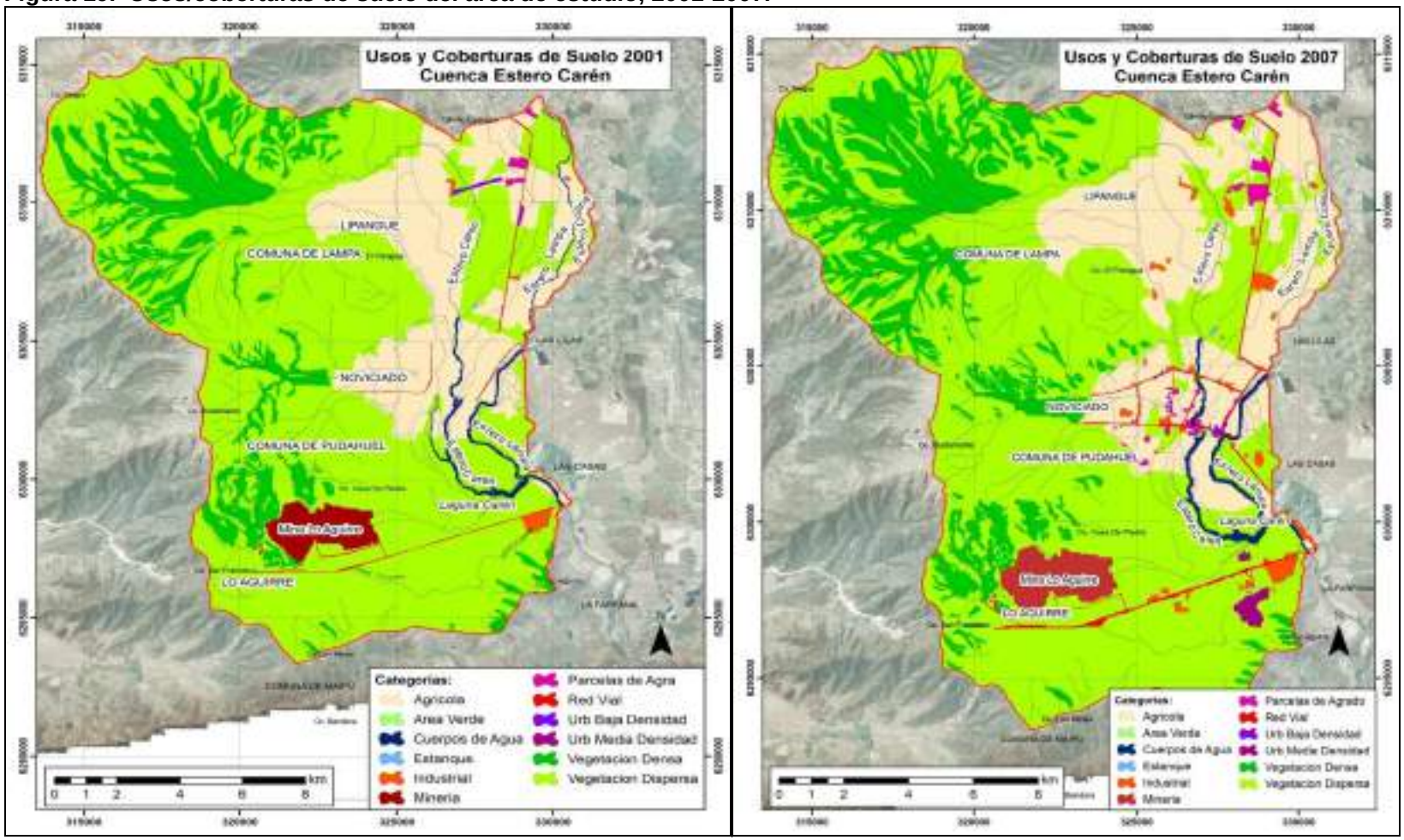
Figura 18. Cambios de uso/cobertura de suelo, 1996-2001.



4.1.3 Cambios en los usos/coberturas de suelo, 2001-2007.

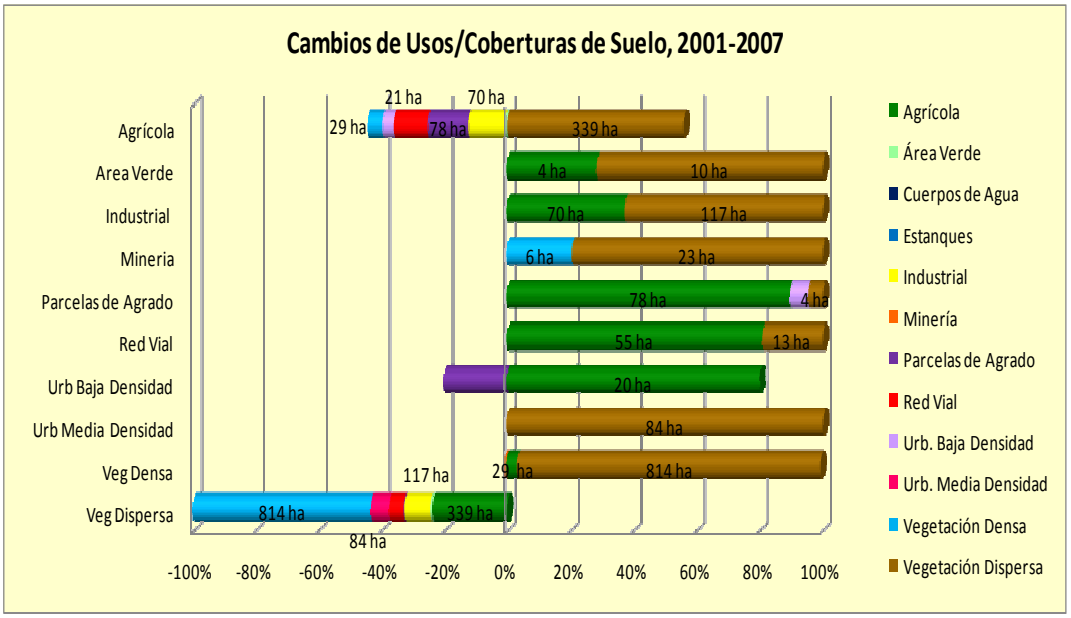
Para el período 2001-2007, los cambios en los usos y coberturas de suelos mantienen el mismo patrón del período anterior (Figura 19). Es así como los usos no urbanos continúan siendo reemplazados por suelos urbanos, llegando a ocupar estos últimos el 3,02% de la superficie total de la cuenca.

Figura 19. Usos/coberturas de suelo del área de estudio, 2001-2007.



Aparece entonces el uso residencial urbano de media densidad, el cual se caracteriza por presentar espacios verdes entre viviendas. Este uso se emplaza sobre la vegetación dispersa, en el sector conocido como Ciudad de Los Valles, al sur de la cuenca; de la misma manera aparecen áreas verdes (parques, bandejones) insertas en este uso. El desarrollo de infraestructura vial en el sector de Noviciado, propicia el aumento de usos urbanos como el industrial, el urbano de baja densidad y las parcelas de agrado, los cuales se emplazan principalmente sobre suelos de uso agrícola (Figura 20). El mismo efecto se produce al nororiente de la cuenca, pero prevalecen las parcelas de agrado y el uso industrial; usos industriales reemplazan también a la vegetación dispersa en sectores aledaños a la Ruta 68.

Figura 20. Cambios de usos/coberturas de suelo, 2001-2007.



Se aprecia además el reemplazo del uso residencial urbano de baja densidad por parcelas de agrado, sin embargo esta situación puede atribuirse a dificultades para distinguir entre un uso y otro al momento de fotointerpretar

4.1.4 Usos/coberturas de suelo para el año 2018

La figura 21 muestra la simulación de los usos/coberturas de suelo para el año 2018, junto a la fotointerpretación de los observados en el año 2007 o situación actual.

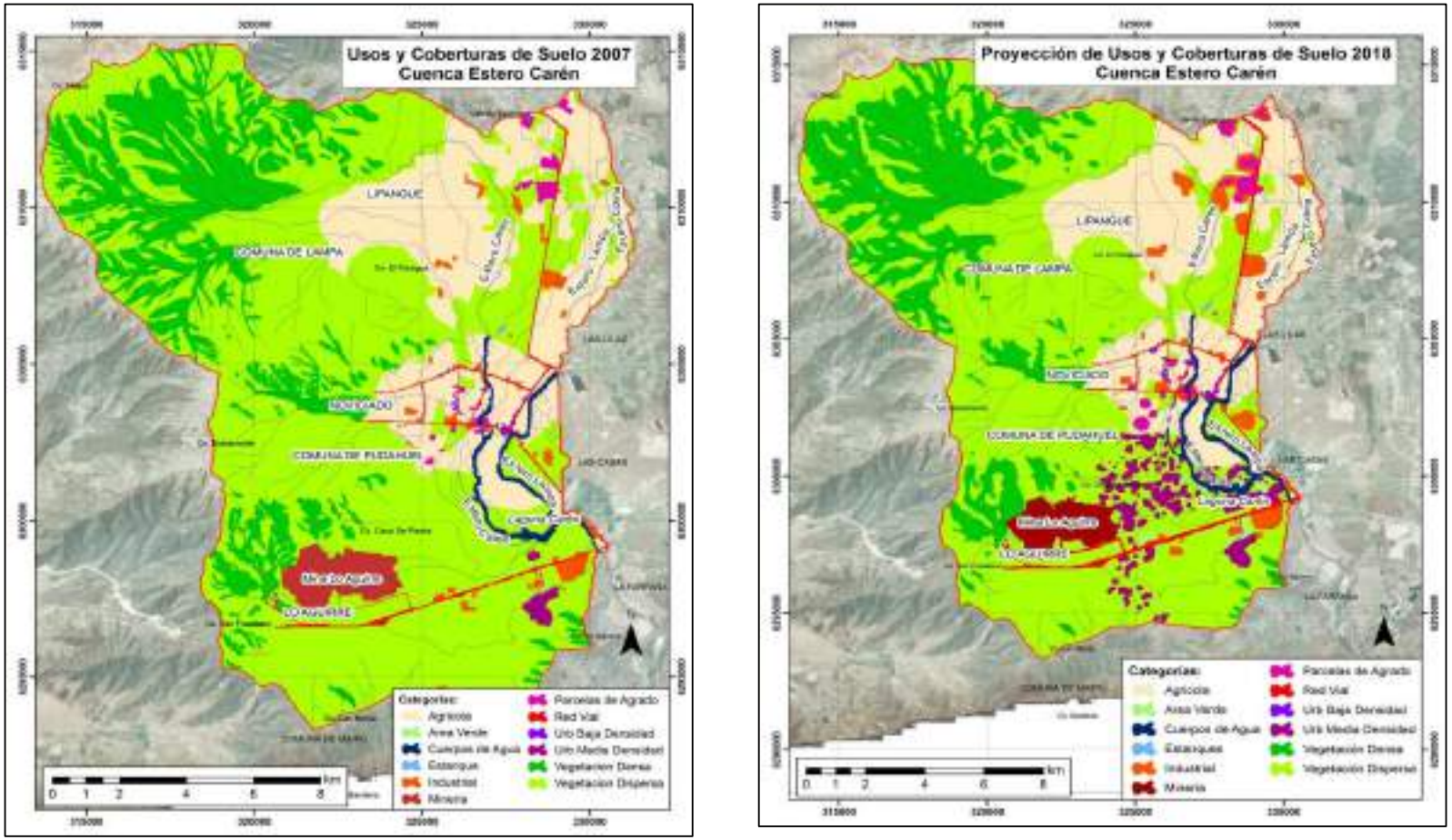
Para el año 2018 se esperaría un aumento en las superficies ocupadas por los usos agrícolas (70,95 ha.), áreas verdes (91,5 ha.), parcelas de agrado (75,82 ha.), industrial (293,78 ha.), residencial urbano de baja densidad (14,67 ha.), residencial urbano de media densidad (676,37 ha.) y vegetación densa (58,82 ha.). Todos estos crecimientos de superficie serían solventados por las áreas cubiertas por vegetación dispersa, que, en consecuencia, disminuirían en 1494,74 hectáreas.

Si comparamos las superficies de los diferentes Usos/Coberturas de Suelos durante todos los años de estudio, incluyendo la simulación del año 2018 (Tabla 8), podemos decir que evidentemente el patrón de distribución y crecimiento es muy similar entre cada período: degradación de coberturas vegetales, para dar paso a otros usos de suelo; aumento de las superficies agrícolas en el valle central de la cuenca, pero con usos residenciales (residencial de baja densidad y parcelas de agrado) e industriales insertos y la expansión urbana en áreas adyacentes a la Ruta 68.

Tabla 8. Superficies de los usos/coberturas de suelo, 1996-2018.

USOS/COBERTURA DE SUELOS	1996 (ha)	2001(ha)	2007(ha)	Simulación 2018 (ha)
Agricola	4563,87	4658,39	4755,97	4826,92
Area Verde	0,00	0,00	13,30	104,89
Cuerpos de Agua	214,82	240,42	233,75	308,20
Estanque	3,81	3,77	3,74	6,08
Industrial	69,23	71,88	265,14	558,92
Mineria	416,38	485,13	514,86	533,52
Parcelas de Agra	0,00	40,48	126,25	202,32
Red Vial	135,96	176,06	243,44	360,48
Urb Baja Densidad	17,39	28,04	23,62	38,29
Urb Media Densidad	0,00	0,00	83,60	759,97
Vegetacion Densa	4406,96	3418,70	4254,54	4313,36
Vegetacion Dispersa	15132,73	15838,55	14443,67	12948,93
AREA TOTAL	**24961,89**	**24961,89**	**24961,89**	24961,89

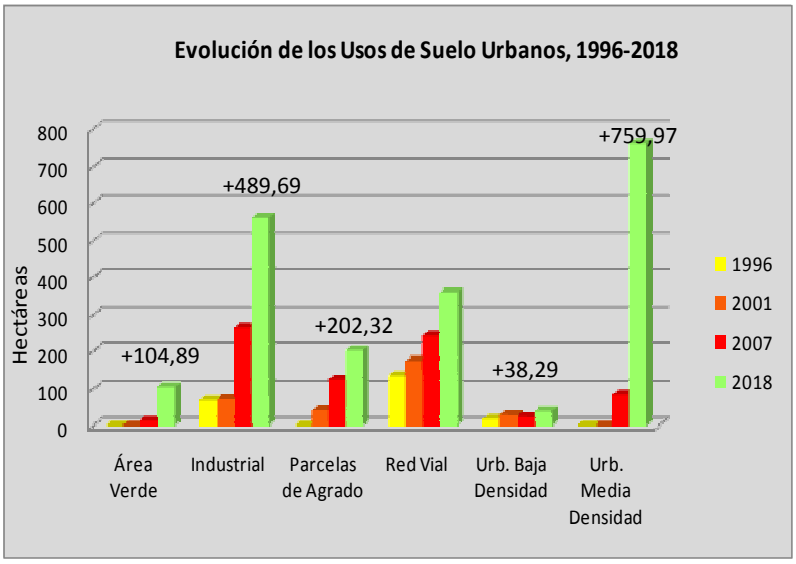
Figura 21. Comparación de usos/coberturas de suelo 2007-2018



Los cuerpos y los estanques de agua, la minería y la red vial también aumentan sus superficies, sin embargo, el crecimiento de estos usos/coberturas no constituye una tendencia lineal como los otros usos. Las Cadenas de Markov basaron este aumento en los cambios registrados en los períodos anteriores, pero en dichos períodos las superficies de los cuerpos de agua y los estanques pudieron aumentar o disminuir, debido al exceso o disminución de precipitaciones; en tanto que el crecimiento de la red vial es totalmente planificado.

De acuerdo con la simulación del año 2018, se espera que los usos de suelos urbanos ocupen el 8,11% de la superficie total de la cuenca y que los mayores aportes para este aumento provengan en un 53,28% del uso residencial urbano de media densidad y en un 23,14% del uso industrial (Figura 22).

Figura 22. Evolución de los usos de suelo urbanos, 1996-2018.

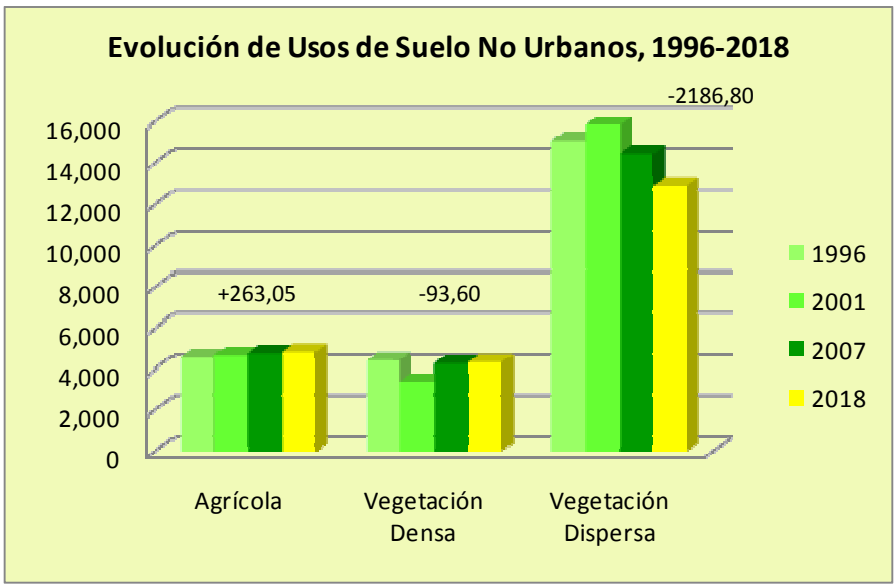


En cuanto a los suelos no urbanos, se esperaría que el uso agrícola aumente su superficie en 1,46% y la vegetación densa en 1,36%, simultáneamente la vegetación dispersa, perdería el 10,35% de la superficie con la que contaba en el año 2007.

Si bien es cierto que la simulación del año 2018 arroja como resultado un aumento en la superficie del uso agrícola, este mismo uso también aporta a las superficies que

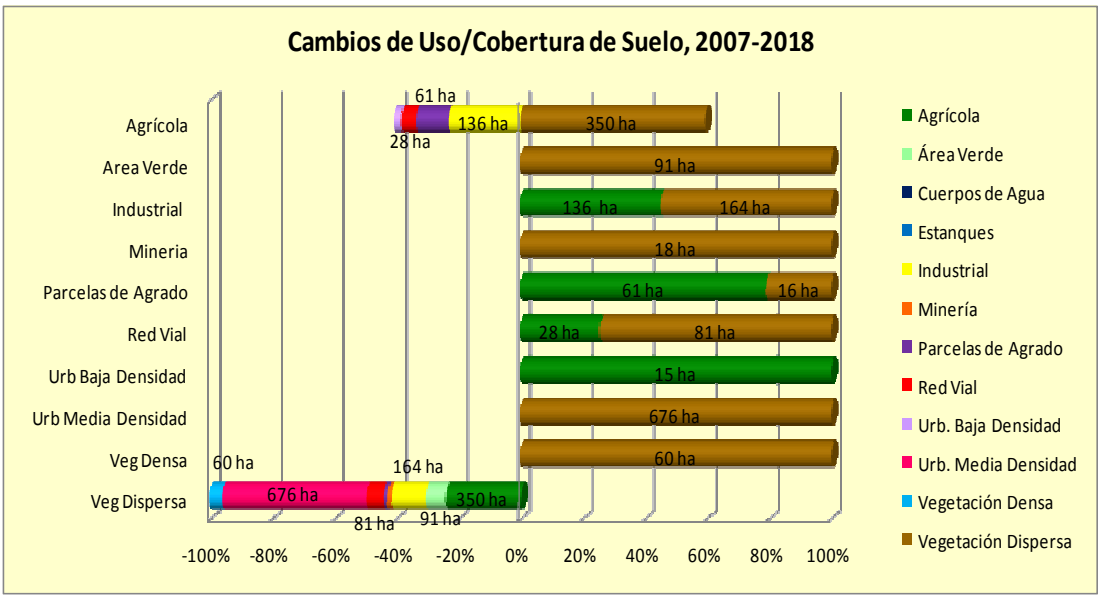
serían ocupadas por el crecimiento del uso industrial (136 ha.), las parcelas de agrado (61 ha.), la red vial (28 ha.) y el uso residencial urbano de media densidad (676 ha.) (Figura 23).

Figura 23. Evolución de los usos de suelo no urbanos, 1996-2018.



Para este mismo año la vegetación dispersa pierde superficie, al igual que en el año 2007, aportando a la superficies de crecimiento de las áreas verdes (91 has.), del uso industrial (164 ha.), las parcelas de agrado (16 ha.), la red vial (81 ha.), la minería (18 ha), del uso residencial urbano de media densidad (676 ha.) y la vegetación densa (60 ha.) (Figura 24).

Figura 24. Cambios de usos/coberturas de suelo, 2007-2018.

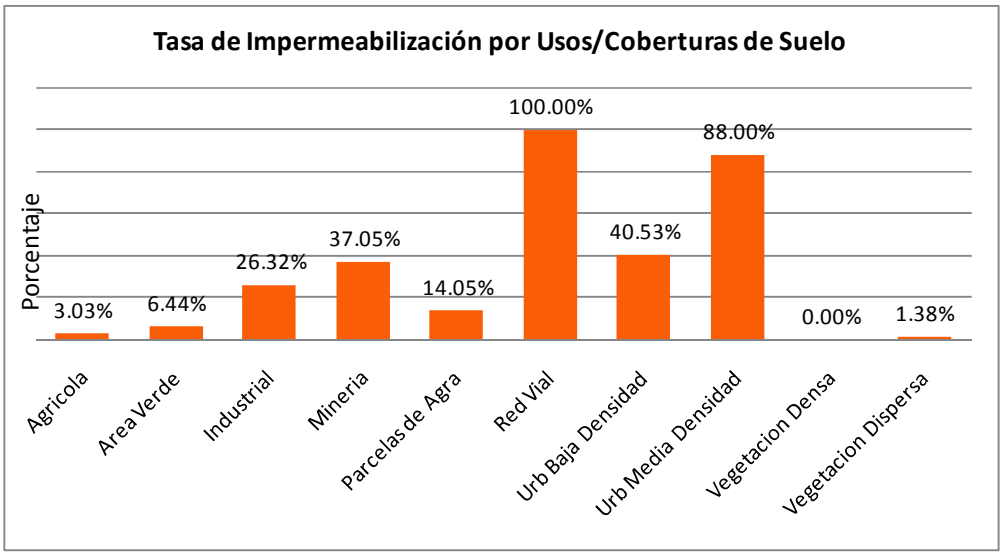


4.2 Cambios en el coeficiente de escorrentía superficial.

Las Áreas Totales Impermeables (ATIs) dentro de la cuenca del estero Carén, presentan un leve aumento asociado al aumento del uso residencial urbano de media densidad. Es así como las ATIs representan el 1,44% de la superficie total de la cuenca en 1996, 2,28% y 3,80% para los años 2001 y 2007 respectivamente.

Las Tasas de Impermeabilización dentro de los diferente usos/coberturas de suelo, se observan en la Figura 25. Es evidente que los mayores valores de suelos impermeabilizados corresponden a la red vial (100%), el uso residencial urbano de media densidad (88%) y el uso residencial urbano de baja densidad (40,53%).

Figura 25. Tasas de impermeabilización por uso/cobertura de suelo.



Las Tasas de Impermeabilización permiten determinar los valores de la CN correspondiente a cada grupo hidrológico. La Tabla 9 muestra estas y otras variables hidrológicas que determinan el coeficiente de escorrentía (CE) superficial para cada uso y cobertura de suelo. Puede observarse que los mayores valores de CE corresponden a la red vial (0,94), el uso industrial (0,74), el uso residencial urbano de baja (0,64) y media densidad (0,82). Por otro lado los menores valores de CE se encuentran en las áreas verdes (0,06) y la vegetación densa (0,12).

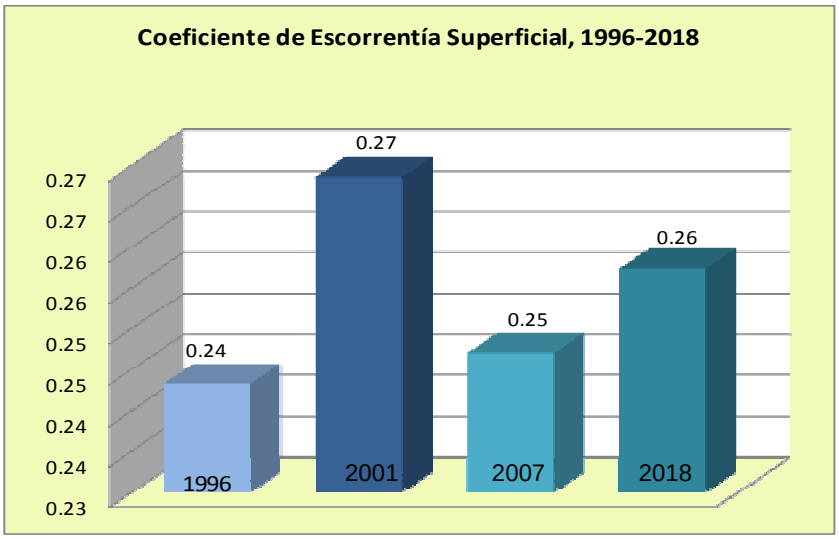
Tabla 9. Máximo potencial de retención (S), escorrentía real (Pe) y coeficiente de escorrentía superficial, según uso y cobertura de suelo.

Usos/Coberturas de Suelo 2007	Grupo Hidrológico	CN	S	Pe	Ce
Agrícola					
	A	72	98,78	32,9	0,34
	B	81	59,58	48,8	0,51
	C	88	34,64	63,7	0,67
	D	91	25,12	70,8	0,74
Área verde					
	A	49	264,37	5,9	0,06
	B	69	114,12	28,3	0,30
	C	79	67,52	45,0	0,47
Red Vial					
	A	98	5,18	89,5	0,94
	B	98	5,18	89,5	0,94
	C	98	5,18	89,5	0,94
	D	98	5,18	89,5	0,94
Cuerpos de Agua					
	A	100	0,00	95,5	1,00
	B	100	0,00	95,5	1,00
	C	100	0,00	95,5	1,00
	D	100	0,00	95,5	1,00
Estanque					
	C	100	0,00	95,5	1,00
Industrial					
	A	81	59,58	48,8	0,51
	B	88	34,64	63,7	0,67
	C	91	25,12	70,8	0,74
	D	93	19,12	75,9	0,79
Minería					
	A	76	80,21	39,5	0,41
	B	85	44,82	57,0	0,60
	D	91	25,12	70,8	0,74
Parcelas de Agrado					
	A	51	244,04	7,5	0,08
	B	68	119,53	26,8	0,28
	C	79	67,52	45,0	0,47
	D	84	48,38	54,9	0,57
Urb Baja Densidad					
	B	75	84,67	37,8	0,40
	C	83	52,02	52,8	0,55
	D	87	37,95	61,4	0,64
Urb Media Densidad					
	A	89	31,39	66,0	0,69
	B	93	19,12	75,9	0,79
	C	94	16,21	78,5	0,82
Vegetación Densa					
	A	25	762,00	4,6	0,05
	B	55	207,82	11,1	0,12
Vegetación Dispersa					
	A	68	119,53	26,8	0,28
	B	79	67,52	45,0	0,47
	C	86	41,35	59,2	0,62
	D	89	31,39	66,0	0,69

Los valores del CE varían dentro de un mismo uso/cobertura de suelo debido a las variaciones de los grupos hidrológicos de los suelos.

Aunque cada uso/cobertura de suelo presenta un valor individual de CE, este fue estimado para toda la cuenca, a partir de una precipitación de tormenta máxima en 24 horas de 95.00 mm. La escorrentía superficial de los años 1996, 2001 y 2007 fue de 23,23 mm, 25,65 mm y 23,60 mm respectivamente, en tanto que la estimada para el 2018 fue de 24,57 mm (Anexo 4). La Figura 26 muestra los valores de CE, obtenidos a partir de los datos anteriores y tal como se aprecia, no es posible observar una tendencia de cambio que indique un aumento sistemático de los coeficientes de escorrentía al interior de la cuenca del estero Carén.

Figura 26. Coeficientes de escorrentía de la cuenca del estero Carén, 1996-2018.



Los estados del CE en toda la cuenca, también fueron evaluados espacialmente. Es así como la Figura 27, muestra las zonas donde el mismo aumentó, disminuyó o no presentó cambios durante los períodos de estudio.

Para el período 1996-2001, se aprecia un aumento del CE en la parte alta de la cuenca, relacionado con la pérdida de vegetación densa; en la parte baja, también se

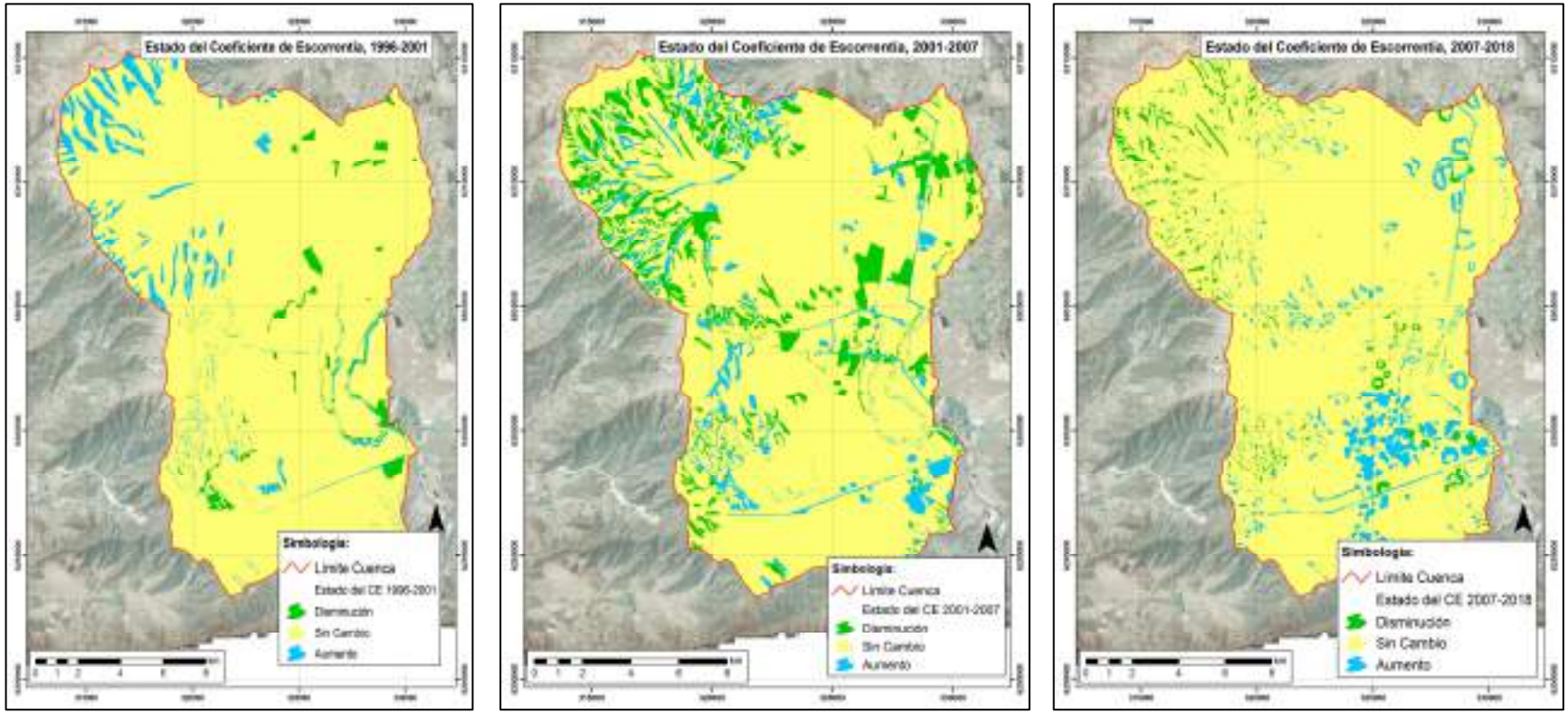
observan aumentos en el CE pero relacionados con las superficies de la minería y los cuerpos de agua.

La mayor disminución espacial del CE, se presenta en el período 2001-2007. Estas zonas se ubican en la parte alta de la cuenca, donde se concentra la vegetación densa y en el valle, sobre las superficies ocupadas por las parcelas de agrado. También se aprecian zonas donde el CE aumenta sobre el uso industrial, la expansión de la red vial y los nuevos núcleos urbanos, formados por el uso residencial urbano de media densidad.

El último período de estudio, 2007-2018, muestra un marcado aumento del CE sobre el uso industrial y el residencial urbano de media densidad. A pesar de que el CE disminuyó en la parte alta de la cuenca, la variación no fue suficiente para contrarrestar los efectos producidos por la expansión de estas superficies impermeables.

Por lo tanto, se aprecia que durante todos los períodos de estudio, las dinámicas de aumento y disminución del CE no siguen un patrón definido; sin embargo, recién en el último período los usos con mayores de tasas de impermeabilización dominan estos cambios.

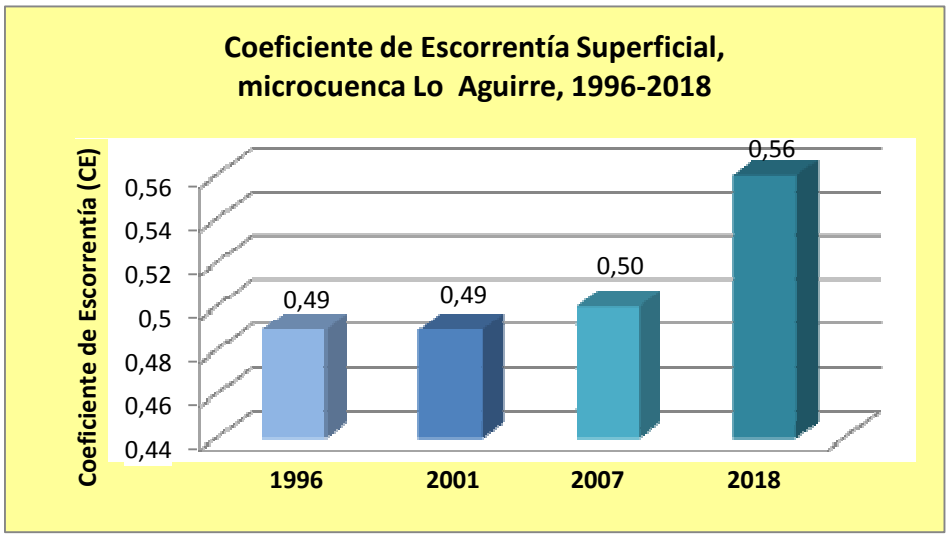
Figura 27. Estados del coeficiente de escorrentía superficial para la cuenca del estero Carén, durante el período de estudio 1996-2018.



Coeficiente de escorrentía superficial para la microcuenca Lo Aguirre.

Como se señaló anteriormente, la cuenca del Estero Carén, está formada por tres microcuencas tributarias de las cuales interesa la de Lo Aguirre (ubicada al sur del área de estudio) (Anexo 6), por ser esta la zona donde se desarrollaran los PDUC. Por lo tanto los resultados de evaluar el comportamiento del CE dentro la misma, se muestran en la Figura 28.

Figura 28. Coeficiente de escorrentía superficial, microcuenca Lo Aguirre.



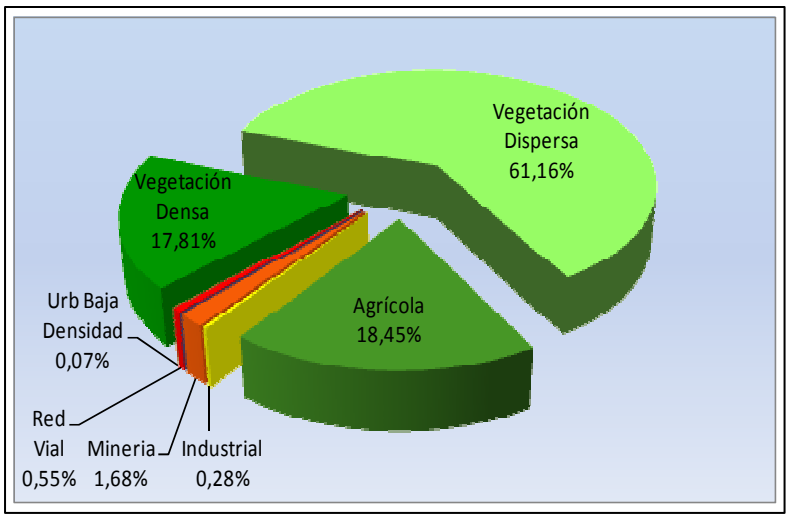
Durante el período 1996-2001, los cambios de usos/cobertura de suelos registrados, no incluían superficies impermeables, por lo tanto el CE no presenta variaciones. Sin embargo, este valor es relativamente alto si se considera la poca intervención antrópica de la zona; por lo tanto este resultado (Anexo 5). evidencia la presencia de grupos hidrológicos con niveles de infiltración baja a muy baja.

Para el año 2007 el leve aumento del CE, indica el crecimiento del uso residencial urbano de media densidad, asociado al proyecto Ciudad de los Valles; en tanto el aumento esperado para el año 2018, corresponde a la adición de superficies impermeables relacionada al desarrollo de los PDUC.

4.2.1 Participación de los usos/coberturas de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial para la cuenca del estero Carén.

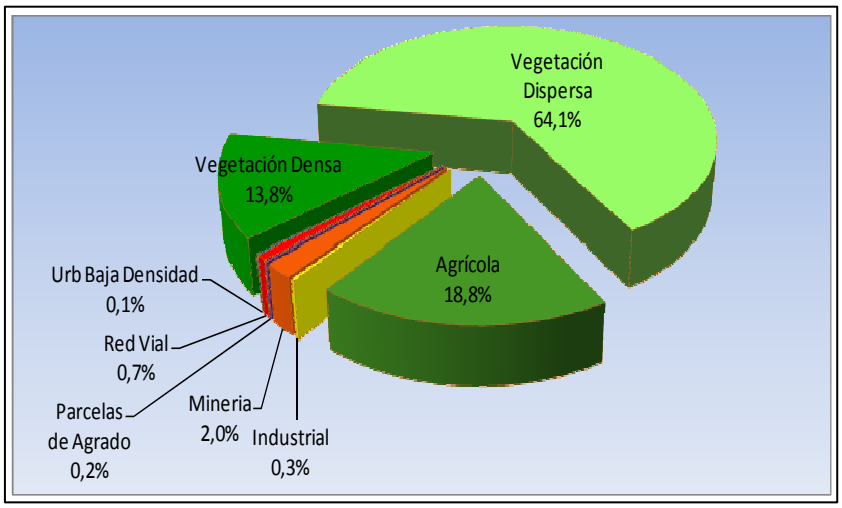
En el año 1996 la vegetación dispersa ocupaba el 61,16% de la superficie total de la cuenca, la vegetación densa el 17,81% y el uso agrícola el 18,45%. El uso industrial, la red vial, el uso residencial urbano de baja densidad y la minería presentaban porcentajes de ocupación territorial mínimos. Por lo tanto, las coberturas naturales ejercían mayor influencia en el coeficiente de escorrentía superficial. La Figura 29 muestra la distribución de los usos/coberturas de suelo para ese año.

Figura 29. Participación de los usos de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial, 1996.



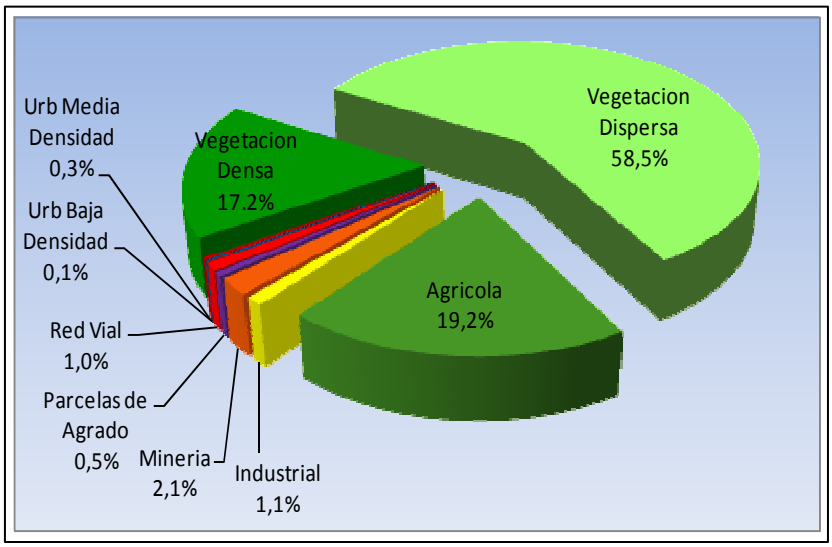
En el período 1996-2001, el CE aumenta y la vegetación dispersa sigue ocupando el mayor porcentaje de superficie dentro de la cuenca (64,1%), sin embargo la vegetación densa disminuye su superficie al 13,8% del total de la cuenca (Figura 30). En tanto, el resto de los usos registran un pequeño aumento en su superficie, al tiempo que aparecen las parcelas de agrado.

Figura 30. Participación de los usos de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial, 1996-2001.



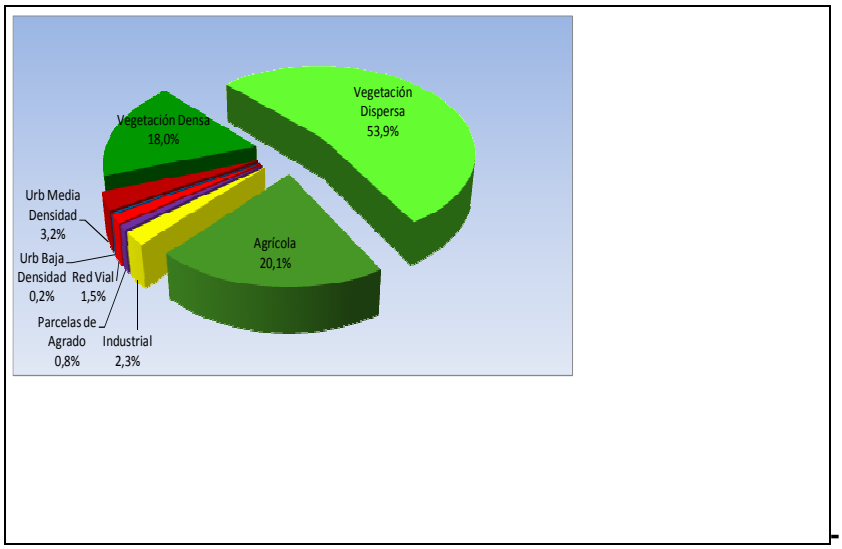
Se esperaba que durante el período 2001-2007, el CE aumentara debido al reemplazo de vegetación dispersa por el uso residencial urbano de media densidad; sin embargo ocurre la situación contraria. Por otro lado la vegetación densa aumenta su superficie en un 3,4%, lo que permite inferir que la variación del CE en este período está relacionada con el aumento de las áreas cubiertas por este tipo de vegetación. La Figura 31, muestra la participación del los usos de suelo para este período.

Figura 31. Participación de los usos de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial, 2001-2007.



Para el período 2007-2018, pareciera que por primera vez, los usos residenciales de media densidad intervinieran en los cambios del CE. Si bien es cierto que su ocupación sólo corresponde el 3,2% de superficie de toda la cuenca, el porcentaje de impermeabilización de este uso es de un 88%. De igual manera el uso industrial, la red vial y las parcelas de agrado aumentan su superficie (Figura 32).

Figura 32. Participación de los usos de suelo en los cambios del coeficiente de escorrentía superficial, 2007-2018.



Por lo tanto se observan cuatro situaciones relevantes. En primer lugar, a partir del año 2001 la vegetación dispersa empieza a perder superficie para dar paso a otros usos; en segundo lugar, a partir de este mismo año la vegetación densa aumenta continuamente aunque en menor proporción; en el año 2007 aparecen los primeros núcleos urbanos de media densidad y por último para el año 2018 este mismo uso empieza a consolidarse. Por lo tanto durante el período 1996-2007, la vegetación densa domina la dinámica de los cambios del CE, pero para el período 2007-2018, aunque la vegetación densa aumente, no será suficiente para contrarrestar el aumento en la escorrentía superficial causada por la expansión del uso urbano de media densidad.

4.3 Relación de las zonas con riesgo de inundación y las zonas de expansión urbana.

Para el año 2018 el uso residencial urbano de media densidad se concentraría en la zona suroriente de la cuenca del estero Carén y el aumento de su superficie estaría directamente relacionado con el desarrollo de los PDUC. Al superponer las superficies de los proyectos (Praderas y PCT) sobre este sector de la cuenca, se puede apreciar que los mismos se desarrollarían sobre los grupos hidrológicos A, B y C. Por lo tanto a los suelos que se encuentren dentro de los grupos B y C, que presentan una infiltración que va de media a baja, se les estaría adicionando superficies impermeables que aumentarían la capacidad de escurrimiento superficial de los mismos. La tabla 9 muestra además, en las superficies correspondientes a los PDUC, más del 69% del agua que precipita se convertiría en escorrentía superficial.

Complementando lo anterior, se encuentran las zonas con riesgos de inundación del proyecto OTAS. Este riesgo está relacionado tanto con el período de recurrencia de los eventos de inundación como con la capacidad de drenaje de los suelos. Se divide en alto, medio y bajo dependiendo del período, el cual puede ser diez años, indeterminado o cien años. Para esta situación, las superficies de los PDUC se encuentran dentro de las tres zonas (Figura 33); el PCT, por su cercanía al estero Carén, se encuentra dentro de las zonas de alto y medio riesgo; en tanto la mayor parte de la superficie del proyecto Praderas, se encuentra dentro de la zona de riesgo bajo de inundación, situación que está relacionada con la pendiente de la superficie en esta zona.

La profundidad de los acuíferos (Figura 34) dentro del área de estudio, varía de muy superficial (0-2.00 m) a poco profunda (2.00-20.00 m). Parte de la superficie de los PDUC se encuentra sobre zonas de acuíferos muy superficiales, al igual que sectores que otros usos como las parcelas de agrado, el uso residencial urbano de baja densidad y el uso agrícola.

Figura 33. Zonas con riesgos de inundación, cuenca del estero Carén.

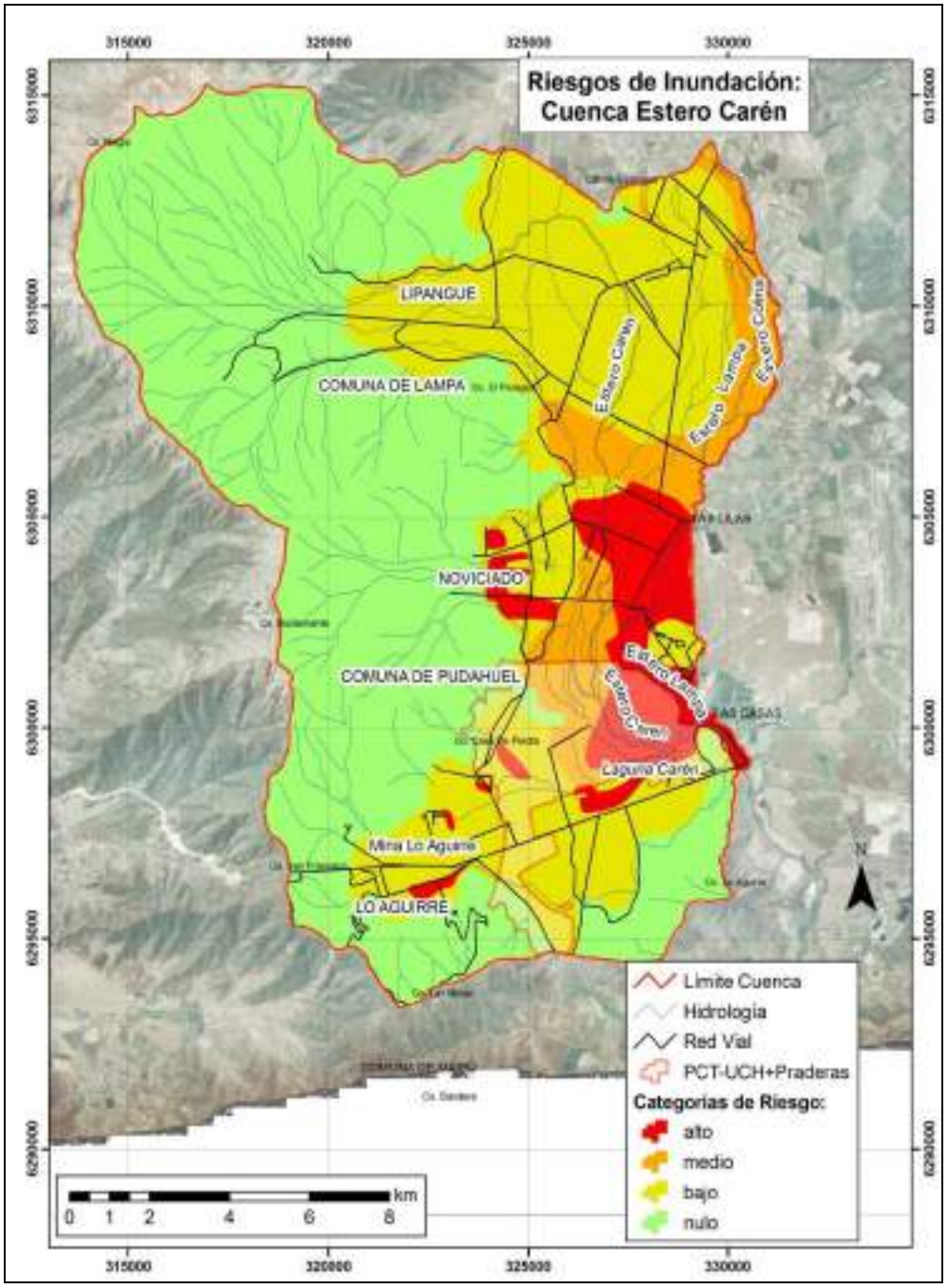
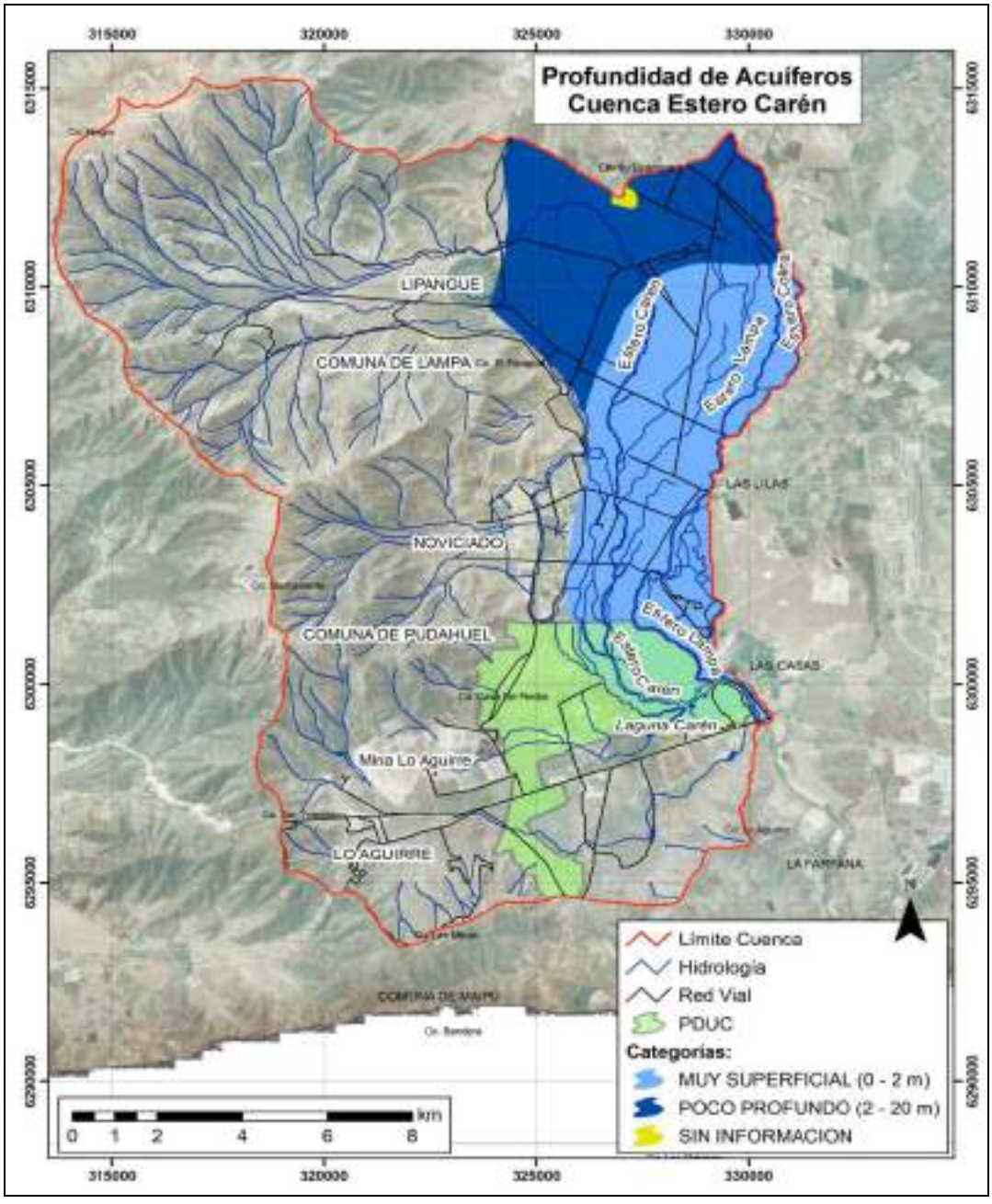


Figura 34. Profundidad de acuíferos, cuenca del estero Carén.



CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Discusión de resultados

Es posible indicar que los cambios observados en las superficies de las coberturas de suelos durante el período 1996-2007, predominantemente vegetales, se relacionan con la cantidad de agua precipitada, influenciada por el fenómeno ENSO (El Niño-Southern Oscillation) es sus fases frías y cálidas. Las primeras, correspondientes al Fenómeno de la Niña que se caracteriza por registrar años más secos y fríos que lo normal, mientras que el Fenómeno de el Niño registra mayores lluvias y temperaturas comparativamente más elevadas. El presente estudio, basa su análisis en la precipitación máxima registrada, en 24 horas, para veinte años. Esta situación podría considerarse como un período de retorno muy corto, sin embargo obedece a la disponibilidad de datos y al intervalo de tiempo en el que se analizaron los cambios de usos/coberturas de suelo.

La Cuenca del estero Carén, se caracteriza por la existencia de terrenos dedicados a la agricultura, al igual que por la presencia de grandes extensiones cubiertas por vegetación dispersa y densa en el sector montañoso, representado por el Sitio Prioritario para la Conservación de la Biodiversidad correspondiente al Cerro El Roble. Dado que se trata de una superficie básicamente natural, la evolución de los usos y coberturas de suelo, a través del tiempo, obedece en gran parte a variaciones climáticas interanuales. Ello implica que durante los eventos de mayores precipitaciones se desarrollen las cubiertas vegetales, especialmente en sus componentes herbáceos, que desaparecen durante las sequías, restando sólo la presencia de las formaciones vegetales arbustivas y leñosas.

Este trabajo complementa los estudios de López (2009) y Sandoval (2008) en el sentido de que si bien es cierto que la cuenca se encuentra en estado casi natural (lo cual es importante debido a la cercanía a la ciudad de Santiago) también se observa intervención antrópica en el valle central y el sector sur de la misma. El sector de Noviciado, presenta la mayor intervención de este tipo dentro del valle, mientras que en

el sector sur sobresalen los terrenos urbanizados cercanos a la Ruta 68 y al proyecto urbano residencial Ciudad de los Valles, instalado en la última década y que anunció la expansión de la ciudad hacia las áreas naturales del poniente. También se destaca la presencia de parcelas de agrado en el sector nororiente y el valle central del estero Carén, manifestando otra de las tendencias de crecimiento de las superficies urbanizadas, esta vez a través de urbanizaciones aisladas en medio de terrenos naturales o agrícolas.

Durante el período 1996-2001, el aumento del uso urbano de baja densidad se observa asociado esencialmente con el aumento de la red vial, ya que estos ejes promueven la aparición de asentamientos humanos al igual que de actividades industriales. Por su parte, la aparición de las parcelas de agrado dentro del uso agrícola, refleja la incorporación de nuevos instrumentos de gestión urbana, que permiten el loteo de sitios agroresidenciales en medio de estas áreas.

En gran medida, el desarrollo de las áreas verdes y del uso urbano de media densidad, obedecen a la instalación del proyecto Ciudad de los Valles dentro del período 2001-2007. Por su parte, el uso industrial, si bien es considerado urbano, corresponde a agroindustrias emplazadas dentro del uso agrícola.

Por lo antes señalado, al comparar los periodos de estudio se puede inferir que, aunque los cambios observados sean mínimos (si se comparan con la superficie total de la cuenca), implican una tendencia sistemática de reemplazo de las superficies ocupadas por los usos agrícolas y las coberturas de vegetación dispersa por usos urbanos. Al interpretar la magnitud del cambio se debe tener en cuenta el problema de escala mencionado en la delimitación del área de estudio. Actualmente, los impactos de la planificación urbana sólo se evalúan a nivel regional, viéndose minimizados muchos de ellos; lo que quiere decir que las decisiones adoptadas no consideran sus impactos a menor escala espacial. Por esto se vio la necesidad de analizar la microcuenca de Lo Aguirre, para demostrar los efectos de la intervención antrópica en este sector específico en donde se llevarán a cabo el desarrollo de los PDUC. La escasa vegetación densa, la vegetación dispersa y las áreas verdes a nivel de esta

microcuenca, no pueden amortiguar el crecimiento de usos de suelo urbano que experimentará con los años (residencial de media densidad, industrial, red vial). Además, partiendo de la base que los grupos hidrológicos existentes corresponden a suelos con permeabilidad lenta, la situación se torna más crítica.

En lo que respecta a las áreas totales de impermeabilización, estas son un indicador del estado de la salud ambiental de la cuenca. La incipiente urbanización en el área de estudio corresponde a ATIs poco importantes (3,80%), lo que indica que se trata de una unidad que aún puede ser considerada como teniendo buena salud ambiental en los cauces (Zandbergen, et al., 2000, en Romero & Vázquez, 2005). Lamentablemente, ello no se ve reflejado en la calidad ambiental del agua, debido a que los esteros Lampa y Carén reciben las aguas servidas de sectores ubicados en el norte de la cuenca.

Es evidente que los valores del coeficiente de escorrentía superficial no muestran un patrón de aumento definido y sistemático como los encontrados en la cuenca de Macul (Fuentes, 2009), en las cuencas del piedemonte andino de la ciudad de Santiago en general (Romero y Vásquez, 2005) o en las urbanizaciones recientes de las comunas de Lampa y Colina (López, 2009). Mientras no se desencadene un proceso sistemático de urbanización de densidades medias y altas, estos cambios están esencialmente relacionados con las variaciones interanuales de las coberturas naturales.

En el año 2001, el aumento del coeficiente de escorrentía superficial coincide con la pérdida de vegetación densa en la parte alta de la cuenca. Para el año 2007, algo más lluvioso, esta cobertura recupera parte de la superficie perdida, por lo que el sistema puede amortiguar la adición de superficies impermeables por parte del uso residencial urbano de media densidad y disminuir el coeficiente de escorrentía superficial. Ello demuestra que la posición topológica de las áreas de cambio al interior de la cuenca es algo relevante y que las interacciones entre las secciones altas, medias y bajas requieren planes integrales de manejo, especialmente una vez que se produce el proceso de urbanización.

Con respecto al modelo de simulación de usos/coberturas de suelo, es importante señalar que el año elegido como resultado (2018), responde a limitaciones propias del proceso markoviano. Este se basa en los cambios registrados en un período anterior (1996-2007, once años) en donde la precisión de la simulación se puede garantizar sólo para ese mismo período en el futuro (2007-2018, once años).

En la simulación de usos/coberturas de suelo para el año 2018, las restricciones y forzamientos considerados por la Evaluación de Multicriterio, favorecen el crecimiento de las áreas cubiertas por vegetación densa. Ello como una medida de gestión ambiental para que se mantengan o perfeccionen las regulaciones territoriales que protegen las áreas y los ecosistemas naturales, especialmente frente al progreso de los proyectos de urbanización condicionados, en la parte baja de la cuenca. No obstante, esta claro que esto no siempre sucede, como demuestran los resultados de López (2009) en las comunas de Lampa y Colina.

Si bien es cierto que las coberturas vegetadas aumentarían al igual que el uso agrícola al año 2018, también lo hará el coeficiente de escorrentía. Esta aparente contradicción, en que aumenta la escorrentía superficial al mismo tiempo que lo hacen las coberturas que la limitan, demuestra que a partir de este período y para la totalidad de la cuenca, los cambios en el CE estarían dominados por la adición de superficies impermeables, en este caso por el uso residencial urbano de media densidad representado por los PDUC.

Las simulaciones se han realizado validando los modelos mediante la consideración de las situaciones observadas para la cuenca del estero Carén. No obstante, las evidencias acumuladas en otras áreas recientemente urbanizadas de la ciudad de Santiago indican la presencia de conjuntos edificados de gran superficie y con altos valores de impermeabilización, tal como sucede con los centros comerciales y sus extensas áreas de estacionamiento, o bien con la instalación de conjuntos residenciales de alta densidad. El comportamiento de las tasas de impermeabilización, de los coeficientes de escorrentía y de la salud ambiental de la cuenca depende en un alto grado del tipo, densidad y volumen de las instalaciones urbanas que ocurran en el

futuro. Ante una planificación urbana que privilegia crecientemente a los proyectos aislados de urbanización por sobre las zonificaciones de los usos del suelo contenidas en los planes reguladores, es de esperar la existencia de islas de impermeabilización, cuyos efectos dependerán finalmente de sus localizaciones dentro de la cuenca y de las medidas de manejo que se adopten en el resto del territorio.

Por otro lado, la memoria explicativa del Proyecto OTAS (2005), identifica la existencia de riesgos naturales, consistentes en áreas de inundación derivadas de la geomorfología de los suelos, en las comunas de Lampa, Quilicura y Pudahuel. De igual manera, se establece en dicho estudio que de modificar la topografía y las condiciones naturales de una zona, se deben actualizar las áreas de riesgos.

Las variables consideradas en este estudio son las precipitaciones y las ATIs, que influyen directamente en el CE. No se han considerado el flujo subterráneo o los aportes externos de otras cuencas. Se sugiere entonces, complementar esta investigación con estudios que incluyan un análisis del ciclo hidrológico completo y factores inherentes a la cuenca como la geomorfología. Al igual que otros indicadores de la salud ambiental de la cuenca como el índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI), procesos erosivos, calidad del agua y de la vegetación ripariana, entre otros.

Para potenciar estos resultados como indicadores de la planificación urbana, se podría realizar pruebas de sensibilidad en donde se modifiquen las variables al peor escenario posible. Es decir, un aumento sustancial del valor máximo de precipitación en 24 horas y las áreas totales impermeables, lo que indudablemente incrementaría el coeficiente de escorrentía superficial y la probabilidad de inundaciones en la parte baja de la cuenca.

Así mismo, se podrían repetir estos análisis para otras microcuencas, de manera que se puedan vislumbrar los efectos sinérgicos y acumulativos en las jerarquías hidrológicas mayores (subcuenca del estero Carén y cuenca del río Mapocho).

Igualmente, en la medida en que la información de usos y coberturas de suelo se encuentre disponible y se modifiquen las restricciones-forzamientos de la evaluación multicriterio, se podrían obtener otros resultados de la simulación, hacia escenarios donde la cuenca del estero Carén pierda la capacidad de resiliencia que ahora demuestra.

Desde el punto de vista de los usos del suelo, cabe señalar que el área en estudio, forma parte de las áreas de Interés Silvoagropecuario Mixto establecidos en el PRMS, situación que restringía, hasta un par de años atrás, el desarrollo de actividades que no fuesen agrícolas, salvo algunas excepciones (Artículo 8.3.2.2.). Ello aseguraba que las variaciones del paisaje obedecieran a las fluctuaciones de los sistemas ambientales naturales. No obstante, la modificación de este mismo instrumento, permitió el desarrollo de los PDUC en estas áreas. Pareciera entonces que la flexibilidad con la cual se elaboró el PRMS, permite la incorporación de nuevas áreas de expansión urbana dentro de la cuenca del estero Carén, con tan sólo seguir los procedimientos legales. Se establece además, la posibilidad de compensar la ocupación de suelos con excelente capacidad agrícola, a través de la rehabilitación de suelos con inferior calidad en otras zonas de la Región Metropolitana de Santiago, sin considerar que el valor ecosistémico al igual que los servicios ambientales prestados, son distintos.

Por otro lado, el Desarrollo Condicionado es visto como una fórmula mágica para resolver la segregación social y la escasez de áreas verdes a la que se enfrenta la ciudad. Para la primera situación es difícil ver los PDUC como posible solución, siendo que sólo el 18% de las viviendas dentro de los proyectos son sociales, por lo que pareciera que nos enfrentamos a una forma planificada de segregación. El impacto social de estos proyectos debió ser evaluado, sin embargo el SEIA sólo determina los impactos ambientales.

En lo referente al déficit de áreas verdes, la Organización Mundial de la Salud recomienda nueve metros cuadrados de las mismas por habitante. Sin embargo, proyectos urbanos condicionados como Praderas, alcanzan escasamente a cubrir

once metros cuadrados de área verde para sus potenciales habitantes, sin poder compensar la falta de espacios para recreación del resto de la ciudad.

Las Declaraciones de Impacto Ambiental de los PDUC dentro de la cuenca (Praderas y Parque Científico y Tecnológico de la Universidad de Chile), reconocen por separado la existencia de acuíferos someros, zonas de anegamiento y suelos con escurrimiento superficial rápido. El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, permite la predicción y evaluación de los impactos ambientales a través de modelos y simulaciones matemáticas, mas no establece la evaluación de impactos sinérgicos que incluyan varios proyectos como lo hace la Evaluación Ambiental Estratégica. Por lo tanto esta situación es considerada como una deficiencia del sistema de evaluación ambiental de proyectos individuales.

Ante todas estas situaciones es que se cuestionan las razones que validan la extensión de los límites de la ciudad, siendo que además, el sector poniente registra los mayores niveles de contaminación atmosférica, que si bien no son generados en él, se sumarían a los propios una vez densificado el sector.

5.2 Conclusiones

Las variaciones del coeficiente de escorrentía superficial en la cuenca del estero Carén, dentro del período 1996-2007, demuestran que las intervenciones antrópicas han sido pequeñas y por ello, la existencia de cierta capacidad que posee la cuenca, hasta el momento, para auto recuperarse (capacidad de resiliencia) y la influencia que sobre ésta ejercen las variaciones interanuales de los paisajes causadas por las fluctuaciones climáticas, aún cuando las superficies impermeables aumenten. Sin embargo, a nivel de microcuencas las intervenciones antrópicas se perciben más nítidamente, al producirse un aumento del coeficiente de escorrentía superficial, ligado a la presencia de usos de suelo urbano sobre espacios más reducidos y mayormente impactados por la instalación de viviendas, servicios e infraestructuras.

Para el mismo período 1996-2007, se identificó que la vegetación densa, es la cobertura de suelo que mayor influencia ejerció en las variaciones del coeficiente de escorrentía superficial. Si bien es cierto que el uso agrícola aumenta su superficie durante todo el período de estudio, el coeficiente de escorrentía aumenta al disminuir la vegetación densa.

Si el patrón observado de cambio de los usos/coberturas de suelo se mantiene en el futuro, el coeficiente de escorrentía superficial aumentaría para el año 2018 y la cuenca podría perder su capacidad para mantener dinámicamente en equilibrio todos sus componentes hídricos, aún cuando la vegetación densa aumente su superficie, debido principalmente a la incorporación de los Proyectos con Desarrollo Urbano Condicionado. Por lo tanto usos de suelo como el residencial urbano de media densidad y el industrial, pasarían a influir directamente en las variaciones del coeficiente de escorrentía superficial.

La cuenca del estero Carén, no registra grados de impacto ambiental como los de las cuencas del piedemonte andino y por ello, requeriría de planes de conservación de la naturaleza y gestión integrada de cuencas que permitan mantener y proteger sus características más naturales y sus servicios ambientales.

La distribución y diseño de la urbanización, puede variar con la finalidad de ajustarse a la situación económica al momento de ejecutar los proyectos, lo cual evidentemente cambiaría el comportamiento de los indicadores evaluados.

Cabe decir que no existe un pensar científico y sistémico dentro de la legislación, al momento de establecer las compensaciones por impactos o cambios en las zonificaciones de usos del suelo. El presente estudio permitió evaluar en conjunto, el impacto que sobre el coeficiente de escorrentía superficial y las zonas con riegos de inundación, ejercerían los PDUC a instalarse en la cuenca del estero Carén.

Aunque directamente la expansión urbana dentro de la cuenca del estero Carén, no se desarrolle en su totalidad sobre zonas con riegos de inundación, la probabilidad de que las condiciones actuales se vean modificadas, aumenta. Es decir que el efecto sinérgico de reducir las zonas de recargas de acuíferos, aumentar superficies impermeables y la existencia de suelos que por naturaleza tienen aptitud para la escorrentía, podría aumentar los riesgos de inundación ya existentes.

En resumen, es necesario replantearse la forma como se planifican las ciudades en Chile, con la finalidad de aprovechar al máximo las superficies urbanizables disponibles y la escorrentía superficial que estás producen. Indudablemente, las decisiones sobre los cambios de uso del suelo, inducen cambios acumulativos a largo plazo que pueden no ser observables durante décadas; por ende la planificación de los cambios de usos y coberturas de suelos, debe ser promovida por líderes e instituciones, a través de instrumentos que controlen los daños antes que estos aparezcan y consideren una evaluación integral de los impactos.

5.3 Recomendaciones

La expansión urbana dentro de la cuenca no se encuentra muy avanzada y las zonas existentes se localizan en el valle y el sector suroriente contiguo a la Ruta 68. Promover el uso residencial urbano de media densidad, puede aumentar las áreas impermeabilizadas, pero sin lugar a duda, esta situación depende de la distribución espacial de los proyectos, el porcentaje de áreas verdes y el diseño del alcantarillado pluvial, los cuales deben considerar las áreas de recargas de acuíferos y las zonas con riesgo de inundación.

El nuevo paradigma de drenaje urbano, está basado en la Gestión Integrada del Ciclo del Agua Urbana, el cual contempla la mitigación de los efectos de las inundaciones urbanas (Coombes y Kucsera, 2002); la optimización e integración de la planificación urbana y la gestión del ciclo del agua (Khouri, 2006; Langenbach et al., 2006) ; la incorporación de superficies permeables dentro de las ciudades, con la finalidad de proveer de zonas de infiltración (Heiko y Michael, 2006; Villareal, 2004); la determinación temprana de indicadores ambientales, que permitan evaluar los problemas dentro de cuencas urbanizadas (Rogersa y DeFee, 2005); la gestión integrada de las precipitaciones de tormenta y la escorrentía urbana (Miller, 2009; Martinet, 2008) y la aplicación de nuevas tecnologías, que permitan minimizar los efectos de la urbanización de cuencas (Last y Mckay, 2007; Miller, 2009; Ziemer, 2009; Martinet, 2008) entre otros principios.

Este paradigma también se basa en la integración de la ciencia para lograr cambios en la gestión del agua (Chlebek, 2009); la percepción de la población sobre los riegos de inundación y las medidas de gestión para controlar los mismos (Nascimiento et al., 2007) y la necesidad de aumentar las superficies de bosques urbanos (Zhu y Zhang, 2007). Debería considerarse por lo tanto, la inversión para la generación de áreas verdes y parques comunales, cuya finalidad real sea la de proveer a la población de espacios destinados a la recreación y la interacción entre los distintos grupos socioeconómicos, más no pasar a ser un requisito más de desarrollo urbano.

Es evidente que la gestión integrada de cuencas, el ordenamiento territorial de los usos y coberturas de suelos, la Evaluación Ambiental Estratégica (referida a los efectos ambientales sinérgicos y acumulativos de los planes y proyectos de urbanización), que integre todas las aristas de la expansión urbana (social, económica, ambiental); y la evaluación ambiental de los propios proyectos, señalarán las diferencias entre procesos de urbanización ambientalmente sustentables o no.

.

BIBLIOGRAFÍA

ANTROP, M., 2000a. Background concepts for integrated landscape analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment, 77 (2000) 17–28.

ANTROP, M., 2000b. Changing patterns in the urbanized countryside of western Europe. Landscape Ecol. 15, 257–270.

ANTROP, M., 2004. Landscape change and the urbanization process in Europe. Landscape and Urban Planning, 67: 9-26.

ARNOLD, C. AND GIBBONS, J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. Journal of the American Planning Association, 62 (2): 243-258.

BORSDORF, A. 2000. El desarrollo urbano de Valdivia. Estudio de caso en una Ciudad Mediana Chilena. Espacio y Desarrollo, 12: 45-82.

CAMPANA, N. Y TUCCI, C., 2001. Predicting floods from urban scenarios: case study of the Dilúvio Basin, Porto Alegre, Brazil. Urban Water, 3:113-124.

CASTRO, C. 2006. Impacto de la dispersión urbana de la ciudad de Santiago en la calidad del suelo en la periferia Norte: Colina y Lampa. En Capel H. e Hidalgo R. Construyendo la Ciudad del Siglo XXI. Retos y Perspectivas Urbanas en España y Chile, 279-291.

CONFERENCIA Regional de la FAO para América Latina y el Caribe (28ª, 2004, Ciudad de Guatemala, Guatemala). Seguridad alimentaria como estrategia de desarrollo rural. En: SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL. Diagnóstico sobre Biodiversidad en la Región Metropolitana [en línea] http://www.sinia.cl/1292/articles-39510_pdf_biodiv.pdf [consulta: 25 noviembre 2008].

COOMBES, P. y Kuczera, G., 2002. Integrated urban water cycle management: Moving Towards Systems Understanding. 2nd National Conference On Water Sensitive Urban Design, Brisbane Convention Centre, Brisbane.

CHAMPION, T., 2001. Urbanization, suburbanization, counter urbanization and reurbanization. En Antrop, M., 2004. Landscape change and the urbanization process in Europe. Landscape and Urban Planning, 67: 9-26.

CHLEBEK, J., 2009. Integrating the sciences to bring about change in the way water is managed. En: Dr Jenkins Memorial Competition, Advantica Offices, Loughborough, 18th February 2009.

CHOW, V., MAIDMENT, D., MAYS, L. 1994. Hidrología aplicada. McGraw Hill Interamericana, S.A. 584 p.

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. 2007: Climas de la Región Metropolitana [en línea] http://www.meteochile.cl/climas/climas_region_metropolitana.html [consulta: 27 noviembre 2007]

DUCCI, M. 2002. Área urbana de Santiago 1991-2000: expansión de la industria y la vivienda. EURE (Santiago), 28 (85): 187-207.

EASTMAN, J. 2003. IDRISI Kilimanjaro. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University, 290 p.

EL BOSQUE S.A. [s.a.]. Praderas: Una nueva comunidad Mirando hacia el futuro. [en línea] http://www.juanbraun.cl/tex/JB_BrochurePraderas.pdf [consulta:15 noviembre 2008

EL BOSQUE S.A. [s.a.] [en línea] http://www.praderas.cl/home.act [consulta: 15 noviembre 2008].

ENGLISH, W., PINKERTON, B., WILSON, T., YARROW, G., 2004. Riparian area management handbook for agriculture and forestry lands. Clemson University Extensión Bulletin, 42 p.

FERRANDO, F. 2006. Sobre inundaciones y anegamientos. Revista de Urbanismo, N°15, Santiago de Chile, publicación electrónica ed itada por el Departamento de Urbanismo, F.A.U. de la Universidad de Chile. I.S.S.N. 0717-5051.

FERRER, M., BLANCO, J., RAMÍREZ, J., 2004. Propuesta metodológica para la adaptación del parámetro del número de curva a las nuevas fuentes de datos. [en línea] www.ciccp.es/biblio_digital/Icitema_III/congreso/.../040205.pdf [consulta: 23 junio 2009]

FIGUEROA, O. 2005. Transporte urbano y globalización: políticas y efectos en América Latina. EURE (Santiago) 31 (94): 41-53.

FRICK, J. 2007. Efectos ambientales en los suelos del sector poniente de Santiago como consecuencia del proceso de expansión urbana: Comunas de Maipú y Pudahuel. Memoria para optar al título profesional de geógrafo. Universidad de Chile, 144 p.

FUENTES, C. 2007. Análisis de los cambios usos-coberturas de suelos y la escorrentía en tres cuencas del piedemonte de Santiago entre 1975 – 2007. Proyecto de Investigación Fondecyt 1050423. Efectos Geográfico Ambientales del Crecimiento Urbano de las Áreas Metropolitanas de Santiago, Valparaíso y Concepción. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Escuela de Geografía. Laboratorio de Medioambiente y Territorio, 45 p.

FUENTES, C., 2009. Evaluación socio-ambiental de los efectos de la variación en la escorrentía superficial derivada del proceso de urbanización en la cuenca de Macul, entre 1975-2007. Memoria para optar al título profesional de geógrafo. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Escuela de Geografía 93 p.

FUNDACIÓN VALLE LO AGUIRRE, 2003. Declaración de impacto ambiental anteproyecto de la urbanización del parque científico tecnológico de la universidad de Chile. [en línea] www.e-seia.cl [consulta: 24 abril 2009].

GAJARDO, R**.** 1994. La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 165p.

GOBIERNO REGIONAL DE SANTIAGO, 2005. Proyecto bases para el ordenamiento territorial ambientalmente Sustentable de la Región Metropolitana de Santiago. Santiago, 127 p.

HEIKO, S. y MICHAEL, U., 2006. Urban stormwater management demonstration projects in the Emscher region. En: First SWITCH Scientific Meeting: 9-10 Jan 2006. United Kingdom, University of Birmingham.

HENRÍQUEZ, C., AZÓCAR, G. Y AGUAYO, M., 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Bio Bío, Chile. Revista de Geografía Norte Grande, 36: 61-74.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Censo de población y vivienda 2002. [en línea]http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_poblacion_vivienda/censo2002/mapa_interactivo/mapa_interactivo.htm [consulta: 25 noviembre 2008].

KHOURI, G., 2006. Integrated water cycle management: "An Australian Perspective". European Water, 15(16): 23-32.

LANGENBACH, H., HOLSTE, W. AND ECKART, J., 2006. Theses for the future of water sensitive urban design (WSUD). En: First SWITCH Scientific Meeting: 9-10 Jan 2006. United Kingdom, University of Birmingham.

LAST, E. y MACKAY, R., 2007. Developing a new scoping model for urban water sustainability. En: 2nd SWITCH Scientific Meeting: 25 - 29 November 2007. Dan Panorama Hotel, Tel-Aviv, Israel

LÓPEZ, J. 2006. Impacto del crecimiento del gran Santiago en el deterioro funcional de sus espacios pericentrales. En Capel H. e Hidalgo R. Construyendo la Ciudad del Siglo XXI. Retos y Perspectivas Urbanas en España y Chile, 279-291.

LÓPEZ, C., 2009. Efectos ambientales del crecimiento espacial del área metropolitana de Santiago (AMS) sobre el potencial del hábitat de los paisajes del sistema El Roble-Batuco en la comuna de Lampa, Período 1996-2007. Memoria para optar al título profesional de geógrafo. Universidad de Chile, 128 p.

MARDONES, M. Y VIDAL, C., 2001. La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. EURE (Santiago), 27 (81): 97-122.

MARTINET, C., 2009. Urban stream syndrome: the future of stream ecosystems in urban watersheds. [en línea] https://src.sigmaxi.org/programs/issues/Martinet.pdf [consulta: 5 abril 2009].

MILLER, M., 2009. Integrated storm water management for a sustainable use system. Urban Water Management, April/May, 3(2).

MOSCOSO, C. 2007. Cambios en los usos y coberturas de suelo y sus efectos sobre la escorrentía urbana. Valparaíso y Viña del Mar, Periodo 1980-2005. Memoria para optar al título profesional de geógrafo. Universidad de Chile, 129 p.

NASCIMENTO, N., GUIMARÃES, E., MINGOTI, S., MOURA, N., FALEIRO, R., 2007. Assessing public perception of flood risk and flood control measure in urban areas. En: 2nd SWITCH Scientific Meeting: 25 - 29 November 2007. Dan Panorama Hotel, Tel-Aviv, Israel.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. La microcuenca hidrográfica como ámbito de planificación del uso y manejo de los recursos naturales, enfoque socio-territorial. [en línea] http://www.rlc.fao.org/es/tierra/micro.htm [consulta: 22 junio 2009].

ORTIZ, J. Y MORALES, S. 2002. Impacto socio-espacial de las migraciones intraurbanas en entidades de centro y de nuevas periferias del gran Santiago. EURE (Santiago), 28 (85): 171-185.

PACIONE, M., 2001. Urban geography: a global perspective. Routledge, London. En Antrop, M., 2004. Landscape Change and the Urbanization Process in Europe. Landscape and Urban Planning. 67: 9-26.

PAULEIT, S., ENNOS, R., GOLDING, Y. (2005). Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change—a study in Merseyside, UK. Landscape and Urban Planning, 71:295–31

ROGERS, G. AND DEFEE, B. 2005. Long-term impact of development on a watershed: early indicators of future problems. Landscape and Urban Planning 73: 215–233.

ROJAS, J. Y ROMERO, H., 2003 Ciudad, ecosistema urbano y calidad de vida. En Rojas, J. y Parra, O. Conceptos básicos sobre medio ambiente y desarrollo sustentable. Buenos Aires. Overprint Grupo Impresor SRL Pp. 221-242

ROMERO, H. Y VÁSQUEZ, A., 2005. Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago. EURE (Santiago), 31 (94): 97-117.

ROMERO, H., 2006. Análisis espacial del crecimiento urbano y de sus efectos sobre la sostenibilidad ambiental de las metrópolis y ciudades intermedias chilenas.

ROMERO, H. Y VÁSQUEZ, A., 2006. La comodificación de los territorios urbanizables y la degradación ambiental en Santiago de Chile. En Capel H. e Hidalgo R. Construyendo la ciudad del siglo XXI. Retos y perspectivas urbanas en España y Chile, 263-279.

ROMERO, R., MOSCOSO, C., SARRICOLEA, P., SMITH, P. Y VÁSQUEZ, 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. y Hidalgo, R. (Eds). Santiago de Chile. Movilidad espacial y reconfiguración metropolitana. Santiago, Eure libros – Geolibros.

ROMERO, H., FUENTES, C., LÓPEZ, C., SMITH, P. Y VÁSQUEZ, A. (2008). Environmental effects of the recently urban sprawl proposal at Santiago de Chile: Urban governance and public policy under a neoliberal context. Ponencia enviada al 3rd Internacional Seminar on Environmetal Planning and Management URBEVIRON, Sao Paulo 2008, 6-8 octubre. Presbyterian University Mckenzli, Sao Paulo, Brasil.

SANDOVAL, G. (2008). Aplicación de un modelo de simulación de cambio de uso y cobertura de suelo en la comuna de Pudahuel para los años 2016 y 2025. Proyecto de Investigación Fondecyt 1080080. Sustentabilidad ambiental urbana, justicia socioambiental y escenarios de calidad de vida futura en la metrópolis de Santiago, Valparaíso y en la ciudad intermedia de Chillán". Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Escuela de Geografía. Laboratorio de Medioambiente y Territorio, 39 p.

SECRETARÍA MINISTERIAL METROPOLITANA DE VIVIENDA Y URBANISMO, 2006. Declaración de impacto ambiental modificación – PRMS/PDUC3 Plan Regulador Metropolitano de Santiago Proyecto "Ciudad Lo Aguirre" – Comuna de Pudahuel. [en línea] www.e-seia.cl [consulta: 24 abril 2009].

SECRETARÍA MINISTERIAL METROPOLITANA DE VIVIENDA Y URBANISMO, 2007. Ordenanza plan regulador metropolitano de Santiago. Santiago, 178 p.

SECRETARÍA MINISTERIAL METROPOLITANA DE VIVIENDA Y URBANISMO, 2008. Propuesta de actualización, Plan regulador Metropolitano de Santiago. [en línea] www.minvu.cl [consulta: 20 noviembre 2008].

SEKLIZIOTIS, S. (1980). A Survey of Urban Open Space Using Colour-infrared Aerial Photographs. PhD Thesis, University of Aston, Aston.

SEMINARIO Apoyo a Parques como Instrumentos de Política Tecnológica (2003, España). Asociación de parques científicos y tecnológicos de España. Progress Creativos. 100 p. [en línea] http://www.apte.org/var/lib/samiportal/pub/addons/file/Libro1.pdf [consulta: 29 noviembre 2008]

SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL. Diagnóstico sobre biodiversidad en la región metropolitana [en línea] http://www.sinia.cl/1292/articles-39510_pdf_biodiv.pdf [consulta: 25 noviembre 2008].

SOIL CONSERVATION SERVICE (1986). Urban hydrology for small watersheds, United States Department of Agriculture.

STONE, B. (2004). Paving over paradise: how land use regulations promote residential imperviousness. Landscape and Urban Planning 69: 101–113

TORRES, A. (2004). Apuntes de clase sobre hidrología urbana. Bogotá, Colombia. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 377 p.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-HABITAT), 2008a. The century of the city. En su Urban World, 1:22-24.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-HABITAT), 2008b. State of the world's cities 2008/2009 Harmonious Cities. Nairobi, Kenya.

VILLARREAL, E. y LARS, A., 2004. Inner city stormwater control using a combination of best management practices. Ecological Engineering 22: 279–298.

UNIVERSIDAD DE CHILE (2002). Proyecto ordenamiento territorial ambientalmente sustentable. Planificación Ecológica del Territorio. Guía Metodológica. Santiago, 90 p

VÁSQUEZ, A., SALGADO, M., ROMERO, H. Y SMITH, P. (2007). Desigualdades socioeconómicas y distribución inequitativa de los riesgos ambientales en las comunas de Peñalolen y San Pedro de la Paz. Una perspectiva de justicia ambiental. Revista de Geografía Norte Grande. (Enviada)

WHITE, M., GREER, K. (2006). The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of los Peñasquitos Creek, California. Landscape and Urban Planning, 74:125–138.

WHITFORD, V., ENNOS, A. Y HANDLEY, J. (2001). City form and natural process – indicator for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, U.K. Landscape and Urban Planning, 57: 91-103.

ZHU, P. y ZHANG, Y., 2008. Demand for urban forests in United States cities. Landscape and Urban Planning, 84: 293–300.

ZIEMER, J., 2009. Build green, think clear. Urban Water Management February/March.

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías del Área de Estudio.

Laguna Carén

Ciudad de Los Valles

Ciudad de Los Valles

Anexo 2. Tipologías de usos/coberturas de suelo utilizados para la fotointerpretación.

Cultivos Parcelas de Agrado

Residencial urbano de baja densidad Residencial urbano de media densidad

Vegetación Densa Vegetación Dispersa

Minería

Anexo 3. Precipitación Total Anual dentro de la cuenca del estero Carén.

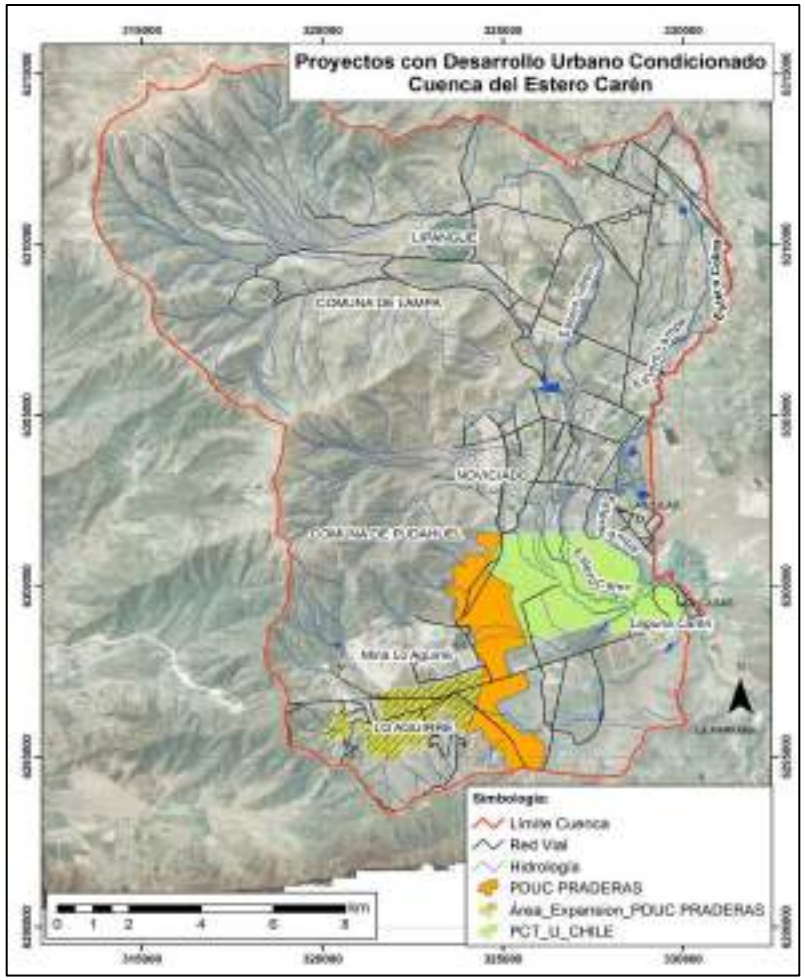
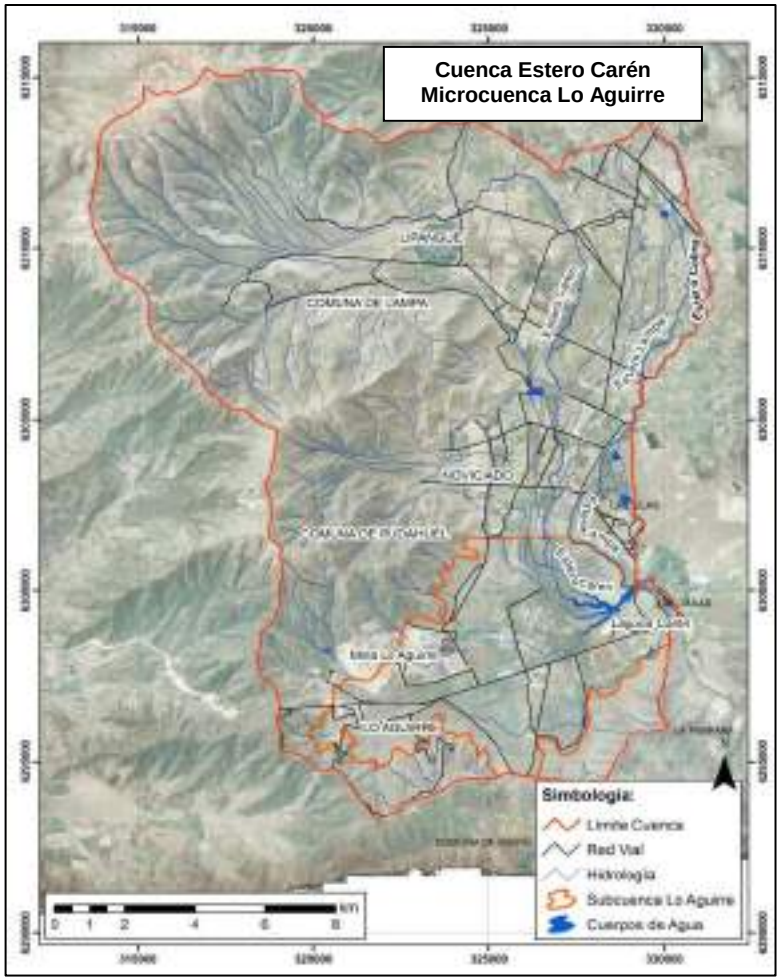
AÑO	PREC. TOTAL ANUAL (mm)
1988	108.3
1989	206.8
1990	133.4
1991	253.7
1992	365.8
1993	234.3
1994	174.9
1995	160.1
1996	134.8
1997	590.3
1998	71.6
1999	298.3
2000	376.6
2001	285
2002	491.4
2003	153.6
2004	278.5
2005	323.3
2006	275.9

Fuente: Elaboración propia, basada en el Anuario Meteorológico, Dirección Meteorológica de Chile.

Anexo 4. Índice de Escorrentía Superficial para la cuenca del estero Carén.

	Capacidad de Retención	Escorrentía	
Año	Máxima Ponderada (S)	Real(Pe)	CE
1996	134.23 mm	23.2 mm	0.24
2001	124.09 mm	25.70 mm	0.27
2007	132.65 mm	23.60 mm	0.25
2018	128.48 mm	24.60 mm	0.26

Anexo 5. Índice de escorrentía superficial para la microcuenca Lo Aguirre.

	Capacidad de Retención	Escorrentía	
Año	Máxima Ponderada (S)	Real(Pe)	CE
1996	63.22 mm	47.00 mm	0.49
2001	63.74 mm	46.70 mm	0.49
2007	61.21 mm	48.00 mm	0.50
2018	51.58 mm	53.10 mm	0.56

Anexo 6. Proyectos con desarrollo condicionado dentro de la cuenca del estero Carén y microcuenca Lo Aguirre.