



Universidad de Chile  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Escuela de Pregrado  
Carrera de Geografía

# **PATRONES MULTI-ESCALARES DE PERTURBACIÓN EN LOS PAISAJES SOCIOECOLÓGICOS DE LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO ENTRE LOS AÑOS 1997-2004**

Memoria para optar al título de Geógrafo

**RODRIGO ANDRÉS VILLEGAS SALGADO**

**Profesor Guía: María Cristina Fragkou**

**SANTIAGO, CHILE**

**2014**

## Agradecimientos

"In the realm of ideas, everything depends on enthusiasm; in the real world, all rests on perseverance."

Johann Wolfgang Von Goethe.

Quisiera dedicar estas páginas a aquellos individuos que hicieron esta investigación y memoria de título posible. A mis amigos y compañeros en esta gran carrera que me acompañaron en el desarrollo de esta memoria, La Organización de Memoriones Unidos: Alonso, Marianna, y Gricel; y a Luis, Geri, Amaru, Christian, Camilo, Bárbara, y Daniela, cuyas amistades hicieron que esta carrera fuese una increíble experiencia. A mis camaradas y hermanos de armas, Andrés, Cartaja, Gringo, Ñupo, Dene, Tincho, Eddie y Talsi. A mi polola, Tracy, quien jugó un papel clave en los momentos difíciles y frustrantes en esta investigación. A mis padres, que me ofrecieron cuanto apoyo pudieron. A mi profesora guía, María Cristina que me asesoró y apoyó siempre que lo necesitaba. A mis profesores informantes, Alexis y Patricio, cuyas contribuciones, críticas y feedbacks fueron esenciales para el desarrollo de este proyecto. A Gerardo Ubilla, cuyo feedback y conversaciones lograron mejorar la calidad, claridad y consistencia de esta memoria. A mi perros, Don Khan y la Mati, por alegrarme los días. A los gatis, Gaius Julius Caesar Augustus, Imperator et Pontifex Maximus Gatiromae; Cleopatra del Nilo, Ámbar de las flores, Gaspar Gatuso y su madre, Muñeca Alfonsina.

A los cientos de miles de hombres que dieron sus vidas en el campo de batalla en mis conquistas a través de la saga Total War. A los millones de habitantes en mis ciudades en Civilization V, y a las vidas que se perdieron en la defensa y expansión de mi civilización. A Ghandi, Nuclear Warmonger and Destroyer of Civilizations, que no nos ataque con armas nucleares. Al Comandante Sheppard, y su equipo, que salvaron a la galaxia de la aniquilación total a manos de los Reapers. A Altaïr Ibn-La'Ahad, Ezio Auditore da Firenze, y Connor Kenway, por protegernos de los Templarios. A Jim Raynor y Sarah Kerrigan, por derrotar a Arcturus Mengsk y lograr el éxito de la revolución contra el Dominio Terran. A Lara Croft, por destruir los restos de la Sun Queen. A Max Payne, por sus épicas escenas de tiroteos en cámara lenta. A Deckard Cain y Tyrael por su sabiduría y apoyo en la guerra contra Diablo y sus esbirros. A Lee Everett, por hacer todo lo posible para proteger a Clementine en el apocalipsis zombie, que en paz descansa.

A Godzilla por protegernos de los Kaiju, así como a los Jaegers que también los combaten. A Eren Jaeger, y sus compañeros por protegernos de los Titanes. A Optimus Prime, y los Autobots por defendernos de los Decepticons. A Obi-Wan Kenoby, Quin-Gon Jin, y Mace Windu por su lucha con los Sith, y a Darth Vader por ser el sith más badass que hay. A Spartacus, Crixus, Gannicus y Oenomaus, por su lucha contra la esclavitud.

A todos ellos y más, gracias.

## Resumen

La pérdida de biodiversidad constituye una de las más importantes amenazas para el ser humano y su futuro. Los cambios de cobertura y uso de suelo que afectan la provisión de servicios ecosistémicos (perturbación) son una de las causas principales. Considerando estas dinámicas desde una perspectiva de sistemas complejos adaptativos, la escala juega un rol crucial en la gestión y sustentabilidad de los paisajes socioecológicos. Entender cómo se comportan las perturbaciones a diferentes escalas espaciales, es de gran importancia para lograr un desarrollo sustentable estos paisajes. De lo contrario, se producen discordancias escalares que resultan en la degradación de los ecosistemas. En este contexto, la Región Metropolitana de Santiago, Chile, destaca por su gran dinamismo económico y demográfico. Cuantificando los cambios más drásticos de vegetación en ésta, entre 1997 y 2004, se obtuvieron los patrones de perturbación por medio del algoritmo de ventanas móviles en diez escalas espaciales, para luego ser analizados según uso y cobertura de suelo. Se encontró que Los cultivos, anuales y permanentes constituyen la principal fuente de perturbación en la Región y sus Provincias por sobre otras coberturas de suelo como la silvicultura o la urbanización/minería. Estos roles tienden a cambiar según la escala y Provincia en cuestión. Por otra parte, las áreas naturales actúan como sumideros a nivel regional y provincial. También, se encontró que los cultivos producen la principal discordancia multiescalar con las otras coberturas de suelo analizadas. Respecto a los patrones de perturbación en la Región, éstos poseen una distribución relativamente equitativa entre sus Provincias, lo cual podría ser debido al rol de la variable topográfica como límite de los sistemas antrópicos. Finalmente, esta investigación constituye una pequeña incursión en el potencial teórico y práctico que ofrece el estudio de la complejidad al estudio geográfico en el ámbito de la sustentabilidad.

*Palabras claves: discordancias escalares; perturbación multiescalar; cambio de cobertura y uso de suelo; sistemas socioecológicos; perturbación fuente-sumidero.*

## Abstract

Biodiversity loss constitutes one of the most important threats to human beings and their future. Land cover/land use changes that affect provision of ecosystem services (disturbance) are among their most important causes. By considering these dynamics from a complex adaptive systems perspective, scale plays a key role in the management and sustainability of social-ecological landscapes. Understanding how disturbances behave at different spatial scales is of great importance to achieve sustainable development of these landscapes. On the contrary, scale mismatches can occur that result in ecosystem degradation. In this context, the Metropolitan Region of Santiago, Chile, excels by its great economic and demographic dynamism. Quantifying the most drastic vegetation changes in it, between the years 1997 and 2004, disturbance patterns were obtained by using the moving windows algorithm in ten spatial scales, which were later analyzed according to land use/land cover. It has been found that annual and permanent crops are the main disturbance source in the Region and its Provinces over other land uses like forestry and urbanization/mining, whose role tend to change according to scale and Province, while natural areas behave like disturbance sinks at regional and provincial levels. It has also been found that crops produce the main scale mismatch with the other analyzed land uses/covers. Regarding disturbance patterns in the Region, these are relatively equally distributed among its Provinces, which can be associated to the role of topographic variables acting as system limits to human systems. Finally, this research constitutes a small incursion in the theoretical and practical potential that complexity studies have to offer.

*Key words: scale mismatches; multi-scale disturbance patterns; land use/land cover change; social-ecological systems; source-sink disturbance patterns.*

## Índice de Contenidos

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>I</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Índice de Contenidos</b> .....	<b>IV</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>VI</b>
<b>Índice de Cuadros</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Índice de Ecuaciones</b> .....	<b>IX</b>
<b>Glosario</b> .....	<b>X</b>
<b>I.Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Presentación del problema de estudio</b> .....	<b>3</b>
1.1    Introducción y planteamiento del problema.....	3
1.1.1    La expansión urbana y agrícola y la degradación de los ecosistemas .....	3
1.1.2    Corpus teórico: El estudio de la complejidad .....	3
1.1.3    El Caso de estudio: La Región Metropolitana de Santiago .....	6
1.2    Objetivos .....	7
1.2.1    Objetivo General.....	7
1.2.2    Objetivos Específicos: .....	7
1.3    Hipótesis de trabajo .....	7
<b>Capítulo 2: Marco Teórico</b> .....	<b>9</b>
2.1    Introducción .....	9
2.2    El estudio de la complejidad .....	9
2.3    Sistemas complejos.....	10
2.4    Ciclos adaptativos como ciclos de vida de un sistema.....	14
2.5    Las panarquías como cadenas jerárquicas de ciclos adaptativos .....	18
2.6    Sistemas socioecológicos como objeto de estudio .....	21
2.7    Resiliencia espacial en los sistemas socioecológicos .....	22
2.8    El espacio geográfico y el territorio como un sistema socioecológico .....	25
2.9    Procesos espaciales en los paisajes socioecológicos.....	29
2.10    La importancia de la escala en la gestión de los paisajes socioecológicos .....	33
<b>Capítulo 3: Características del área de estudio</b> .....	<b>36</b>
3.1    Sistema antrópico: .....	36
3.2    Sistema Natural .....	47

<b>Capítulo 4: Marco metodológico.....</b>	<b>50</b>
4.1 Carácter del estudio.....	50
4.2 Selección de área de estudio.....	50
4.3 Selección del periodo de estudio .....	51
4.4 Métodos y Materiales.....	54
4.4.1 Corrección radiométrica (píxeles perdidos).....	54
4.4.2 Corrección atmosférica.....	55
4.4.3 Corrección topográfica.....	58
4.4.4 Cálculo del Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI):.....	59
4.4.5 Construcción “mapa de perturbaciones” .....	59
4.4.6 Cuantificación de las perturbaciones multi-escalares.....	60
4.4.7 Clasificación e ilustración de patrones de perturbación según escala y uso de suelo .....	63
<b>Capítulo 5: Resultados .....</b>	<b>67</b>
5.1 Patrones de perturbación multiescalar a nivel de región .....	67
5.2 Patrones de perturbación multiescalar a nivel de Provincia .....	73
5.3 Comparación intra e inter-escalar de los puntos de convergencia (CP) de los paisajes socioecológicos de la Región Metropolitana de Santiago y sus Provincias.....	88
<b>Capítulo 6: Discusión .....</b>	<b>90</b>
6.1 Sobre los perfiles de perturbación .....	90
6.2 Sobre los roles fuente-sumidero .....	92
6.3 Sobre las incongruencias.....	92
6.4 Sobre la resiliencia espacial .....	93
6.5 Comparando la Región Metropolitana de Santiago con Apulia, Italia .....	96
<b>Capítulo 7: Conclusiones.....</b>	<b>99</b>
7.1 Resumen de la investigación .....	99
7.2 Conclusiones de los resultados en general.....	99
7.3 Conclusiones del método.....	101
7.4 Aportes teóricos y prácticos, e implicancias para la geografía .....	102
<b>Capítulo 8: Bibliografía.....</b>	<b>103</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>110</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.4.1 Una representación bidimensional (conectividad y potencial) de un ciclo adaptativo y sus cuatro fases ( $r$ , $K$ , $\Omega$ , $\alpha$ ) y el flujo de eventos entre ellos.....	16
Figura 2.4.2 El ciclo adaptativo al añadir la resiliencia a la Figura 2.4.1 .....	17
Figura 2.5.1 Representación de una panarquía .....	19
Figura 2.5.2 Conexiones y dinámicas panárquicas .....	20
Figura 3.1.1 Usos de suelo en la Región Metropolitana de Santiago para el año 2003.Fuente: Elaboración propia en base a GORE RMS (2003) .....	40
Figura 3.1.2 Usos de suelo en la Provincia de Chacabuco. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003. ....	41
Figura 3.1.3 Usos de suelo en la Provincia de Cordillera. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003. ....	42
Figura 3.1.4 Usos de suelo en la Provincia de Maipo. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003. ....	43
Figura 3.1.5 Usos de suelo en la Provincia de Melipilla. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003. ....	44
Figura 3.1.6 Usos de suelo en la Provincia de Santiago. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003. ....	45
Figura 3.1.7 Usos de suelo en la Provincia de Talagante. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003. ....	46
Figura 4.4.1 Pasos a seguir en la presente memoria de título.....	55
Figura 4.4.2 Imágenes satelitales utilizadas. De izquierda a derecha: año 1997, row 83, 84 y año 2004, row 83 y 84. Bandas 4, 3, 2. Ningún método de estiramiento aplicado. .	55
Figura 4.4.3 Ejemplo del modelo de fragmentación de bosques de Riitters et al. (2000) .	61
Figura 4.4.4 Ejemplo de composición y configuración y su representación gráfica en una ventana fija. ....	61
Figura 5.1.1 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004. ....	68
Figura 5.1.2 Distribución de los usos de suelo estudiados en la Región Metropolitana de Santiago para el año 2003.....	69
Figura 5.1.3 Trayectorias de la composición de la perturbación según tamaño de la ventana en la Región Metropolitana de Santiago.....	69

Figura 5.1.4 Trayectorias de la configuración de la perturbación según tamaño de la ventana en la Región Metropolitana de Santiago.....	70
Figura 5.1.5 Patrones de perturbación multiescalar, según uso/cobertura de suelo en la Región Metropolitana de Santiago.....	71
Figura 5.1.6 Crecimiento promedio de la configuración multi-escalar ( $\Delta P_{dd} km^{-1}$ ) según tamaño de la ventana y uso/cobertura de suelo, para la Región Metropolitana de Santiago. ....	73
Figura 5.2.1 Porcentaje de distribución de los usos de suelo para las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago en el año 2003.....	74
Figura 5.2.2 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.....	75
Figura 5.2.3 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Cordillera, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.....	76
Figura 5.2.4 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Maipo, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.....	77
Figura 5.2.5 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Melipilla, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.....	78
Figura 5.2.6 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Santiago, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.....	79
Figura 5.2.7 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Talagante, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.....	80
Figura 5.2.8 Trayectorias de la composición de la perturbación según tamaño de la ventana en las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago. ....	82
Figura 5.2.9 Trayectorias de la configuración de la perturbación según tamaño de la ventana en las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago. ....	84
Figura 5.2.10 Patrones de perturbación multiescalar, según uso/cobertura de suelo en las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago.....	86
Figura 6.4.1 Correlación entre altitud (msnm) y composición y pendiente y composición de las perturbaciones. ....	94
Figura 6.4.2 Distribución de las perturbaciones según altitud (msnm) en la Región Metropolitana de Santiago.....	95
Figura 6.5.1 Patrones de perturbación multiescalar, según uso/cobertura de suelo en la Región de Apulia, Italia.....	97



Figura 6.5.2 Patrones de perturbación multiescalar, según uso/cobertura de suelo en las Provincias de la Región de Apulia, Italia. ....	98
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## Índice de Cuadros

Cuadro 2.9.1 Servicios ecosistémicos asociados al uso/cobertura de suelo, clasificados de acuerdo al Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), y sus ESPs directos e intermedios. ....	31
Cuadro 3.1.1 Distribución del crecimiento de la superficie del Gran Santiago según usos de suelo. Periodo 1990-2000. ....	37
Cuadro 3.1.2 Variación de superficie de usos de suelos (en hectáreas) agrícolas a nivel regional entre los años 1997 y 2004. Región Metropolitana de Santiago. ....	38
Cuadro 3.1.3 Tipos de cultivo según su ciclo vital. ....	38
Cuadro 3.2.1 Bioclimas, Ombrotipos y Termotipos de la Región Metropolitana de Santiago. ....	47
Cuadro 3.2.2 Superficie total, remanente y protegida de los pisos de vegetación con presencia en la Región Metropolitana de Santiago. ....	49
Cuadro 4.3.1 Promedio anual de precipitaciones para los años para elegir periodo de estudio. ....	52
Cuadro 4.3.2 Valores del Índice Oceánico del Niño (ONI) para el periodo 1992-2012. ....	53
Cuadro 4.4.1 Imágenes satelitales utilizadas en la presente memoria de título. ....	54
Cuadro 4.4.2 Ángulos de azimuth y elevación de las imágenes utilizadas. ....	59
Cuadro 4.4.3 Conversión de clases de la carta de uso de suelo de la Región Metropolitana de Santiago para el año 2003, escala de 1:100.000. ....	63
Cuadro 5.1.1 Crecimiento promedio de la configuración multi-escalar ( $\Delta P_{dd} km^{-1}$ ) según tamaño de la ventana y uso/cobertura de suelo, para la Región Metropolitana de Santiago. ....	72
Cuadro 5.2.1 Diferencias entre máximo y mínimo para Pd y Pdd en la Región Metropolitana de Santiago y sus Provincias. ....	85
Cuadro 5.3.1 Valores de CP para los SELs en Provincias en la panarquía de la Región Metropolitana de Santiago, sus razones de probabilidad (RP) y sus logaritmos (Log RP) respecto al nivel regional. ....	89

Cuadro 6.1.1 Variación de superficie de cultivos anuales (en hectáreas) nivel regional entre los años 1997 y 2004. Región Metropolitana de Santiago. ....	90
Cuadro 6.1.2 Variación de superficie de cultivos permanentes (en hectáreas) nivel regional entre los años 1997 y 2004. Región Metropolitana de Santiago. ....	91
Cuadro 6.5.1 Valores de CP para los SELs en Provincias en la panarquía de la Región de Apulia, Italia, sus razones de probabilidad (RP) y sus logaritmos (Log RP) respecto al nivel regional. ....	97

## **Índice de Ecuaciones**

Ecuación 4.1 .....	56
Ecuación 4.2 .....	57
Ecuación 4.3 .....	57
Ecuación 4.4 .....	57
Ecuación 4.5 .....	57
Ecuación 4.6 .....	59
Ecuación 4.7 .....	65
Ecuación 4.8 .....	66

## Glosario

*Ciclo adaptativo*: Constituye un modelo general de cambio sistémico el cual propone que las dinámicas internas de algunos sistemas se mueven en cuatro fases: crecimiento/explotación (fase  $r$ ), conservación (fase  $k$ ), liberación (fase  $\Omega$ ) y reorganización (fase  $\alpha$ ).

*CP*: Acrónimo para *Convergence Point*. Representa el valor de  $Pd$  y  $Pdd$  para una ventana ideal de igual tamaño que la unidad geográfica de un paisaje socioecológico dado.

*ESP*: Acrónimo para *Ecosystem Service Provider*. Constituyen las unidades funcionales de los servicios ecosistémicos. Ya sea desde un hábitat, una cadena trófica, una cobertura de suelo, etc.

*Incongruencia*: Escenario en el que las instituciones antrópicas no se alinean coherentemente con las escalas en que los procesos biogeofísicos de los recursos toman lugar, ya sea en el tiempo y el espacio, resultando en detrimento de los sistemas socioecológicos.

*Mismatch*: Ver incongruencia.

*Panarquía*: Representación de una jerarquía multi-escalar de ciclos adaptativos integrados en términos de escalas temporales y espaciales.

*Pd*: Composición de la perturbación. Hace referencia a la proporción de píxeles perturbados en una ventana de un tamaño determinado, donde los valores varían de 0 a 1. Siendo 0 ausencia de perturbaciones y 1 perturbación total del paisaje.

*Pd1*: Tipo de comportamiento de los perfiles de perturbación en los que la composición de la perturbación tiende a decrecer a medida que se aumenta la escala.

*Pd2*: Tipo de comportamiento de los perfiles de perturbación en los que la composición de la perturbación tiende a aumentar a medida que se aumenta la escala.

*Pdd*: Configuración de la perturbación. Hace referencia a la aglomeración de píxeles perturbados en una ventana de un tamaño determinado, donde los valores varían de 0 a 1. Siendo 0 ausencia de aglomeración y 1 aglomeración total de las perturbaciones.

*Pdd1*: Comportamiento de la configuración de la perturbación en el cual, la trayectoria de la ésta posee una forma cóncava.

*Pdd2*: Comportamiento de la configuración de la perturbación en el cual, la trayectoria de la ésta posee una forma convexa.

*Pdd3*: Comportamiento de la configuración de la perturbación en el cual, la trayectoria de la ésta posee una forma convexa a pequeñas escalas, que luego se transforma a una forma cóncava, describiendo una "S" muy suavizada.

*Perturbación*: Constituye un evento relativamente discreto tanto en el tiempo como el espacio que, a través de cambios en la cobertura vegetal, cataliza cambios en los ciclos adaptativos de los sistemas ecológicos, sociales o socioecológicos expresados en coberturas y usos de suelo. Pueden comprender a agentes tales como el fuego,

pesticidas, herbicidas, pestes, enfermedades, especies invasivas, así como dispersión urbana, entre otros.

*Resiliencia espacial:* La forma en que la variación espacial en variables claves, tanto dentro como fuera del sistema de interés, influencia (y es influenciado por) la resiliencia del sistema a través de múltiples escalas temporales y espaciales.

*Resiliencia:* La capacidad de un sistema para mantener su identidad, o funcionalidad, después de una perturbación, puede ser vista como lo opuesto a la vulnerabilidad del sistema.

*SEL:* Paisaje Socioecológico, o *Socioecological Landscape* por sus siglas en inglés. Constituye una entidad socioecológica compuesta por variaciones sociales, bióticas y abióticas, y las interacciones entre ellas, todas definidas cohesivamente en el espacio y el tiempo.

*SES:* Sistema Socioecológico, o *Socioecological System* por sus siglas en inglés. Es un sistema complejo y adaptativo, que se encuentra conformado por sistemas sociales y ecológicos en constante interacción entre sus componentes y en interacción con su entorno a través de relaciones con otros sistemas socioecológicos de escalas menores, iguales o mayores, capaces de auto-organizarse en función de los cambios internos y externos, y con una clara capacidad evolutiva en función de estas auto-organizaciones.

*Sistemas complejos y adaptativos:* Los sistemas complejos se diferencian de otros sistemas tradicionales por su comportamiento. Son adaptativos cuando son capaces de responder a su ambiente a través de la auto-organización, aprendizaje y razonamiento. Están jerárquicamente estructurados en el sentido de que están organizados en escalas espaciales y temporales de diferente extensión e influyen y son influidas directa e indirectamente por las escalas adyacentes

## Introducción

La pérdida de la biodiversidad es una de las amenazas más grandes para el ser humano y su futuro. En este sentido, el desarrollo sustentable parece ser la respuesta para enfrentar este desafío, pero alcanzarlo siempre ha sido una problemática, pues es muy elusivo. Y, como es bien sabido, la realidad es compleja y dinámica, llena de interrelaciones e interacciones entre todos los elementos que la componen. Para abordar esta problemática, desde la física, la ciencia de la computación y las matemáticas, surge la ciencia de la complejidad, la cual reconoce que no es posible comprender un sistema por sus partes individuales en cada nivel, puesto que éstas se encuentran en constante interrelación e interdependencia. Este campo se ha ido desarrollando en las últimas dos décadas, y diversas disciplinas como la ecología, la sociología y la economía han empezado a mostrar interés en esta, y a aplicarla a sus diversos ámbitos de estudio, fortaleciendo el trabajo interdisciplinario.

Por ello, y considerando el entendimiento integrador del geógrafo respecto al territorio y el espacio geográfico, el autor de la presente memoria de título consideró interesante explorar las potencialidades que este nuevo campo interdisciplinario tiene para ofrecer a la geografía.

En esta memoria de título se estudian los patrones de perturbación, entendiéndolos como cambios discretos en el tiempo y el espacio que, por medio de cambios en la cobertura vegetal, cambiaron las dinámicas de un ecosistema, un asentamiento, una plantación forestal, o un cultivo, en la Región Metropolitana de Santiago entre los años 1997 y 2004.

Esta investigación está dividida en 8 capítulos. En el primer capítulo se plantea más detalladamente el por qué, y la importancia que tiene esta investigación, y se plantean los objetivos y las hipótesis a explorar.

En el segundo capítulo, se aborda la teoría que hay detrás del estudio de la complejidad, abarcando desde el por qué es importante abrazar la complejidad, los principios básicos de los sistemas complejos, los ciclos adaptativos, las panarquías, y los sistemas socioecológicos, hasta cómo estos se manifiestan en el espacio geográfico, y qué procesos espaciales son de importancia para esta investigación.

El tercer capítulo aborda las características de la Región Metropolitana de Santiago en el periodo de estudio, y se encuentra dividido entre una caracterización antrópica y otra natural. En la primera, se abordan las condiciones de los sistemas urbanos, agrícolas y silvícolas de la Región entre el periodo de estudio, mientras que en la segunda se abordan las condiciones climáticas y ecosistémicas de ésta.

El marco metodológico es abordado por el cuarto capítulo, en el cual se describen y justifican los procedimientos técnicos y metodológicos que se utilizaron para obtener y calibrar el periodo de estudio, las imágenes satelitales utilizadas, así como la operacionalización del marco teórico de una manera que permitió analizar los patrones de perturbación según coberturas de suelo a múltiples escalas.

En el quinto capítulo se exponen los resultados obtenidos a través de las metodologías descritas en el capítulo cuatro, y donde es posible observar la distribución espacial de la perturbación, los perfiles de perturbación multi-escalar, y el rol que cada Provincia juega en la perturbación regional.

El sexto capítulo aborda los resultados y los analiza desde los conceptos y teorías expuestos en el marco teórico. Desde cómo los patrones de perturbación influyen en la panarquía de la Región, qué factores podrían influir en su distribución, y cómo ésta influye finalmente en la resiliencia espacial de los ecosistemas de la Región. También se analizaron qué coberturas de suelo presentan discordancias escalares y se hipotetizó sobre qué consecuencias podrían tener de no ser abordadas por la planificación y la gestión. Para finalizar el capítulo, se compararon los resultados obtenidos con el trabajo de Zaccarelli, et al. (2008), donde se utilizó la misma metodología para analizar los patrones de perturbación en la Región italiana de Apulia, y sus Provincias.

El séptimo capítulo expone las conclusiones que se pueden obtener a partir de los resultados y discusiones, y otorga una pequeña reflexión en cuanto al potencial que este corpus teórico tiene para nutrir y fortalecer la geografía. También se analizan las particularidades y potencialidades que el método tiene para ofrecer, así como otros usos en los cuales éste podría llegar a ser útil.

## **Capítulo 1: Presentación del problema de estudio**

### **1.1 Introducción y planteamiento del problema**

#### **1.1.1 La expansión urbana y agrícola y la degradación de los ecosistemas**

Desde el advenimiento de la civilización, el ser humano ha sido uno de los agentes de modificación del paisaje más influyentes en la historia de la tierra. A través del cambio en los patrones de uso y cobertura de suelo, éste ha sido capaz de transformar, permanentemente, paisajes en escalas de tiempo ínfimas en comparación a las necesarias para su formación. Esto representa una de las influencias más importantes que tienen los humanos en los sistemas naturales, y en la subsecuente fragmentación y pérdida de hábitats, los cuales representan las mayores amenazas a la biodiversidad (Alcamo & Bennet, 2003).

En las últimas décadas, la humanidad ha sido testigo de cómo las tasas de modificación del paisaje y de pérdida de biodiversidad han alcanzado una intensidad y extensión sin precedentes que parecen ser irreversibles. Tanto la intensificación de la agricultura (Tilman et al., 2006) como la expansión urbana (Ifatimehin & Ufuah, 2006; McKinney, 2002; 2008; Pauchard, et al., 2006) han sido identificados como los mayores propulsores de este cambio (Ecological Society of America, consulta online, 2013). Por una parte, la intensificación de los usos de suelo ha perturbado servicios ecosistémicos tales como el control de plagas y la polinización de cultivos, y por otra, los fertilizantes han reducido la calidad del agua, reducido la biodiversidad de la vegetación, y han aumentado la ocurrencia de enfermedades en las plantas (Petrosillo et al., 2010).

Considerando que la intensificación de la agricultura y la transformación de suelos representan una de las mayores amenazas a los ecosistemas de la tierra (Kremen, 2005), es posible afirmar también que no sólo afectan a la biodiversidad directamente, pero también a la productividad, diversidad y estabilidad de nuestros sistemas de producción de alimentos, al afectar servicios ecosistémicos tales como la polinización de cultivos (Petrosillo et al., 2010).

La mayoría de los servicios ecosistémicos pueden ser ampliamente clasificados según su escala de operación: local, regional, global, o escalas múltiples; y diferentes proveedores de los mismos ecosistemas pueden actuar a través de varias escalas espaciales y temporales (Petrosillo et al., 2010). Éstos, a su vez, pueden ser caracterizados por componentes tales como poblaciones, especies, grupos funcionales, cadenas tróficas, tipos de hábitat o mosaicos de hábitats, y usos de suelo que los producen colectivamente; es decir constituyen proveedores de servicios ecosistémicos (ESPs por sus siglas en inglés), los cuales son de gran relevancia para la humanidad (Zacarelli, et al., 2008).

#### **1.1.2 Corpus teórico: El estudio de la complejidad**

Ya que el ser humano constituye el principal agente de cambio en los paisajes, algunos autores recomiendan estudiar las dinámicas del territorio en el contexto de los sistemas

complejos adaptativos socioeconómicos y ecológicos (Berkes & Folke, 1998; Cumming, 2011), integrando fenómenos y dinámicas a través de múltiples escalas de tiempo, espacio y complejidad organizacional (Zacarelli, et al., 2008). Entonces, para entender las dinámicas de los ESPs en el espacio geográfico, entendiéndolo como un sistema complejo, implica que un sistema social abierto intercambia recursos e información con otros sistemas sociales y con su entorno físico-natural; creando continuamente nuevas estructuras y nuevos ordenes (Ramalingam et al., 2008). Consecuentemente, el análisis del comportamiento de un sistema complejo debería resaltar las interrelaciones de sus partes constituyentes, más que el comportamiento individual de estas.

Bajo esta perspectiva, los objetos de estudio más apropiados para el entendimiento de la gestión y manejo de los ESPs en el espacio geográfico son los sistemas socioecológicos (SES, por sus siglas en inglés) (Berkes & Folke, 1998). Los SES se manifiestan en el espacio geográfico como Paisajes Socioecológicos (SELS por sus siglas en inglés), los cuales pueden ser concebidos como SESs moldeados por los subsistemas social y ecológico en constante interacción (Zacarelli, et al., 2008). La supervivencia del primero depende de sus interrelaciones con el último. Los patrones de asentamiento y explotación reflejan la acción humana sobre los recursos naturales y el medio ambiente que, entre múltiples circunstancias, condicionan las estrategias de producción y vivienda de la población (Ambrosio-Albalá & Bastiaensen, 2010).

Al tratarse de sistemas complejos, los SELs están permanente afectados por perturbaciones provenientes desde diferentes escalas dentro de una panarquía. Las panarquías son la representación jerárquica de un conjunto enlazado de ciclos adaptativos (formas de evolución de un sistema complejo). En una panarquía, cuando se habla de “jerarquía”, se refiere a un conjunto de ciclos semiautónomos que son mutuamente influyentes y comparten atributos espaciales. Estos ciclos están localizados en diferentes niveles y evolucionan a diferentes velocidades (Holling & Gunderson, 2001).

Dentro de una panarquía cada nivel tiene un sentido, no sólo por sí mismo, si no por su relación con otros niveles; que dependiendo del tipo de relación pueden desencadenar “revoluciones” (cambios en la dinámica de los sistemas) desde los niveles más bajos, o “recuerdos” (las influencias y conocimientos previos que quedan institucionalizados) desde los niveles más altos, lo que en conjunto otorga a las panarquías un carácter multiescalar importante a considerar. (Gunderson & Holling, 2002; Ambrosio-Albalá & Bastiaensen, 2010).

Toda área y elemento que abarca la panarquía está caracterizada por la composición espacial (qué es lo que hay, y cuanto hay en el espacio geográfico) y la configuración espacial (cómo está distribuido en el espacio geográfico). Cualquier elemento del paisaje socioecológico que presente grandes variabilidades en sus dinámicas de cobertura de suelo (perturbación), contribuye a la proporción total de perturbación en la región a través de su composición y configuración espacial. Estos elementos representan unidades funcionales para evaluar las contribuciones de los ESPs a diferentes escalas de operación del servicio (Petrossillo et al., 2010). En este sentido, las perturbaciones a diferentes escalas en una panarquía de SELs impactan en los elementos que la constituyen,



modificando sus interacciones y provocando que el sistema evolucione a través de diferentes estados de estabilidad. A medida que sube la escala, la complejidad de las heterogeneidades del espacio geográfico aumenta, pero pueden ser un modo muy útil para evaluar los ESPs (Petrosillo et al., 2010).

La configuración espacial en los usos de suelo en el espacio geográfico producto de la apropiación humana puede tener una variedad de efectos ecológicos a gran escala (como por ejemplo, alteración del transporte de nutrientes, o favoreciendo especies invasivas) que perjudicarían la provisión de servicios ecológicos (Petrosillo et al., 2010). Qué efectos tendrá la acción antrópica en dicha provisión dependerá de escalas espaciales que abarcan más allá de un solo uso de suelo.

En este contexto complejo y siempre-cambiante, el subsistema humano cumple un rol crítico dentro de un SEL. Los humanos son capaces de confrontar las reglas y leyes que afectan su comportamiento, e incluso cambiarlas (Stacey, 1996; citada en Ambrosio-Albalá & Bastiaensen, 2010). Por ende, donde quiera que haya un subsistema humano presente, las perturbaciones pueden ser contrarrestadas, o agravadas mediante acciones deliberadas.

Dado que los ESPs son también influenciados por los criterios de toma de decisiones que tiene la enorme diversidad de agentes antrópicos en los SELs, la intervención humana juega un rol crucial en la estabilidad de los ESPs. Estos agentes, y sus criterios de decisión, al ser también parte de una panarquía, poseen escalas en las cuales se desarrolla la intervención espacial. De estas intervenciones pueden surgir incongruencias espaciales.

Las incongruencias se producen cuando uno de los procesos sociales, políticos y económicos inherentes a la tenencia del suelo, los cuales constituyen la jerarquía de instituciones político-sociales que manejan la propiedad, uso, y gestión de los recursos del suelo, no se alinea correctamente con las escalas de los sistemas naturales, llevando a la pérdida de componentes claves y consecuente degradación de los ESPs (Petrosillo, et al., 2010).

Ya que las perturbaciones se producen a múltiples escalas, la efectividad de los ESPs asociados a elementos del espacio tales como el uso y cobertura del suelo, podrían ser diferencialmente afectados por perturbaciones en un mismo lugar (Petrosillo et al., 2010). Por lo tanto, y de acuerdo a Zaccarelli, et al. (2008), una forma potencialmente útil para observar estas diferencias es a través de cómo las perturbaciones se comportan en el espacio, a múltiples escalas.

Es por ello que la presente investigación constituye un estudio exploratorio y analítico en el corpus teórico de la complejidad, tomando como ejemplo y base el trabajo de Zaccarelli, et al. (2008) y Petrosillo, et al. (2010) en la región de Apulia, Italia, quienes analizaron los patrones multiescalares de perturbación a partir de 10 escalas, y para cuatro coberturas de suelo; y que encontraron patrones indicativos de incongruencias escalares entre las coberturas. El valor teórico de la presente memoria de título recae en

la aplicación de algunos de los conceptos y teorías asociados al corpus teórico de la complejidad, algunos de los conceptos y teorías geográficas, así como también relacionadas a la ecología del paisaje. Entre dichos conceptos y teorías se encuentra el estudio de las dinámicas de fuente-sumidero, y el estudio de cambio de usos y coberturas de suelo.

### **1.1.3 El Caso de estudio: La Región Metropolitana de Santiago**

Para realizar el fin científico de esta investigación, es decir, aplicar los aportes del corpus teórico de la complejidad en el contexto de la relación existente entre los proveedores de servicios ecosistémicos con los cambios de uso y cobertura de suelos, se toma como caso de estudio a la panarquía de la Región Metropolitana de Santiago abarcando dos niveles jerárquicos: Región y Provincia, entre los años 1997 y 2004.

La Región Metropolitana de Santiago (RMS) se caracteriza por su enorme dinamismo. Por sí sola constituye el 47% del PIB nacional, y es el hogar del 43% la población del país, lo que denota la exagerada centralización existente (GORE RMS, 2009). Estos son los resultados del proceso de neoliberalización de la economía que tuvo lugar en la década de los 70's y que culminó en *“una etapa de sostenido crecimiento económico, reindustrialización y terciarización del aparato productivo”* que *“impulsó a una intensificación de la suburbanización tanto de las actividades productivas como de la población”*, lo que ha dado como resultado a *“la emergencia de una ciudad de cobertura regional, suburbanizada y policéntrica, de límites imprecisos, configurada como archipiélago, cuya dinámica expansiva ha ido incorporando a diversos centros urbanos aledaños y áreas rurales, que han pasado a formar parte de un extenso periurbano”* (De Mattos, 1999).

Estas dinámicas y procesos toman lugar en una región caracterizada por sus suelos de excelente aptitud agrícola, particularmente los de Clase I-III para capacidades de uso de suelo, muy escasos en Chile, pues constituyen un 1,4% del total de suelos del país, y la mayoría están localizados en la Región Metropolitana de Santiago (SINIA, consulta online, 2013). Ahora, si bien la agricultura intensiva no es algo mayoritario en la Región Metropolitana, las políticas nacionales, como “Chile potencia agroalimentaria”, aumentarían la presión ejercida por esta práctica a los sistemas ecológicos de la Región.

Por otra parte, para el año 2002, se cuenta con la existencia de 820.515 ha de bosques naturales y montes, es decir, 53,3% de la región (GORE RMS, 2009); así como la presencia de 5 formaciones vegetacionales, y 8 pisos vegetacionales (Luebert & Pliscoff, 2006), lo que de por sí indica una fuerte presencia de ESPs en la región.

Considerando que hasta la fecha existe poca, o nula, información cuantitativa respecto a los ESPs asociados a las distintas coberturas de suelo en la Región Metropolitana de Santiago, se hace necesario adoptar un enfoque en el cual se aplique un “coarse filter”, o filtro grueso (Noss, 1987, citado en Zacarelli, et al., 2008), que consistiría en asumir razonablemente que los ESPs se localizarían principalmente en áreas naturales, cultivos permanentes (Petrosillo, et al., 2010), y la silvicultura.

En este sentido, se hace necesario identificar, caracterizar y entender cómo las perturbaciones provocadas por y en los usos y coberturas de suelo de los paisajes socioecológicos de la Región Metropolitana de Santiago se comportan en múltiple escalas, y cómo estas interacciones podrían influir en la resiliencia y/o vulnerabilidad de los ESPs. Así, y resumiendo, la Región Metropolitana de Santiago constituye un caso de estudio interesante en función de dos aspectos principales para la geografía y el estudio de sistemas sociocológicos: Primero, presenta un sistema antrópico bien desarrollado y con una influencia muy importante sobre otros sistemas, tanto nivel local, regional y nacional. Y segundo, sus sistemas naturales presentan una rica biodiversidad y constituyen un factor clave en la mitigación de las externalidades negativas de las acciones del sistema antrópico.

De este modo, y partir de esta contextualización, surgen las siguientes preguntas de investigación que desembocan en los objetivos de la presente memoria: ¿Cómo se comportan los patrones de perturbación de origen antrópico a múltiples escalas en distintos usos de suelos en una panarquía con tal dinamismo económico como lo es la Región Metropolitana de Santiago?, ¿Entre qué usos de suelo existen incongruencias multi-escalares? y ¿Cuáles son las Provincias que más aportan a la perturbación regional?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Analizar los efectos de la perturbación antrópica relacionados a las dinámicas multiescalares de uso y cobertura de suelo en los paisajes socioecológicos comprendidos en dos niveles jerárquicos de la Región Metropolitana de Santiago: Región, y Provincia, para los años 1997 y 2004.

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

- Analizar los patrones de perturbación multi-escalar, según uso y cobertura de suelo, para dos niveles jerárquicos de la Región Metropolitana de Santiago: Región, y Provincia, entre los años 1997 y 2004.
- Identificar las incongruencias escalares entre los distintos usos de suelo de la Región Metropolitana de Santiago: Región, Provincia, entre los años 1997 y 2004 según uso y cobertura de suelo.
- Identificar y analizar las Provincias que más aportan a la perturbación de la Región Metropolitana de Santiago, entre los años 1997 y 2004.

## **1.3 Hipótesis de trabajo**

Para esta investigación se plantearon las siguientes hipótesis, cada una asociada a un objetivo específico: La principal fuente de perturbaciones vendría dada por la agricultura de cultivos anuales, dada la transformación cíclica de estos sistemas, que se mueven a

ritmos mayores que el resto de los paisajes socioecológicos, y por las superficies artificiales, llevadas a través de la urbanización, principalmente. Los cultivos permanentes y la silvicultura, por otra parte, deberían comportarse como sumideros, dada la relativa estabilidad de éstos. Finalmente, las áreas naturales debiesen comportarse como sumideros, pues deberían presentar muy pocas perturbaciones, y muy aisladas debido a la poca accesibilidad de éstas producto de la topografía de la región.

En lo que respecta al tema de las escalas, es posible hipotetizar que, dado el carácter extensivo de ciertos usos de suelo, las incongruencias más comunes se darían entre las superficies artificiales, los cultivos anuales y las áreas naturales.

Finalmente, una tercera hipótesis consiste en que la Provincia de Santiago, dado el dinamismo económico que posee, y su potencialidad transformadora del espacio, debería comportarse como una fuente de perturbaciones a nivel regional. Al mismo tiempo, y a partir de la hipótesis anterior, Maipo y Talagante, las dos Provincias con el mayor porcentaje de superficies agrícolas (cultivos anuales y permanentes), debiesen también comportarse como una fuente, en el sentido de que éstas exportarían las transformaciones agrícolas hacia las áreas naturales.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1 Introducción

El presente marco teórico tiene por objetivo hacer un recorrido a través de los diversos aportes que el enfoque socioecológico puede otorgar a la geografía. Para ello, se inicia con una breve introducción al estudio de la complejidad, en la cual se da a conocer el trasfondo que subyace al enfoque socioecológico. Luego se realiza un recorrido de las bases de la teoría de los sistemas complejos y a la terminología asociada a dicha teoría. El siguiente tema aborda la heurística de los ciclos adaptativos y de las panarquías, desarrolladas y propuestas por L. Gunderson y C. S. Holling y que constituyen un gran aporte al enfoque socioecológico. Después se desarrollan los diferentes conceptos asociados a los sistemas socioecológicos, y como estos constituyen sistemas complejos adaptativos con gran variedad de atributos propios de los sistemas complejos. Posteriormente, se da una discusión fuertemente influida por G. S. Cumming sobre el espacio geográfico, y su concepción como un sistema complejo. Después de ello, se abordan conceptos y teorías propias de la ecología del paisaje que establecen y definen los elementos, procesos y dinámicas del paisaje. Luego, se aborda el problema de la escala espacial en la gestión de los paisajes socioecológicos, para finalmente concluir con la importancia de la gestión de los pasajes socioecológicos y los ESPs para el desarrollo sustentable.

### 2.2 El estudio de la complejidad

Actualmente, el ser humano posee un volumen de *“conocimientos sin precedentes sobre el mundo físico, biológico, psicológico y sociológico, cuya recolección y medición se ha basado en los métodos de verificación empírica y lógica”* (Morin, 2005; 27). Sin embargo, acorde a Morin (2005) la expansión del conocimiento ha venido asociada a una creciente desarticulación de la organización de éste. *“La sobre simplificación e hiperespecialización de la ciencia desgarró el tejido complejo de la realidad, para hacer creer que un corte arbitrario operado sobre lo real era lo real mismo”* (Morin, 2005: 30).

La complejidad de la realidad es al parecer uno de los grandes problemas que enfrenta la ciencia. Pero, ¿qué es la complejidad? La subjetividad del término ha llevado a múltiples interpretaciones. Morin (2005), define la complejidad como *“el tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones y azares que constituyen nuestro mundo fenoménico”*. Por otra parte, Roe (1998) entiende por complejidad como cualquier cosa que no entendemos, debido a que aparentemente, existe un gran número de elementos interactuando. El enfoque apropiado, acorde a Roe, sería abordar la complejidad y su resultante incertidumbre, y analizar diferentes conjuntos de interacciones, cada una de las cuales parece ser relevante desde un número de diferentes perspectivas operacionales y filosóficas fundamentales. Otro enfoque de la complejidad lo proveen Holling y Gunderson, los cuales sugieren que la complejidad de los sistemas emerge no desde una asociación aleatoria de un número mayor de factores interactuando, sino que de un número menor de procesos controladores (Holling, 2000; Holling, 2001). Si bien estos

enfoques parecen contrapuestos, la verdad es que pueden llegar a ser complementarios, como se podrá observar más adelante.

El estudio de la complejidad se materializa en el estudio de sistemas complejos. Según Cumming (2011), el trabajo que constituye la teoría moderna de sistemas complejos puede ser clasificado en al menos tres dominios:

- a) El primero, y el más antiguo, consiste en un núcleo de ideas que surgen inicialmente de la física, las ciencias computacionales y la biología. Algunos ejemplos de este dominio incluyen la teoría de la información y simulaciones de vida, entre otros.
- b) El segundo dominio incorpora muchas de las ideas del primero, pero las ha desarrollado y construido en un contexto ambiental, materializándose en el estudio de los sistemas socioecológicos (o SESs, por sus siglas en inglés). El estudio de los sistemas socioecológicos se caracteriza por utilizar conceptos muy abstractos como la resiliencia, la vulnerabilidad, la adaptabilidad y la robusticidad.
- c) El tercer dominio consiste en un conjunto de ideas y análisis que tienen relevancia para el estudio de la complejidad, pero no cuadran en un corpus estándar de conocimiento. Según Cumming (2011), estos estudios son usualmente ignorados por los investigadores en los dos dominios previos porque no parecen cuadrar con las normas disciplinarias. Se caracteriza por intentos de crear teorías unificadoras más amplias, como por ejemplo el concepto de Emergía, por H.T. Odum (1995).

Desde el punto de vista de la geografía, y de este texto, el segundo dominio resulta ser el de mayor interés. No obstante, antes de ir directamente a definir los sistemas socioecológicos y su relevancia para la geografía, es necesario definir y aclarar conceptos básicos en materia de sistemas complejos, pues constituyen los bloques elementales para entender a los sistemas socioecológicos.

### **2.3 Sistemas complejos**

Un sistema es una entidad cohesiva formada por componentes e interacciones claves; un ambiente local; y con continuidad espaciotemporal (Cumming & Collier, 2005). Estos sistemas se diferencian de otros sistemas tradicionales no por la cantidad o disposición de sus componentes, sino por su comportamiento (Cumming, 2011). Éstos son capaces de contener y/o procesar mayor información de manera más eficiente que los sistemas más simples (Simon, 1976).

La complejidad de un sistema posee dos aspectos claves: la heterogeneidad de sus componentes, o subsistemas integrantes; y la mutua interdependencia de las funciones que cumplen dichos componentes dentro del sistema (Ambrosio-Albalá, 2007). Ambrosio-Albalá (2007) señala que ello implica que al estudiar un sistema complejo, ambas características significan que el análisis de un sistema complejo no puede realizarse mediante la simple adición de estudios sectoriales sobre cada uno de sus elementos. Esta no-aditividad se justifica porque, en un sistema complejo, toda alteración de una parte del

sistema se propaga hacia el resto por medio de un conjunto de relaciones e influencias que definen la estructura del sistema (García, 1994, citado en Ambrosio-Albalá, 2007). Por ende, el carácter de “complejo” de un sistema no viene únicamente de la heterogeneidad de sus componentes, sino específicamente de las *“interrelaciones entre los componentes, cuyas funciones dentro del sistema no son independientes”* (García, 1994; 94, citado en Ambrosio-Albalá, 2007). Entonces, para el entendimiento de los sistemas complejos, es necesario comprender las conexiones entre estructura y función.

No obstante, no todos los sistemas complejos son iguales. Los sistemas complejos adaptativos se diferencian de otros sistemas complejos por su capacidad para responder a los diferentes estímulos provenientes de su ambiente a través de la auto-organización, el aprendizaje y el razonamiento (Norberg & Cumming, 2008).

Ambrosio-Albalá y Bastiaensen (2010) entregan una detallada descripción de cómo los sistemas complejos adaptativos funcionan. Los autores señalan que primero, los componentes de un sistema están mutuamente interrelacionados y sus funciones dentro del sistema se basan en las interrelaciones con otros componentes. Estas interrelaciones tienen múltiples direcciones, y las interrelaciones entre dos componentes generan influencias que podrían llegar a afectar al resto del sistema. De este modo, múltiples interrelaciones e iteraciones, o bucles, pueden ocurrir (Ambrosio-Albalá & Bastiaensen, 2010). Segundo, estas interrelaciones a su vez son no-lineales. La no-linealidad se puede entender como un comportamiento caótico o un comportamiento dinámico incierto, en el que un bucle puede cambiar el comportamiento de un componente (Fradkov et al., 1999; en Ambrosio-Albalá & Bastiaensen, 2010).

El mecanismo por el cual las interrelaciones entre los componentes del sistema generan bucles que pueden modificar el comportamiento de los componentes, o del sistema en su totalidad se denomina feedback. Los feedbacks son mecanismos de auto-organización en el que un efecto afecta su causa (Cumming, 2011). Estos pueden ser de dos tipos: los feedbacks negativos, o autoreguladores, en el que el efecto tiende a la homeostasis o equilibrio. Por ejemplo: cuando el aumento del valor del suelo de una ciudad producto de una mayor concentración de servicios de alto nivel se ve anulado por aumentos en el tiempo de transporte producto de la sobredensificación; y los feedbacks positivos, que conducen al cambio y lo aleja del equilibrio. Por ejemplo: Cuando la explotación agrícola de un territorio es influenciado por una alta demanda, lo que la lleva a sobreexplotar los suelos, que en consecuencia resulta en una progresiva erosión de los suelos, o cuando un cambio en el uso de suelo de un territorio rural atrae otros usos de suelos urbanos, y dichos usos de suelo atraen a otros más, llevando a una transformación de un territorio rural a uno urbano.

Tercero, el comportamiento del sistema depende de las condiciones previas en las que éste se encuentra (histéresis), y en consecuencia, la escala temporal adquiere relevancia importante. A esto se le conoce como “dependencia del camino”. (Ambrosio-Albalá & Bastiaensen, 2010). En otras palabras, la historia del sistema influye en el comportamiento del sistema.

Y cuarto, los autores señalan que es difícil definir los límites de un sistema, pues éstos serían sistemas abiertos, con bordes poco o no definidos, y serían estudiados desde una perspectiva aparentemente no-reduccionista. Además, señalan que dado que las interrelaciones “dentro” del sistema son no-lineales, y que las interrelaciones con componentes fuera de los límites son constantes, no es posible anticipar su futura evolución, por lo que el estudio no sería determinista (Ambrosio-Albalá & Bastiaensen, 2010).

Según estos autores, estas propiedades explicarían dos mecanismos fundamentales de los sistemas complejos: La emergencia y la auto-organización. Según los autores, las interrelaciones no-lineales generan resultados cuyas propiedades no tienen nada en común con aquellas de los elementos constituyentes tomados individualmente. En otras palabras, las propiedades emergentes surgen de una combinación entre los componentes y relaciones de un sistema. No pueden ser observadas a través del estudio de los componentes individuales (Cumming, 2011). Ejemplo de esto sería la actividad cerebral, la cual es producto de la interrelación de las neuronas y, por ende, no puede ser observada si estudiamos las neuronas individualmente. La emergencia da paso a estructuras, o patrones, que responden a la lógica interna del sistema (Haan, 2006; citado en Cumming, 2011).

La auto-organización, por otra parte, es un término que caracteriza el desarrollo de los sistemas complejos en el que múltiples resultados son posibles dependiendo de las intervenciones que se realicen en el tiempo. La diversidad y la individualidad de los componentes, las interacciones localizadas entre éstos, y un proceso autónomo que usa los resultados de estas interacciones para seleccionar un conjunto de esos componentes para la mejoría del sistema, son características de los sistemas complejos (Levin, 1999). Holland (1994) da una definición más sencilla: El proceso por el cual un sistema, o comunidad, modifica su estructura y comportamientos internos, usualmente en respuesta al crecimiento interno y/o al cambio externo.

Ambrosio-Albalá & Bastiaensen (2010) señalan además que, dado que un sistema complejo es un sistema abierto, éste está sujeto a perturbaciones recibidas por cualquier elemento, las cuales pueden causar cambios en las interrelaciones (producto de la auto-organización). Las no-linealidades y la histéresis hacen que el sistema se auto-organice de una forma diferente y produzca nuevos estados emergentes. Este comportamiento dinámico dejaría rastros de un continuum de estados de estabilidad (o atractores), los cuales son un “camino” de resultados emergentes producto de diferentes configuraciones del sistema (es decir, procesos de auto-organización). Este continuum aleja la idea de la estabilidad, de un único equilibrio a largo plazo hacia el cual el sistema tendería a “moverse”, lo que significa que el cambio y la adaptación son propiedades fundamentales de los sistemas complejos.

Para los autores, los conceptos de emergencia, auto-organización y atractores señalan que los sistemas están constantemente afectados por perturbaciones. Los impactos de estas perturbaciones en los elementos, modificarían sus interacciones y provocarían que el sistema evolucione a través de diferentes estados de estabilidad. Según las



condiciones del sistema, o la intensidad de las perturbaciones, el sistema puede moverse hacia un nuevo estado, o quedar atrapado en uno.

Para clarificar más lo que se ha expuesto, Ambrosio-Albalá (2007), propone que un sistema puede ser representado por un conjunto de variables, y que a partir de este conjunto se tiene:

- Un estado del sistema es una posible combinación de los valores de las variables que constituyen el sistema. Carpenter et al. (2001) realizan un estudio sobre un sistema lacustre. Éste representa un claro ejemplo en el cual el estado del sistema, dado por la claridad del agua del sistema lacustre, sería la combinación de la cantidad de fósforo en el sedimento y el fósforo en el agua.
- Un espacio de estados que serían todas las posibles combinaciones de valores de las variables que configuran el sistema. En el ejemplo del sistema lacustre, donde las variables son el fósforo en el sedimento y en el agua, el espacio de estado vendría dado por todas las posibles combinaciones de los valores de estas variables.
- Un atractor, o régimen, el cual sería el estado de estabilidad hacia el cual tiende a moverse el sistema. En el ejemplo del sistema lacustre, existirían dos atractores alternos en el lago: Eutrófico (agua turbia) y oligotrófico (agua clara). El estado eutrófico estaría asociado a altos niveles de fósforo en el agua y en el sedimento, mientras que el estado oligotrófico sería lo contrario. Si el sistema varía entre dos o más atractores, como es el caso del lago, se le denomina como estados alternados.
- Una cuenca de atracción, la cual sería una región en el espacio de estado en el que el sistema tiende a permanecer. Una cuenca de atracción representa todas las diferentes configuraciones de variables alrededor de un atractor. Para cualquier sistema hay más de una cuenca de atracción, y el límite entre éstas se llama umbral. Los umbrales representan el punto en el cual un sistema tiende a un nuevo atractor; en éstos, la combinación de variables bajo las cuales el sistema se encuentra, entra en un nuevo régimen. En el ejemplo del sistema lacustre, el estado oligotrófico representaría una cuenca de atracción, mientras que el estado eutrófico representaría otra. Si la cantidad de fósforo en el agua y en el sedimento en un lago oligotrófico crece lo suficiente, se podría cruzar el umbral y éste se transformaría en un lago eutrófico.
- Las diferentes cuencas de atracción en las que un sistema se puede situar y los límites que separan cada cuenca, originan lo que podría llamarse como paisajes de estabilidad.

Una de las problemáticas más recurrentes a la hora de trabajar con los sistemas complejos adaptativos es el cómo definir un sistema. Cumming y Collier (2005) abordan el problema de definir un sistema a través de la identidad de éste. Según los autores, un sistema mantiene su identidad si sus componentes y relaciones clave se mantienen continuamente en el tiempo y el espacio. A su vez, Collier y Hooker (1999) enfatizan la importancia de la cohesión en los sistemas complejos. Así, en un sistema, la cohesión se

perdería y el sistema perdería su identidad si las fuerzas que mantienen los elementos del sistema unidos (fuerzas centrífugas) fueran más débiles que las fuerzas que empujan dichos elementos lejos el uno del otro (fuerzas centrípetas). De este modo, las fuerzas centrífugas serían, por ejemplo, el encadenamiento económico, el capital social, la identidad territorial, las cadenas tróficas, etc. Y las fuerzas centrípetas serían crisis económicas, conflictos sociales, desastres naturales, etc.

Cumming (2011) señala que existen varias consideraciones importantes a la hora de definir un sistema complejo. La primera sería que la mayoría de los sistemas complejos son jerárquicos (Allen & Star, 1982; Simon, 1962 citado en Cumming, 2011). Cuando se habla de “jerarquía”, cabe señalar que no es en el sentido de una secuencia “arriba-abajo” de control autoritario. De hecho, cuando Simon (1974) describe la significancia de las jerarquías, se refiere a un conjunto de niveles semiautónomos, los cuales están formados por las interrelaciones entre un conjunto de variables que comparten velocidades similares. Cada nivel comunica información, o material al siguiente nivel superior (el cual es más grande y lento). Mientras la transferencia desde un nivel a otro se mantenga, las interacciones y variables dentro de los mismos niveles pueden ser transformadas o cambiadas, sin que el sistema entero pierda su integridad (Holling, 2001). Así, Cumming señala que la jerarquía está muy relacionada con la escala. Por ejemplo, un análisis de las interrelaciones espaciales en Chile podría tomar lugar a nivel nacional (el país entero), a nivel regional (ej.: la Región Metropolitana de Santiago), a nivel intercomunal en una metrópolis (ej.: Comunas del Gran Santiago), a nivel comunal (ej.: Comuna de Alhué, o San José de Maipo) e incluso intracomunal (ej.: Asentamientos humanos dentro de la comuna de Melipilla). Cada una de estas opciones posee una diferente escala de análisis espacial y tendrán diferencias en las tendencias que sean observadas.

Otra consideración importante que señala Cumming, y en concordancia con Ambrosio-Albalá y Bastiaensen (2010) es que los límites de un sistema son difusos y los cambios en los elementos claves del sistema pueden ser un tema de gradualidad más que de absolutos. Mientras que los extremos pueden ser fácilmente identificables, un umbral relativamente bien definido puede ser sujeto de incertidumbres significativas cuando es aplicado como un criterio de identidad. Producto de esto es necesario tomar en cuenta que la incertidumbre y la ambigüedad reflejan las realidades de trabajar con y en sistemas complejos (Cumming, 2011).

#### **2.4 Ciclos adaptativos como ciclos de vida de un sistema**

Como se mencionó en la sección de sistemas complejos, éstos pueden estar jerárquicamente estructurados. Simon (1974) señala que cada nivel de esta jerarquía cumple dos roles fundamentales. La primera es “conservar y estabilizar los niveles jerárquicos más rápidos y pequeños; mientras que la segunda es generar, probar y desarrollar innovaciones a través de experimentos que ocurren dentro de un nivel dado” (Holling, 2001). Esta última función fue abordada por un modelo heurístico elaborado por Holling, conocido como el “ciclo adaptativo” (Holling, 1986). Éste constituye un aporte importante al entendimiento de las dinámicas temporales de los sistemas complejos,

desde células, ecosistemas, economías, ciudades, sociedades, y culturas. En otras palabras, el modelo de los ciclos adaptativos constituye una especie de metáfora que permite comprender la evolución de los sistemas socioecológicos, así como de otros tipos de sistemas complejos

Para explicar esta evolución, el modelo se basa en la existencia de tres propiedades genéricas (Holling, 2001):

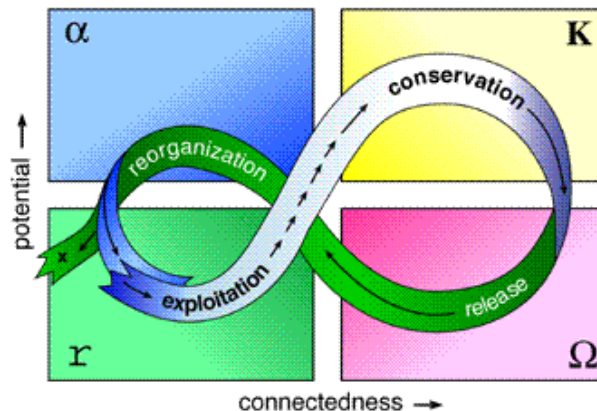
- a) Los recursos de los que un sistema dispone para cambiar, también llamado potencial. Éste determina el rango de futuras opciones disponibles.
- b) La conectividad, o controlabilidad interna de un sistema; es decir, el grado de conectividad entre las variables y procesos controladores internos. Es una medida que refleja el grado de flexibilidad o rigidez de tales controles, así como su sensibilidad a las perturbaciones. En otras palabras, significa qué tan rígido o flexible es el sistema.
- c) La resiliencia del sistema. Definida como la capacidad de un sistema para mantener su identidad, o funcionalidad, después de una perturbación (Cumming, 2011), puede ser vista como lo opuesto a la vulnerabilidad del sistema.

El ciclo adaptativo está compuesto por 4 fases, cada una en las cuales las tres propiedades mencionadas anteriormente varían. En la Figura 2.4.1 se puede observar “una representación bidimensional (conectividad y potencial) de un ciclo adaptativo y sus cuatro fases ( $r$ ,  $K$ ,  $\Omega$ ,  $\alpha$ ) y el flujo de eventos entre ellos. Las flechas cortas representan una situación que cambia lentamente, mientras que las flechas rápidas representan situaciones de cambio rápido. La figura representa los cambios en dos propiedades: en el eje Y está el potencial inherente a la acumulación de recursos (puede ser capital económico o social, biomasa, nutrientes, etc.); y en el eje X está el grado de conectividad entre las variables controladoras del sistema. La salida del ciclo a la izquierda de la figura representa la posibilidad de que el potencial se pueda perder, y donde el cambio a un sistema menos productivo y organizado es posible” (interpretación libre de Holling, 2001). Al añadir la resiliencia a la Figura 2.4.1, se obtiene la Figura 2.4.2, en la cual la resiliencia se expande y contrae a lo largo del ciclo. Se encoje a medida que el ciclo se mueve hacia la fase K y el sistema se vuelve más frágil. Y se expande a medida que el ciclo avanza por el “back loop” (la vuelta hacia atrás) y reorganiza los recursos acumulados para un nuevo ciclo (interpretación libre de Holling, 2001). Por ende, el ritmo de evolución de los ciclos adaptativos se alterna entre largos procesos de acumulación, explotación y transformación de recursos (de explotación a conservación, o de fase  $r$  a  $K$ ), y entre procesos cortos que crean oportunidades para la innovación (de liberación a reorganización, o de fase  $\Omega$  a  $\alpha$ ) (Holling, 2001).

Es posible ejemplificar el ciclo adaptativo con un ecosistema boscoso. Durante la fase  $r$  a  $K$ , la biomasa producida por el crecimiento del bosque a partir de los nutrientes disponibles se acumula, y la densidad de vegetación por unidad de espacio aumenta cada vez más, evitando que otros competidores se integren al sistema. Los nutrientes potenciales para el desarrollo de otras especies vegetales es alto, pero éste se encuentra

expropiado y controlado por una biota específica, y por los procesos ecosistémicos establecidos. A medida que el crecimiento del bosque aumenta, la conectividad del sistema se incrementa, volviéndose eventualmente “sobre conectado” y cada vez más rígido. Por otra parte, la resiliencia disminuye, volviéndose cada vez más vulnerable a las perturbaciones (Holling, 2001).

**Figura 2.4.1 Una representación bidimensional (conectividad y potencial) de un ciclo adaptativo y sus cuatro fases ( $r$ ,  $K$ ,  $\Omega$ ,  $\alpha$ ) y el flujo de eventos entre ellos.**

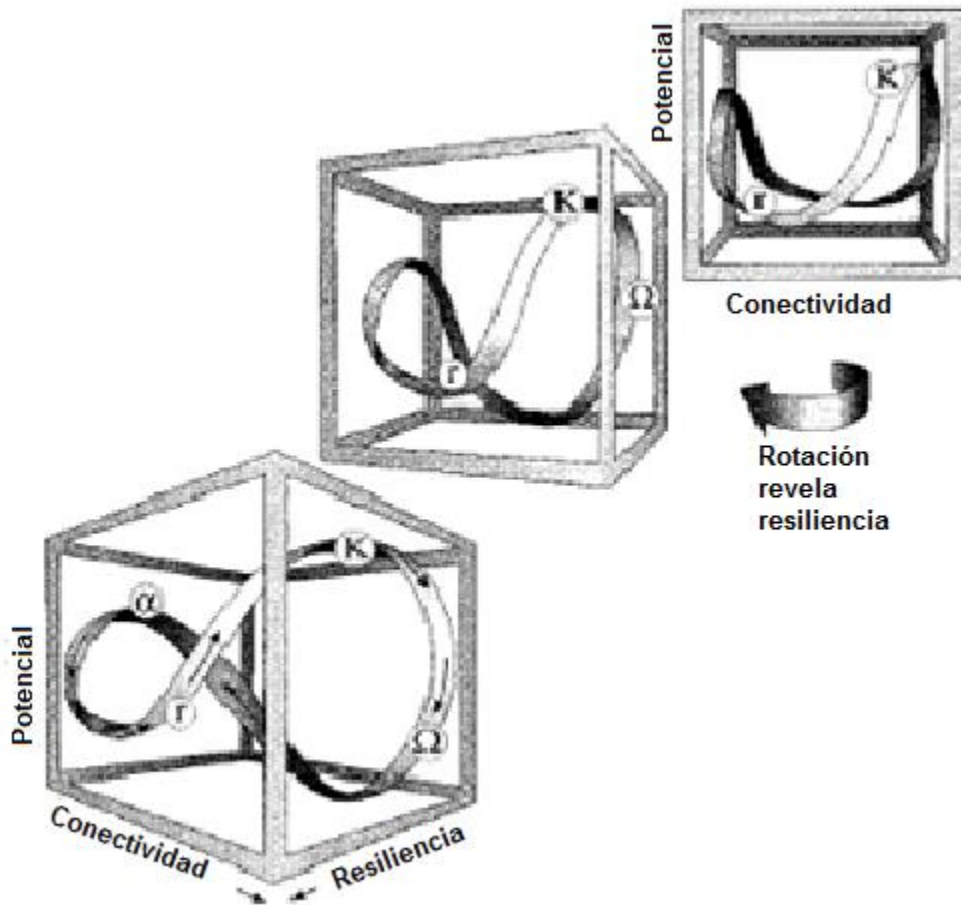


Fuente: Holling, 2001.

El paso de la fase  $K$  a  $\Omega$  es iniciado por una perturbación, como puede serlo un incendio, por ejemplo, debido a la baja resiliencia del sistema en la fase  $K$ . Ya que el sistema se encuentra fuertemente conectado (en forma de una alta densidad vegetal), el fuego se expande rápidamente y los recursos acumulados en forma de nutrientes son velozmente liberados, y la organización rígida se pierde.

En la fase  $\Omega$  a  $\alpha$  se produce una rápida re-organización en la cual surgen nuevas recombinaciones que dan paso a experimentos, los cuales resultan en innovaciones para el siguiente ciclo. Se caracteriza por la presencia de alto potencial, y baja controlabilidad. Esta fase del ciclo es inherentemente impredecible e incierta. En esta fase, las especies, el capital, las mutaciones o las innovaciones generadas anteriormente pueden reorganizarse en nuevas combinaciones. La baja conectividad permite nuevas combinaciones de las innovaciones previamente asiladas o contenidas, dando paso a la generación de nuevas oportunidades. Debido a que la resiliencia es alta, el sistema es capaz de probar estas nuevas oportunidades o combinaciones ya que el costo de fallar es bajo (es decir, no se pierde nada con intentar) y se da la condición para la experimentación creativa (Holling, 2001). En el ecosistema boscoso, al no haber competidores y estar los recursos liberados, se producen nuevos experimentos que podrían llevar a que nuevas especies que antes no podían establecerse, como gramíneas o arbustos, puedan hacerlo.

**Figura 2.4.2 El ciclo adaptativo al añadir la resiliencia a la Figura 2.4.1**



Fuente: Holling, 2001.

Finalmente, en la fase  $\alpha$  a r, las innovaciones son puestas a prueba y, aquellas que se adaptan exitosamente, dan paso a un nuevo ciclo de crecimiento y explotación hacia la fase K. En el ejemplo del ecosistema boscoso, éste es colonizado por gramíneas o arbustos que lo llevan a una nueva fase K.

Cabe señalar que no todos los sistemas se comportan de igual manera y hay casos excepcionales en los que el ciclo adaptativo no se desarrolla a cabalidad. Algunos ejemplos de estos casos lo constituyen: a) sistemas que están fuertemente influenciados por inputs externos, periódicos, incontrolables y/o impredecibles; y que tienen poca o nula regulación interna, pero alta capacidad adaptativa frente a las oportunidades. Ejemplo de esto sería un pastizal árido y sobre explotado. Estos sistemas tienden a moverse entre las fases  $\alpha$  y r; y b) sistemas con un fuerte y efectivo control de la variabilidad externa, como por ejemplo sistemas humanos con métodos de adaptación activos que estabilizan la variabilidad y explotan la oportunidad (para mayor información sobre estos ciclos adaptativos, ver Holling, 2001).

## 2.5 Las panarquías como cadenas jerárquicas de ciclos adaptativos

Una panarquía es la representación de una jerarquía multi-escalar de ciclos adaptativos integrados (Van Apeldoorn et al, 2011). En una panarquía, los ciclos adaptativos de los niveles superiores se mueven a menor velocidad que los niveles inferiores, y los niveles superiores ponen las condiciones para el desarrollo de los niveles inferiores (Holling, 2001). Así, dentro de una sociedad, el comportamiento de sus individuos estará influido por las normas de su sociedad, y ésta a su vez estará influida por las prácticas y normas de su cultura.

Cabe señalar que para que una panarquía pueda ser entendida como tal debe existir una condición a la que Holling (2001) llama como “Rule of Hand”, o regla de la mano, la cual consiste en que la complejidad mínima requerida para comprender una panarquía y sus ciclos adaptativos es de: a) tres a cinco componentes interactuantes claves; b) tres velocidades de las variables cualitativamente diferentes; c) causación no-lineal; d) vulnerabilidad y resiliencia que cambien con variables lentas; e) y que el contagio espacial y legados (bióticos o sociales) generen patrones auto-organizados a través del espacio y del tiempo.

Las panarquías se diferencian de las jerarquías tradicionales en el rol que cumple el ciclo adaptativo, y en particular la fase  $\alpha$  de éste, como promotor de la variedad y generador de nuevos experimentos en cada nivel (Holling, 2001). Los múltiples niveles que constituyen una panarquía se pueden observar en la Figura 2.5.1, donde la panarquía es representada como un conjunto arraigado multiescalar de ciclos adaptativos que indican la naturaleza dinámica de una jerarquía de sistemas (interpretación libre de Holling, 2001).

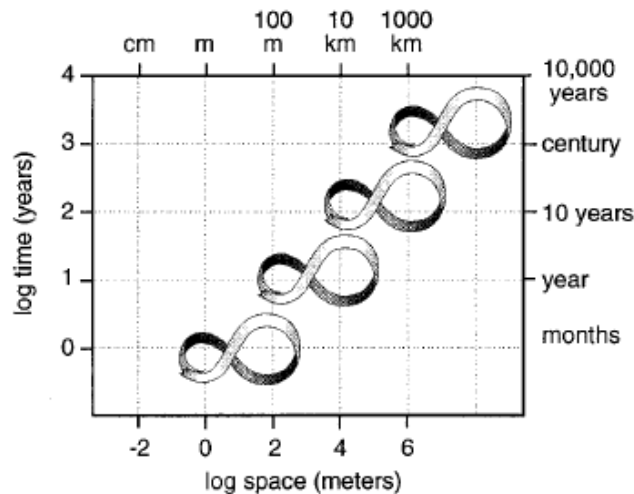
La otra diferencia constituye la conexión entre los niveles que forman la panarquía (Holling, 2001). Existen múltiples conexiones inter-escalares potenciales entre las fases del ciclo adaptativo de un nivel, y las fases del ciclo en otro nivel. No obstante dos son de particular interés: la revuelta (revolt) y el recuerdo (remember) los cuales involucran a tres niveles de la panarquía (Figura 2.5.2). La “revuelta”, que puede causar un cambio crítico en un ciclo al escalar hacia un estado vulnerable en un nivel más grande y lento, mientras que el “recuerdo”, facilita la renovación al tomar el potencial que se ha acumulado en un ciclo más grande y lento (Holling, 2001).

Cuando un nivel en la panarquía entra en la fase  $\Omega$ , el efecto puede escalar hacia el siguiente nivel más grande y lento. Esto puede facilitarse si el nivel superior se encuentra en una fase K ya que su resiliencia es baja y, por ende, es particularmente vulnerable (Holling, 2001). El efecto puede escalar hacia los niveles superiores de una panarquía, generando un efecto en cadena que puede llevar a un cambio radical de una panarquía. Un ejemplo de revuelta que se expande por una panarquía puede ser observado a partir de la primavera árabe, en la cual un evento de pequeña escala como la inmolación de Mohamed Bouazizi, generó una revuelta que escaló por la panarquía hasta abarcar una parte importante del mundo árabe, el cual se encontraba en una fase K (Chamberlain, 2012).

El recuerdo ocurre en la fase  $\alpha$ , después de una perturbación, y constituye un tipo importante de interacción en los momentos de cambio y renovación. Las oportunidades o los impedimentos para la renovación del ciclo están fuertemente influidos por la fase K del siguiente nivel, más grande y lento (Holling, 2001). Por ejemplo, si un incendio quema un bosque, las reservas de semillas y las especies sobrevivientes constituirían un legado biótico que se acumuló durante el crecimiento y desarrollo del bosque.

Cada nivel de la panarquía opera a su propio ritmo, protegido desde arriba por los niveles más lentos y grandes, pero, a su vez, fortalecido desde abajo por ciclos más rápidos y pequeños de innovación (Holling, 2001). De este modo, Holling argumenta que la panarquía es entonces creativa y conservadora. Las interacciones entre los niveles de la panarquía combinan aprendizaje con continuidad.

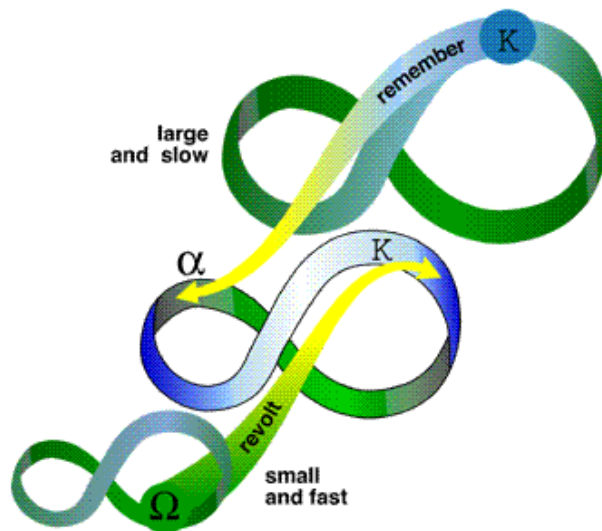
**Figura 2.5.1 Representación de una panarquía**



Fuente: Holling, 2001.

Los eventos estocásticos externos a un ciclo pueden causar colapsos espasmódicos, particularmente si los ciclos adaptativos de la panarquía se encuentran vulnerables (Holling, 2001). Eventos extremadamente grandes pueden superar las capacidades de sustentabilidad de una panarquía y destruir sus niveles, en una cascada que se extiende a lo largo de la panarquía. Ejemplo de esto sería la erupción de un volcán y sus consiguientes flujos piroclásticos, que podrían hacer desaparecer una ciudad completa, como fue el caso de Pompeya. La erupción del Vesubio destruyó los ecosistemas, sociedades y ciudades que se encontraron a su paso, desgarrando panarquías enteras (Etienne & Osorio, 1989). Holling (2001) también hace un paralelo entre las revoluciones en Eurasia después de un periodo de calma en el siglo XVII. A partir del trabajo de Goldstone (1991), quien hipotetizó que los colapsos políticos ocurren cuando hay varias crisis simultáneas en diferentes niveles organizacionales de una sociedad; Holling señala que la probabilidad de que ocurra un colapso panárquico en cascada se incrementa si los ciclos adaptativos dentro de una panarquía se alinean en una misma fase de vulnerabilidad.

**Figura 2.5.2 Conexiones y dinámicas panárquicas.**



Fuente: Holling, 2001.

Las panarquías que colapsan pueden declinar en ciclos maladaptativos (Holling, 2001). Si un ciclo adaptativo colapsa (debido a que el potencial y la diversidad han sido erradicados, ya sea producto de un mal uso o de un evento externo), puede entrar en un estado empobrecido, con baja conectividad, bajo potencial y baja resiliencia. Esta condición crea una trampa de “pobreza” que puede extenderse por los niveles de la panarquía y colapsando varios niveles a su paso. Los sistemas en una trampa de pobreza son incapaces de acumular suficiente potencial como para crear estructuras más complejas (nuevos niveles en la panarquía) (Holling, 2001). Un ejemplo de esto sería una sociedad colapsada tras un desastre natural tal que la cohesión cultural y la capacidad adaptativa es limitada, y sólo puede subsistir en un precario estado de supervivencia a través de pequeños grupos, como se puede observar en relatos de ficción post-apocalípticos.

Otro tipo de maladaptación, contrario a la trampa de pobreza, sería la trampa de rigidez. Ésta constituye una situación en la que existe alto potencial, alta conectividad y alta resiliencia. La alta resiliencia significaría que el sistema es capaz de perdurar a través de varias perturbaciones. El alto potencial se vería en abundante capital y riqueza, mientras que la alta conectividad se vería en eficientes métodos de eliminación de innovación (Holling, 2001). Un ejemplo podrían ser las regiones de África en las cuales existen abundantes recursos naturales, que están sometidas a controles rígidos por grupos paramilitares o por gobiernos corruptos, en los cuales cualquier tipo de cambio es suprimido para mantener el statu quo (Ong’ayo, 2008).

Holling (2001) señala que las panarquías que poseen actores humanos en sus sistemas se diferencian de otras panarquías, en que la presencia de actores humanos involucra: a)



previsión e intencionalidad, lo que les permite ser partícipes de su propio desarrollo y evolución; b) comunicación, que les permite transmitir información a mayor velocidad a través de los niveles de la panarquía (ejemplo de esto es la globalización, que en un corto periodo de tiempo ha cambiado valores culturales, economías y sociedades); y c) tecnología, que expande y amplifica las acciones humanas a través de escalas microscópicas hasta escalas globales.

Finalmente, si bien la heurística de la panarquía y de los ciclos adaptativos posee la deficiencia de ser bastante abstracta, ambigua y difícil de operacionalizar, diversos estudios la han aplicado y han obtenido interesantes perspectivas sobre fenómenos tanto sociales, ecológicos y socioecológicos (Weeks et al., 2004; Evans, 2008; Ambrosio-Albalá & Bastiaensen, 2010; Harm Benson & Garmestani, 2010; Petrosillo et al., 2010; Will, 2010; Van Apeldoorn et al., 2011), por lo que ésta constituye una creativa herramienta que permite comprender y entender las dinámicas de los sistemas complejos, permitiendo orientar las acciones humanas en función de los aportes entregados por ésta heurística.

## **2.6 Sistemas socioecológicos como objeto de estudio**

A simples rasgos, un sistema socioecológico (SES por su sigla en inglés) está compuesto por un sistema social y un sistema ecológico en constante interacción. Los SES son complejos y adaptativos y, por ende, el estudio de los sistemas complejos adaptativos es directamente relevante para el entendimiento de los problemas medioambientales enfrentados por la sociedad humana (Cumming, 2011).

Existen diversas definiciones sobre qué es un sistema socioecológico. Sin embargo, en su gran mayoría, estas definiciones apuntan en la misma dirección. Por una parte, un sistema socioecológico puede ser entendido como un sistema compuesto por: a) agentes que varían desde microbios, plantas, y hasta humanos, cada uno con un grado diferente de capacidad de procesamiento de información; b) un conjunto de acciones permitidas, relacionadas a sus características físicas o conductuales; y c) un substrato físico que incluye químicos, luz, y agua. Las interacciones entre estos agentes, y sus interacciones con el substrato generan sistemas socioecológicos dinámicos (Anderies et al., 2006). Por otra parte, Cumming (2011) indica que los SESs están compuestos por un conjunto de elementos (ej. granjeros, agua, bosques, especies polinizadoras, empresarios, etc.) que interactúan entre sí en un ambiente compartido (Cumming, 2011).

Otra definición corresponde a “un subconjunto de sistemas sociales en el que algunas de las relaciones interdependientes entre los humanos son mediadas a través de las interacciones con unidades biofísicas y biológicas no-humanas” (interpretación libre de Anderies et al., 2004). Petrosillo et al. (2010) por su parte, definen a los SESs como “*sistemas complejos, dinámicos y adaptativos, jerárquicamente estructurados y auto-organizados, con trayectorias históricas, memoria y capacidades de aprendizaje, con feedbacks no-lineales, umbrales y efectos de histéresis*” (Berkes et al., 2000; Cadenasso et al., 2006; Li, 2002; citado en Petrosillo et al., 2010)

De estas definiciones podemos desprender, para los fines de este trabajo, que un sistema socioecológico es un sistema complejo y adaptativo, que se encuentra conformado por sistemas sociales y ecológicos en constante interacción entre sus componentes y en interacción con su entorno a través de relaciones con otros sistemas socioecológicos de escalas menores, iguales o mayores, capaces de auto-organizarse en función de los cambios internos y externos, y con una clara capacidad evolutiva en función de estas auto-organizaciones. A su vez, los componentes de un sistema socioecológico poseerían un ciclo adaptativo propio y serían parte de una panarquía, al igual que el sistema en general.

## 2.7 Resiliencia espacial en los sistemas socioecológicos

Cumming (2011) al abordar y explorar el concepto de resiliencia espacial, hace importantes observaciones en las dinámicas de los sistemas socioecológicos que a fin de cuentas influyen en la susceptibilidad de éstos a las perturbaciones. La resiliencia espacial como concepto puede ser útil para el estudio de las perturbaciones, pues influyen en su desarrollo, en su composición, en su proliferación y en su distribución. Este autor, que define la resiliencia espacial como “la forma en que la variación espacial en variables relevantes, tanto dentro como fuera del sistema de interés, influencia (y es influenciado por) la resiliencia del sistema a través de múltiples escalas temporales y espaciales”. (Cumming, 2011), señala que ésta posee elementos tanto internos como externos.

Los principales elementos internos de la resiliencia espacial incluyen la disposición espacial de los componentes del sistema y sus interacciones; las propiedades del sistema relevantes espacialmente, tales como el tamaño y forma del sistema, y el número y naturaleza de las fronteras del sistema (ej. fuertes, o débiles, y si son variables temporalmente, o fijos en escalas de tiempo de interés); la variación espacial en fases internas, tales como estadios sucesionales<sup>1</sup>, que influyen la resiliencia; y las propiedades únicas del sistema que son una función de la localización de éste en el espacio.

Los principales elementos externos de la resiliencia espacial incluyen el contexto (alrededores espaciales, definidos como la escala del análisis); la conectividad (incluyendo la compartimentalización, o la modularidad<sup>2</sup>); y las resultantes dinámicas espaciales, tales como feedbacks espaciales, relaciones fuente-sumidero y subsidios espaciales.

---

<sup>1</sup> Los estadios sucesionales corresponde a procesos de remplazo secuencial de una comunidad por otra. Un ejemplo puede ser la colonización gradual de gramíneas en un terreno de tierras de cultivo abandonado, que luego éstas serían reemplazadas por arbustos, y finalmente árboles (Pickett, Collins & Armesto, 1987 en Cumming, 2011)

<sup>2</sup> “La modularidad se refiere a la compartimentalización del sistema en el espacio, el tiempo o en su estructura organizacional [...] confiere robusticidad al fijar las ganancias y compartimentalizar las perturbaciones”. Los compartimientos en este contexto son subsistemas en los que las interacciones entre elementos son más fuertes que las interacciones con elementos del sistema fuera del compartimiento. (Levin & Lubchenco, 2008, citado en Cumming, 2011)

Tanto los elementos internos como externos deben ser considerados en relación con otros aspectos de la resiliencia del sistema, incluyendo cosas tales como el número y naturaleza de los componentes y sus interacciones, la habilidad del sistema para soportar cambios mientras mantienen su identidad, la memoria del sistema, y el potencial inherente en el sistema para la adaptación y el aprendizaje” (traducción libre Cumming, 2011).

La resiliencia espacial es un concepto dinámico que se aplica no sólo a las propiedades actuales de un sistema de interés, sino que también nos permiten entender los cambios socioecológicos. Las variaciones locales en variables que influyen en la frecuencia y magnitud de las perturbaciones (como por ejemplo la pendiente, o la elevación), pueden afectar el régimen de perturbación local. A mayores escalas, la localización puede ser de extrema importancia porque las perturbaciones rara vez actúan homogéneamente sobre grandes áreas. Las propiedades espaciales del ambiente pueden influir en la trayectoria de cambio dentro de un paisaje; el tipo y magnitud de transformación socioecológica; la habilidad del sistema para responder y adaptarse a procesos transformativos a medida que estos ocurren; y la regeneración post-perturbación de los paisajes (Cumming, 2011). En otras palabras, la disposición espacial de un sistema socioecológico será crucial para su habilidad para lidiar con el cambio.

Algunos aspectos relevantes para la resiliencia espacial en sistemas con fuerte presencia humana constituye la localización de los centros de oferta y demanda, la disposición espacial de diferentes tipos de hábitat, y el número, magnitud y distribución de las conexiones de infraestructura (Cumming, 2011).

Cumming (2011) señala que las variables internas de la resiliencia espacial resumen la organización espacial de los componentes del sistema y de los límites dentro de un sistema complejo. Incluyen aspectos como la forma, tamaño, geometría, y el número de fronteras en un territorio. Por ejemplo, una topología montañosa puede suponer una fuerte limitante para la expansión de una ciudad. La distribución de las redes viales dependería fuertemente de ésta, lo cual podría desencadenar flujos de tráfico concentrados en pequeños cuellos de botella, lo cual a su vez provocaría polución, aumentos en el tiempo de transporte, y disminución en la calidad de vida de los conductores al pasar éstos largas horas atascados en el tráfico. De la misma manera, la distribución espacial de las redes de suministro energético, las fuentes de agua, y otros servicios públicos afectarían la probabilidad de que algunos suburbios experimenten fallas en la distribución de servicios, y además tienen una influencia importante en la resiliencia de la ciudad a los desastres naturales. Este aspecto de la resiliencia espacial también incluiría legados post-perturbación, definidos como las cosas que son dejadas atrás después de una gran perturbación, y su localización dentro del sistema (Cumming, 2011).

La variación espacial en dinámicas temporales se puede ejemplificar en los procesos de gentrificación, en los cuales el cambio gradual de barrios de clase baja a clase media tiene un claro patrón espacial, y que a su vez, tiene relevancia para varios temas sociales como la seguridad, la provisión de servicios, y la educación (Cumming, 2011).

Las propiedades únicas del sistema que son función de la localización en el espacio, corresponden a la idea de que la variación espacial puede generar condiciones únicas, tales como microclimas que otorgan hábitats a las especies endémicas.

En lo que respecta a los elementos externos de la resiliencia espacial, el contexto se refiere a lo que rodea el sistema (Cumming, 2011). Éste incluye la latitud en la que se encuentra el sistema, los sistemas económicos de mayor escala (regional, nacional, o global), el contexto cultural y social, la bioregión, etc.

La conectividad se refiere a los enlaces con otros componentes actualmente o potencialmente interactuantes. También se refiere al potencial para subdivisiones del sistema en compartimientos semiautónomos (Cumming, 2011). Por ejemplo, una red de ciudades altamente conectada permite el transporte de materia, energía e información con muy pocas dificultades; y así, los sistemas socioecológicos de estas ciudades estarían altamente influidos por los flujos de materia, energía e información que se realizarían entre ciudades.

Los feedbacks espaciales son feedbacks que ocurren entre la variación espacial y los procesos sistémicos (ej. migración o competencia) (Cumming, 2011). Por ejemplo, las comunas que constituyen el centro económico del Gran Santiago (Las Condes, Providencia y Santiago) han promovido políticas que incentivan la inversión privada, y que tienden a aumentar la atractividad de estas comunas para que las empresas se localicen en éstas. A su vez, la localización de estas empresas constituye un incentivo para que otras empresas relacionadas a la provisión de servicios a los trabajadores (restaurantes y bancos, entre otras) se localicen en estas comunas.

Los subsidios espaciales son inputs externos que a) son componentes importantes del sistema de estudio; y b) constituyen generalmente un costo para el sistema que provee el subsidio (Cumming, 2011). Los subsidios pueden involucrar separación espacial y/o temporal. Cumming (2011) señala que la resiliencia de un sistema socioecológico puede depender de los subsidios en al menos dos formas: a) subsidios que se espera que provea; y b) subsidios de los que depende. Por ejemplo, las actividades mineras en la parte alta de una cuenca pueden liberar sedimentos y minerales en los ríos que cruzan la cuenca, los cuales afectarían las actividades agrícolas que se encuentran en la parte baja de la cuenca. La liberación sedimentos y de minerales en los ríos supondrían un subsidio provisto desde la parte alta de la cuenca hacia la parte baja; De esta manera, la resiliencia (la cual sería negativa) del sistema socioecológico de la parte baja de la cuenca aumenta, dificultando la producción de las actividades agrícolas al recibir aguas contaminadas. Similarmente, los sistemas socioecológicos de las comunas del centro económico del Gran Santiago dependen fuertemente del subsidio de fuerza laboral provisto por el resto de las comunas de la metrópolis.

La escala resulta ser un tema central en la resiliencia espacial. Su análisis incluye consideraciones tales como la ilusión de estabilidad; el rol de las fuerzas de pequeña o gran escala; y la interrelación de las interacciones patrón-proceso (es decir, como el patrón influye en el proceso y viceversa) entre y dentro de las escalas. Los patrones y los

procesos se pueden reforzar o debilitar entre sí si se reduce o aumenta el potencial para el cambio a otras escalas; y la naturaleza de la conjugación entre la función del sistema y la composición de éste (es decir, el número y naturaleza de sus componentes) puede ser dependiente de la escala (Cumming, 2011). Por ejemplo, a medida que una ciudad crece, depende cada vez más de los sistemas de producción y distribución de alimentos; a medida que esta dependencia se incrementa, la ciudad deberá abastecerse de productores externos puesto que el sistema socioecológico local será incapaz de suministrar los alimentos que necesita y, por ende, la existencia de la ciudad dependerá de los subsidios que otros sistemas socioecológicos puedan proveer, volviéndose vulnerable a cambios en los sistemas de oferta y demanda. Este fenómeno puede observarse en la constante volatilidad en los precios de los alimentos y sus efectos en las economías nacionales del mundo (FAO, 2011).

La teoría existente en torno a los sistemas socioecológicos (Gunderson & Holling, 2002; Holling, 2001; Norberg & Cumming, 2008, citado en Cumming, 2011) señala que la resiliencia de un sistema promedio debiese subir si: posee alta diversidad (diferenciación de componentes); vasto capital natural, económico y social; una mayor habilidad para aprender o adaptarse; la existencia de componentes redundantes que permitan suplir a otros componentes que por algún motivo no puedan operar; y un grado de conectividad intermedia hacia otros sistemas (las implicaciones de la conectividad son contingentes en la naturaleza de las perturbaciones; considerando las diferentes implicancias de compartir innovaciones tecnológicas vs la expansión de patógenos, por ejemplo). Adicionalmente, Cumming (2011) señala que la historia de un sistema socioecológico, incluyendo sus exposiciones a perturbaciones pasadas y su memoria respecto a las respuestas entregadas frente a éstas (ya sean exitosas o no) van a influir su habilidad para lidiar con una perturbación. Como los sistemas socioecológicos y sus componentes poseen ciclos adaptativos y son parte de panarquías, el momento en el cual las perturbaciones aparecen, en relación con la fase del ciclo adaptativo en el que se encuentra el sistema y sus componentes, es crucial para entender los patrones de perturbación antrópica asociados a las prácticas de uso de suelo por parte del subsistema humano.

## **2.8 El espacio geográfico y el territorio como un sistema socioecológico**

Aclarados los contenidos necesarios para entender el enfoque de los sistemas socioecológicos es posible responder a la siguiente pregunta: ¿es posible ver al espacio geográfico como un sistema socioecológico?

Para responder a esto, Cumming (2011) señala que es necesario aclarar otras preguntas más profundas: 1) ¿es el espacio geográfico un sistema complejo?; 2) si lo es ¿debería ser considerado un sistema complejo, o un sistema complejo adaptativo?; y 3) ¿exhibe el espacio geográfico otras propiedades únicas que debiesen ser consideradas a la hora de aplicar el enfoque socioecológico al espacio geográfico?

Antes de responder a estas preguntas, es necesario definir qué se entiende por espacio geográfico. En lo que respecta al espacio geográfico, Milton Santos (1997) propone

concebir a éste como un conjunto indisociable de objetos y de sistemas de acciones. Los sistemas de objetos no ocurren sin los sistemas de acciones y estos últimos no suceden sin los primeros; el espacio es construido históricamente.

Santos (1997) agrega que, en los tiempos contemporáneos, el espacio geográfico es un sistema de objetos cada vez más artificiales, provocados por sistemas de acciones igualmente artificiales, y cada vez más tendientes a fines extraños al lugar y a sus habitantes. De ello, Montañez y Delgado (1998) señalan que se establece un nuevo sistema de naturaleza que gracias al movimiento ecológico conoce apenas un ápice de su desnaturalización.

Los autores añaden que los objetos del espacio geográfico contemporáneo no son colecciones sino sistemas que surgen a partir de un comando único y que parecen dotados de una intencionalidad más definida que en épocas anteriores, intencionalidad que puede ser mercantil o simbólica.

El concepto de espacio geográfico podría ser equiparable al de paisaje expuesto por Carl Troll (1950), el cual considera que el paisaje es *“una parte de la superficie terrestre con una unidad de espacio que, por su imagen exterior y por la actuación conjunta de sus fenómenos, al igual que las relaciones de posiciones interiores y exteriores, tiene un carácter específico, y que se distingue de otros por fronteras geográficas y naturales”*.

No obstante, el concepto expuesto por Troll abarca un área netamente física y ecológica, dejando de lado los componentes sociales y económicos del espacio geográfico expuesto por Santos (1997). Por su parte, Cumming (2011) trabaja un concepto mucho más integrado del paisaje, el cual también puede ser equiparable al de espacio geográfico. Éste señala que el paisaje puede ser observado de varias maneras dependiendo del fin que se busque. Así, identifica tres tipos de paisaje: a) el paisaje como una entidad ecológica (enfocándose en los tipos de hábitats y en los organismos); b) como una entidad social y/o económica (enfocándose en el ser humano y sus influencias en el paisaje, incluyendo los “paisajes culturales” que son definidos como paisajes culturalmente apropiados por el ser humano); y c) como una entidad socioecológica (enfocándose en las interacciones y feedbacks entre el ser humano y la naturaleza) compuesta por variaciones sociales, bióticas y abióticas, y las interacciones entre ellas, todas definidas cohesivamente en el espacio y el tiempo. Un paisaje socioecológico podría contener múltiples ecosistemas, economías y sistemas sociales (Cumming, 2011). Es por ello una unidad natural equiparable al concepto de espacio geográfico en la cual se pueden abordar las preguntas sobre la gestión de los recursos, el bienestar humano y la integridad de los ecosistemas desde un punto de vista espacial.

Cumming (2011) señala que las diferentes partes de un sistema complejo derivan su pertenencia en el sistema a través de una o más propiedades que entregan cohesión. En el espacio geográfico, la proximidad espacial y la conectividad son las formas más claras de cohesión. Los diferentes componentes del espacio geográfico pueden interactuar entre sí con solo estar próximos geográficamente. No obstante, existen excepciones como la falta de conectividad derivada ya sea de accidentes geográficos (relieve o hidrografía), así

como de la acción humana (falta de infraestructura vial). La proximidad también implica que los componentes del espacio geográfico tienden a experimentar regímenes similares (Cumming, 2011) derivados del nivel escalar superior en la panarquía. Los procesos de grandes escalas provenientes de niveles superiores de la panarquía afectan vastas áreas al mismo tiempo, llevando a una sincronía en los cambios de uso y cobertura de suelo (Holmgren & Scheffer, 2001; en Cumming, 2011).

Otra propiedad que el espacio geográfico posee en común con los sistemas complejos es el rol de la diversidad (la diferenciación de los componentes) en los procesos del sistema y en la estabilidad (Levin, 1992; citado en Cumming, 2011). Las asimetrías que se dan en el espacio geográfico derivan en procesos de relevancia significativa (Cumming, Barnes, & Southworth, 2008; citados en Cumming, 2011). El espacio geográfico, a su vez posee una estructura panárquica, en común con otros sistemas complejos (Simon, 1962; Holling, 2001). Contiene un rango finito de variación posible, y exhibe un número de marcadas interacciones patrón-proceso no-lineales (Kasischke et al., 1995; Scheffer, 2009; citados en Cumming, 2011). Y como bien dice Santos (1997), el espacio geográfico es construido históricamente, lo que se puede interpretar como una clara dependencia del camino en sus trayectorias de cambio. De ello, se desprende que el sistema geográfico sí puede ser considerado como un sistema complejo, pero ¿es adaptativo?

Cumming (2011) señala que el espacio geográfico presenta propiedades de los sistemas adaptativos tales como la creación de innovación, la presencia de diversidad y la restauración de algunos tipos de cobertura y uso de suelo a través de mecanismos de competición y selección. Por ejemplo, la entrada de nuevos agentes al sistema, en forma de nuevos competidores en el mercado, o especies invasivas derivados de presiones externas (como puede ser la economía regional, nacional o global, así como el cambio climático, entre otros) puede llevar a cambios que alteran el espacio geográfico de una u otra manera. Así, las inmobiliarias alimentadas por la dispersión urbana pueden transformar vastas extensiones de territorio en zonas residenciales de baja densidad. De la misma manera, la introducción de una especie foránea en un ecosistema puede desplazar a los competidores locales y alterar el ecosistema y sus patrones espaciales. Otro ejemplo se da en que en la agricultura, las presiones económicas favorecen ciertos tipos de cultivo en determinados lugares ricos en fertilidad, llegando a cortar bosques para dar paso a tierras agrícolas y de esta manera alterar los patrones de cobertura vegetal. El hecho de que la composición del espacio geográfico pueda responder a las presiones selectivas (como lo son el cambio climático o el mercado), junto con el hecho de que esta composición también influencia la magnitud y naturaleza de las presiones selectivas que experimenta (ya que no en todos los espacios geográficos se instalarán actividades como la minería o la agricultura), sugiere que el espacio geográfico exhibe un rango de dinámicas de sistemas complejos que se calzan con las definiciones de adaptación y auto-organización.

Los feedbacks, y otros procesos de auto-organización también juegan un rol importante en el espacio geográfico ya que éstos permiten la creación de estados de estabilidad alternos, atractores y cuencas de atracción (Cumming, 2011). De este modo, y como se

dijo anteriormente, el espacio geográfico también es parte de un ciclo adaptativo y de una panarquía.

Otro fenómeno de los sistemas complejos adaptativos que se da en el espacio geográfico es el de la compartimentalización, la cual se da cuando los feedbacks “*top-down*” de los niveles más altos de una panarquía son débiles y las interacciones en y/o bajo un determinado nivel de ésta son más fuertes. Por ejemplo, en un espacio geográfico donde la presencia del estado es débil y se dan casos de injusticia social y ambiental, se pueden dar paso a nuevas formas de organización y de reivindicación territorial (Odile, 2001). La compartimentalización es importante ya que los límites artificiales impuestos por el ser humano, como los de estado-nación, pueden contener y limitar las interacciones entre dichos límites, pasando gradualmente a ser sistemas vecinos pero divergentes y diferentes (Cumming, 2011). Así, por ejemplo, la isla que contiene a Haití y la República Dominicana posee un único ambiente biofísico, pero dos compartimientos de vegetación: una deforestada (Haití) y una forestada (República Dominicana) (Dolisca et al., 2007; citado en Cumming, 2011). De este modo, los sistemas políticos juegan un rol clave, pues están contenidos en territorios definidos y ejercen influencias importantes en los patrones espaciales de gran escala.

Las interacciones locales y la compartimentalización son importantes puesto que contribuyen a la existencia de no-linealidades y de umbrales en el espacio geográfico. Tales no-linealidades juegan papeles importantes en las relaciones patrón-proceso (Cumming, 2011). Por ejemplo, en un sistema de ciudades donde el comercio entre ellas es clave para su subsistencia; si la conectividad se reduce peligrosamente más allá de un determinado umbral, las actividades comerciales se reducirían significativamente, desabasteciendo las ciudades y generando precarización y disminución en la calidad de vida de sus poblaciones. De esta manera, la estructura y la función en el espacio geográfico se influyen fuertemente entre sí, al igual que en otros sistemas adaptativos complejos (Cumming, 2011).

Finalmente, para responder si el espacio geográfico posee propiedades únicas que lo diferencian de otros sistemas complejos, Cumming (2011) señala que el espacio geográfico puede contener varios sistemas superpuestos. Esto es porque el espacio geográfico generalmente carece de un límite restrictivo (a excepciones del océano y grandes relieves orogénicos como cordones montañosos, entre otros, los cuales constituyen importantes barreras para el movimiento entre paisajes, siendo un aspecto importante para la generación de diversidad). De esta manera, entrar y salir de un determinado espacio geográfico o paisaje es relativamente fácil. Así, algunos procesos se llevan a cabo cuando algunos componentes del paisaje están ausentes temporalmente, como la regeneración de los pastizales de las veranadas e invernadas que son consumidas por el ganado mapuche (Azócar et al., 2005).

Otras propiedades únicas del espacio geográfico como un sistema complejo es que en éste no pueden quedar vacíos (Cumming, 2011). Cada porción del espacio es remplazado, por otro o un nuevo componente, de manera que el espacio geográfico siempre está ocupado. Relacionado a esto, está la falta de movilidad de algunos



componentes del espacio (Cumming, 2011); si bien existen elementos que se mueven a través del espacio geográfico como se mencionó anteriormente, la configuración biofísica del espacio geográfico cambia a escalas de tiempo geológicas a través del ciclo geográfico (Davis, 1899). Al contrario, los elementos humanos del espacio geográfico cambian a escalas de tiempo más rápidas, que varían de años a décadas.

Cumming (2011) señala que producto de la inmovilidad de los componentes del espacio geográfico, y que una de las principales fuentes de cohesión es la proximidad, la pertenencia de un elemento en el espacio geográfico es una condición de margen más que sistémica. Así, la incompatibilidad de pertenencia de un componente en un paisaje (como por ejemplo, un tipo de uso de suelo insostenible con su entorno) devenga en cambio de ese paisaje. El autor señala que otra consecuencia importante en la organización del espacio geográfico es que a medida que la conectividad o la proximidad son reducidas, las interacciones más importantes de éste evidenciarán algún tipo cuantificable de pérdida en su fuerza.

Otra característica importante que diferencia al espacio geográfico de otros sistemas complejos es que los componentes biofísicos, a diferencia de los humanos, no poseen una capacidad de decisión centralizada, ni de procesamiento de información ni de intencionalidad (Cumming, 2011). Los patrones de gran escala en el espacio geográfico son usualmente resultado de propiedades de emergencia derivados de las interacciones entre los componentes locales, y no tanto de presiones selectivas a una escala de paisaje (Cumming, 2011). Diversas formas de procesamiento de la información central y de capacidad de respuesta han surgido en los paisajes socioecológicos. Algunas de éstas son el ordenamiento territorial, la planificación urbana, y las políticas de uso de suelo, entre otras.

Así, a través de los argumentos expuestos por Cumming (2011), es posible decir que el espacio geográfico presenta todas las características de un sistema complejo y adaptativo, y que además posee propiedades tales, que hacen del espacio geográfico único en el ámbito de los sistemas complejos adaptativos. Estas propiedades especiales se manifiestan en los procesos espaciales que tienen lugar en el espacio geográfico, y que son abordados en el siguiente subcapítulo.

## **2.9 Procesos espaciales en los paisajes socioecológicos**

Si bien existen múltiples formas en las cuales el espacio geográfico influye en el desarrollo de los procesos sociales y ecológicos, es a través de dos elementos claves que dichos procesos son más dependientes (Li & Reynolds, 1994; Fortin, et al., 2003; citado en Zaccarelli, et al., 2008). El primero de estos elementos es la composición espacial. La composición espacial hace referencia a los elementos que constituyen el paisaje, en otras palabras, qué usos y coberturas de suelo toman lugar en el paisaje. Estos pueden variar desde cultivos anuales, pasando por plantaciones forestales, urbanizaciones dispersas, y ecosistemas tales como praderas, matorrales y bosques, etc.

El otro elemento clave en el desarrollo de los procesos espaciales constituye la configuración espacial. La configuración espacial hace referencia a la forma en la cual están distribuidos los distintos usos y coberturas de suelo. Ya sea que estén aglomerados, o dispersos, la distribución de éstos cumple un rol importante en los procesos ecológicos al definir el tamaño de los sub-sistemas en los cuales dichos procesos tomarán lugar.

El qué hay, y cómo está distribuido en el paisaje es importante en la medida que la distribución y configuración proporcional entre los distintos usos y coberturas de suelo tendrá directa relación con los procesos ecológicos, así como sociales que tomen lugar en el paisaje (Clark, 2010; Cumming, 2011). Esto hace directa relación a los procesos emergentes que surgen de la interrelación entre los distintos elementos que interactúan y componen a un sistema, tanto ecológico, como socioecológico.

Estas propiedades emergentes son conocidas en la literatura como servicios ambientales, o servicios ecosistémicos. Los servicios ecosistémicos constituyen servicios de interés para el ser humano debido al importantísimo rol que estos cumplen en la resiliencia de los sistemas antrópicos y naturales (Kremen, 2005). Un ejemplo de estos servicios lo constituye la absorción de CO<sub>2</sub> realizada por la vegetación en zonas urbanas que ayuda a descontaminar las ciudades.

A las unidades funcionales, es decir, los componentes que integran estos servicios se les conoce como proveedores de servicios ecológicos (ESP, por sus siglas en inglés) (Kremen, 2005). Naturalmente, cada uso y cobertura de suelo puede o no contener ESPs, o albergar múltiples ESPs que actúan a múltiples escalas. Al observar a los ESPs como parte de los sistemas ecológicos, o socioecológicos, complejos y adaptativos, las propiedades de emergencia producidas por sus interrelaciones poseen funcionalidades diferentes según la escala a la cual se desarrollen. En el Cuadro 2.9.1 se puede observar un listado con los diferentes servicios ecosistémicos provistos por diferentes ecosistemas, y la escala a la cual estos servicios toman lugar. Cabe señalar que cuando se habla de unidades funcionales, se refiere a la unidad de estudio para evaluar las contribuciones funcionales del ESPs.

Los servicios ecosistémicos son dependientes de las interrelaciones que se dan entre los distintos usos y coberturas de suelo (Rodríguez, et al., 2005). La forma en la cual estos se interrelacionan genera no-linealidades que mueven los estados de estabilidad de los sistemas, provocando que un uso, o cobertura de suelo, se transforme, y con ello, provoque un cambio de los elementos que constituyen sus sistemas, y, en consecuencia, de los ESPs.

**Cuadro 2.9.1 Servicios ecosistémicos asociados al uso/cobertura de suelo, clasificados de acuerdo al Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), y sus ESPs directos e intermedios.**

Servicio	ESPs directo e intermedio/nivel organizacional	Unidades funcionales	Escala Espacial
Valorización estética y cultural	Toda la biodiversidad, uso/cobertura de suelo del paisaje	Especies, poblaciones, comunidades, hábitats y paisajes	Local-global
Bienes ecosistémicos	Diversas especies, usos/coberturas de suelo del paisaje de apoyo.	Especies, poblaciones, comunidades, hábitats y paisajes	Local-global
Protección ultravioleta	Ciclos biogeoquímicos, micro-organismos, usos/coberturas de suelo del paisaje de apoyo.	Ciclos biogeoquímicos, grupos funcionales, paisaje	Global
Purificación del aire	Micro-organismos, plantas, uso/cobertura de suelo del paisaje.	Ciclos biogeoquímicos, poblaciones, especies, grupos funcionales	Regional-global
Mitigación de inundaciones y sequías	Uso/cobertura de suelo del paisaje	Comunidades, hábitats, paisajes	Local-regional
Estabilidad climática	Uso/cobertura de suelo del paisaje	Comunidades, hábitats, paisajes	Local-global
Polinización	Insectos, aves, mamíferos, y usos/coberturas de suelo del paisaje de apoyo.	Especies, poblaciones, grupos funcionales, comunidades, hábitats, paisajes	Local
Control de plagas	Parásitos y depredadores invertebrados, depredadores vertebrados, y usos/coberturas de suelo del paisaje de apoyo.	Especies, poblaciones, grupos funcionales, comunidades, hábitats, paisajes	Local-regional
Purificación del agua	Uso/cobertura de suelo, micro-organismos del suelo, micro-organismos acuáticos, invertebrados acuáticos y usos/coberturas de suelo del paisaje de apoyo.	Especies, poblaciones, grupos funcionales, comunidades, hábitats, paisajes	Local-regional
Detoxificación y descomposición de residuos	Hojarasca e invertebrados del suelo; micro-organismos del suelo; micro-organismos acuáticos, y usos/coberturas de suelo del paisaje de apoyo.	Especies, poblaciones, grupos funcionales, comunidades, hábitats, paisajes	Local-regional
Generación y fertilidad de suelos	Hojarasca e invertebrados del suelo; micro-organismos del suelo, plantas fijadoras de nitrógeno; producción animal y vegetal de productos de desecho, y usos/coberturas de suelo del paisaje de apoyo.	Especies, poblaciones, grupos funcionales, comunidades, hábitats, paisajes	Local
Dispersión de semillas	Hormigas, aves, mamíferos y usos/coberturas de suelo del paisaje de apoyo.	Especies, poblaciones, grupos funcionales, comunidades, hábitats, paisajes	Local
Regulación de perturbaciones (incluye perturbaciones humanas, y especies invasoras)	Uso/cobertura de suelo, parasitoides de apoyo y depredadores vertebrados	Especies, poblaciones, grupos funcionales, comunidades, hábitats, paisajes	Local-regional

Fuente: basado en Petrosillo, et al., 2010, basado en Kremen, 2005.

Estas interrelaciones, manifestadas en cambios de uso y cobertura de suelo, y cambios al interior del uso/cobertura de suelo, se materializan tanto en la composición y configuración de los elementos del paisaje socioecológico. Cuando un sistema natural, como una pradera con matorrales, y su respectiva fauna y flora, es transformada a un uso

agrícola, los elementos de éste, es decir, los mamíferos, aves, plantas, etc., son desplazados o eliminados del sistema, y reemplazados por nuevos elementos, como un monocultivo de trigo, y las consiguientes especies de insectos y animales asociados a dicho tipo de uso/cobertura de suelo pasan a reemplazar las antiguas interrelaciones que en éste tomaban lugar. Al ocurrir esta transformación en la composición y configuración del paisaje, los servicios ecosistémicos, tales como el control de plagas, o la generación de fertilidad de suelos, por nombrar algunos, son eliminados del sistema, necesitando nuevos inputs por parte del sistema antrópico para poder reemplazarlos.

A estos cambios en los proveedores de servicios ecosistémicos, se les puede conocer como perturbaciones, y pueden comprender a agentes tales como el fuego, pesticidas, herbicidas, plagas, enfermedades, especies invasivas, así como dispersión urbana; y constituyen alteraciones en los ecosistemas cuyo origen puede ser atribuido tanto a cambios en el uso y la cobertura del suelo, como a cambios en las prácticas que se lleven a cabo en éste (Zaccarelli, et al., 2008). A su vez, Pickett & White (1985) las definen como cualquier evento relativamente discreto en el espacio y el tiempo que causa disrupción en un ecosistema, la estructura de una población o comunidad ecológica, y cambios en los recursos naturales, substratos o el medio ambiente físico. No obstante, esta definición no resulta del todo satisfactoria para los fines de esta investigación, por lo que se propone la siguiente conceptualización: una perturbación es un evento discreto tanto en el tiempo como el espacio que, a través de cambios en la cobertura vegetal, cataliza cambios en los ciclos adaptativos de los sistemas ecológicos, sociales o socioecológicos expresados en coberturas y usos de suelo.

Una perspectiva interesante sobre las relaciones que se dan entre los distintos usos de suelo puede ser abordada desde las relaciones fuente-sumidero de la ecología. Estas constituyen relaciones de metapoblaciones en las cuales existen flujos migratorios desde las zonas con superávits de población, hacia aquellas con déficits de población. Las metapoblaciones constituyen a múltiples poblaciones de una especie dada, las cuales se encuentran interconectadas, permitiendo el libre flujo entre los individuos (Hanski, 1999).

Desde que Levins (1969) propuso el modelo de relaciones fuente-sumideros en metapoblaciones, el término ha ido evolucionando para ser utilizado por diversas disciplinas tanto en las ciencias de la tierra, como en la ecología. Loreau, et al., (2013) proponen tres conceptos unificadores para las distintas acepciones de relaciones fuente-sumidero existente en la literatura. De estos tres conceptos, el más importante para las implicancias de esta investigación lo constituye las relaciones fuente-sumidero netas, en las cuales una fuente es un subsistema que es un exportador neto de entidades de interés vivas o no vivas, mientras que una fuente es un importador neto de estas entidades (Loreau, et al., 2013).

El concepto detrás de las dinámicas fuente-sumidero netas es de especial interés a la hora de estudiar a las relaciones que se dan entre los distintos usos y coberturas de suelo, y sus consecuencias en los proveedores de servicios ecosistémicos. Entender qué usos de suelo pueden comportarse como fuentes, o sumideros, según algún contexto determinado, podría ayudar a un mayor entendimiento de las relaciones espaciales que

influyen en el medio ambiente, sus servicios ecosistémicos, y su relación con la sociedad. En esto, de especial interés son las contribuciones de Cumming (2011), y los trabajos de Zaccarelli, et al. (2008), Petrosillo, et al. (2010), y Zurlinni, et al. (2006).

Por ejemplo, los sistemas urbanos se manifiestan en el paisaje con un comportamiento disperso, derivado de las políticas urbanas ejercidas desde la panarquía institucional y desde los procesos demográficos, económicos y sociales inherentes a la panarquía social. Estos sistemas urbanos, al expandirse, alteran y transforman los sistemas agrarios, ya sea modificándolos permanentemente para transformarlos en suelos urbanos, o a través de alzas en el valor del suelo que llevan a la especulación del suelo, abandonando su actividad productiva. La expansión urbana conlleva a un cambio en la composición de los elementos del paisaje (cambios de uso de suelo agrario a urbano). Pero a su vez, esta expansión posee un patrón característico, en el cual las áreas urbanas tienden a expandirse en las cercanías de otras áreas urbanas, o infraestructuras que faciliten la conectividad entre áreas urbanas, lo que demuestra un patrón de contagio y aglutinación de los sistemas urbanos. En esta situación, el sistema urbano actúa como una fuente, al poseer una amplia demanda de viviendas, servicios e infraestructura derivados tanto de un crecimiento demográfico, como de un crecimiento económico, lo cual conlleva a que el sistema urbano se expanda a costa de los sistemas agrícolas, que actuarían como sumideros.

Cabe señalar que la distinción entre fuentes y sumideros es fuertemente dependiente del contexto y la escala espacial y temporal de análisis. Así, si a una escala regional, la agricultura constituye una fuente de perturbaciones frente a las áreas naturales; a una escala de ciudad puede comportarse como sumidero frente a la expansión urbana (Loreau, et al., 2013).

Finalmente, y en vista de todo lo anterior, es posible decir que si bien hay que ser cuidadosos con cómo los conceptos de ecología se aplican al estudio de las ciencias geográficas, es posible nutrir a la geografía con mayores conceptos que permitan estudiar los cambios de uso y cobertura de suelo de una manera más integrada y holística. De esta manera, el quehacer geográfico se fortalece ante un complejo escenario futuro, en el cual las ciencias geográficas cumplirán un rol importante en el trabajo interdisciplinario para el desarrollo de la sustentabilidad.

## **2.10 La importancia de la escala en la gestión de los paisajes socioecológicos**

Considerando que el espacio geográfico, y los paisajes socioecológicos se comportan como un sistema complejo y adaptativo, y que ello implica el encadenamiento de los ciclos adaptativos de éstos en una o varias panarquías, se torna evidente la importancia que el concepto de escala adquiere en las dinámicas que toman lugar en el espacio geográfico, y en el territorio.

Cuando se habla de escala, no se refiere únicamente a la escala espacial (Tierra, continente, macro-cuenca, cuenca, subcuenca, etc...) o temporal (siglos, décadas, años, meses, etc...). Se tiene la existencia también de escalas jurisdiccionales, que van desde

los organismos internacionales (Naciones Unidas, por ejemplo), los Estados Nacionales, Regiones, Provincias, Comunas, hasta distritos. También están las escalas Institucionales, que van desde la Constitución, pasando por las Leyes, hasta llegar a las ordenanzas municipales, por ejemplo; así como las escalas de Gestión (Estrategia, proyectos, y tareas), Redes (Sociedad, grupo, familia, etc...), y hasta del conocimiento (general y universal, y específico y contextual) (Cash, et al., 2006).

Cash, et al. (2006) hacen una clasificación entre los tipos de interacciones que se dan en las escalas, de las cuales dos son de importancia para la presente investigación: *Cross-level* o entre niveles (interacción entre los niveles jerárquicos de una escala), y *Cross-scale*, o inter-escalar (interacción entre diferentes escalas). Cabe decir que un tipo de relación puede ser cross-scale (Inter-escalar) y cross-level (entre niveles) al mismo tiempo. Tal es el caso de los paisajes socioecológicos, pues en ellos se encuentran panarquías de sistemas biofísicos complejos y adaptativos, influidos y gestionados por panarquías de jurisdicción, gestión e institución social.

Los autores identifican tres tipos de escenarios en los cuales la resiliencia de los paisajes socioecológicos se ve amenazada, y en donde la planificación y gestión de éstos resultaría en un fracaso.

En el primer escenario, llamado "ignorancia", la complejidad de los paisajes socioecológicos parece ser demasiado abrumadora para los tomadores de decisiones como para entender o incluso influir en éstos. En este caso se elige ignorar las dinámicas escalares temporales y espaciales, lo que tiene resultados contrarios a sus objetivos. Ejemplos de estos están en las políticas nacionales "*top-down*" que restringen las dinámicas locales y "*bottom-up*" que resultan en problemáticas emergentes de gran escala derivadas de la agregación de soluciones demasiado locales y/o cortoplacistas. Además, la investigación científica se enfoca en un solo nivel, y rara vez examina las interacciones del fenómeno que cruzan niveles o escalas, ya sean sociales o ecológicas.

En el segundo escenario, es el *mismatch*, o incongruencia. En este escenario, el problema consiste en que las instituciones antrópicas no se alinean coherentemente con las escalas en que los procesos biogeofísicos de los recursos toman lugar, ya sea en el tiempo y el espacio. En este caso, las autoridades, tomadores de decisiones, o incluso la jurisdicción de la gestión no son coincidentes con el problema. Un ejemplo típico serían los casos en que, producto de los cortos ciclos electorales, la planificación a largo plazo resulta titánicamente difícil. Otro ejemplo serían los corpus del conocimiento científico que tiene poca relevancia o importancia para los tomadores de decisiones locales, como por ejemplo los modelos climáticos globales que tienen una resolución espacial y temporal tal que resultan inútiles para la gestión local.

Finalmente, el tercer escenario es el de la pluralidad, en el cual puede ser caracterizado por la suposición incorrecta de que existe una única mejor caracterización del desafío de la escala y el nivel que se aplica a todo el sistema y a todos los actores. Las consecuencias de este modelo "*one size fits all*" resulta en decisiones inefectivas y desigualdad en los resultados. Un ejemplo sería cuando los problemas medioambientales

globales hacen que las soluciones institucionales sean invisibles al definir el problema como “sólo global”. El problema en los gobiernos surgiría al tratar de simplificar el problema para poder calzarlo con sus jurisdicciones.

De estos escenarios, el más importante para esta investigación lo constituye el caso de las incongruencias escalares, pues al no existir coherencia inter-escalar en la planificación y gestión de los paisajes socioecológicos, los ESPs son más propensos a ser afectados negativamente.

Finalmente, y para concluir el marco teórico, la gestión de los ESPs es importante en el marco del desarrollo sustentable considerando que los servicios que éstos proveen son de crucial importancia para los sistemas antrópicos, ya sea desde la provisión de alimentos, regulación climática, descontaminación, etc. Un primer paso en este aspecto sería analizar los efectos de la perturbación antrópica relacionados a las dinámicas multiescalares de uso y cobertura de suelo en los paisajes socioecológicos. Para llegar a ello es posible abordar la detección de cambios en las dinámicas espaciales de los paisajes socioecológicos en una escala temporal lo suficientemente pequeña como para abordar mayoritariamente cambios antrópicos, lo que permitiría ver y analizar los patrones de perturbación, y de este modo detectar la existencia de incongruencias, las que luego podrían ser abordadas en la planificación del espacio geográfico.

### **Capítulo 3: Características del área de estudio**

Como se ha mencionado en el planteamiento del problema, la Región Metropolitana de Santiago constituye una unidad territorial político-administrativa de gran interés para el estudio de los sistemas socioecológicos, y en consecuencia, para el presente estudio; debido a su gran dinamismo económico, la gran calidad de sus suelos con aptitudes agrícolas, y el vital rol que cumplen los ecosistemas naturales a la hora de proveer servicios ecosistémicos para la Región, entre otros.

En este contexto, el presente capítulo abordará estas dinámicas desde una perspectiva de cambio de uso y cobertura de suelos, que, a fin de cuentas, caracterizan las interrelaciones en los paisajes socioecológicos de la Región, las cuales son abordadas por el presente estudio. Éstas se analizarán desde las distintas jerarquías político-administrativas de la panarquía institucional del Estado (e.j): Ministerio, Intendencia. Así, el área de estudio abarca los límites político-administrativos de la Región Metropolitana de Santiago, así como sus Provincias. No obstante, cabe señalar, que la comuna de San José de Maipo fue omitida del estudio por los motivos descritos en el capítulo IV.

#### **3.1 Sistema antrópico:**

La Región Metropolitana de Santiago (RMS) es la unidad administrativa que contiene a la principal metrópolis del país, la capital nacional de Santiago. Considerando el periodo de estudio (1997-2004), es necesario utilizar datos lo más cercanos a ese periodo para obtener una contextualización adecuada de la situación del área de estudio en dicho periodo. Para el año 2002, la RMS era el hogar de 6.061.185 habitantes, lo que presenta una variación del 15,28% respecto al año 1992 (5.257.937 habitantes) (INE, 2002). Su principal asentamiento urbano, la metrópolis de Santiago, constituye la principal mancha urbana en el país, presentando para el año 2000 una superficie de 61.935,8 hectáreas, una variación del 25,5% respecto al año 1990, en el cual Santiago contaba con 49.346,8 ha. de superficie urbana, siendo esta expansión desarrollada principalmente en las comunas de Quilicura, Puente Alto y Maipú (Ducci, 2002). De las 12.049,6 hectáreas de expansión, 4.918,6 hectáreas (40,8% del crecimiento total, Cuadro 3.1.1) están compuestas por usos residenciales, síntoma de la dispersión urbana derivada de las políticas, y la falta de éstas, en materia de planificación territorial. Por otra parte, la expansión del sector industrial (2.735 ha, 22,7% del total de la expansión) da cuenta del rol que cumple en la capital, pues para el año 2002, el sector secundario compone el 24,8% de la fuerza laboral regional, y aporta 18,4% del PIB regional (Alvear, 2003).

Cabe señalar que la superficie de uso agrícola señalada en el Cuadro 3.1.1 constituyen reductos agrícolas atrapados en los nuevos límites de la metrópolis, y que cuyo uso de suelo podría cambiar debido a la gran accesibilidad que poseen, entre otros factores (Ducci, 2002).

Esta expansión urbana se lleva a cabo a expensas de otros usos y coberturas de suelo. De acuerdo a CONAF-CONAMA (2003), la expansión urbana regional ha cobrado 14.838 ha. de terrenos de uso agrícola, y 3.167 ha. de praderas y matorrales entre los años 1995



y 2000. Ésta habría tenido su principal desarrollo en las provincias de Santiago (5.609 ha.), Chacabuco (4.356 ha.), Maipo (2.930 ha.) y Talagante (2.152 ha.), lo que denota las dinámicas de periurbanización, suburbanización y dispersión urbana que están tomando lugar en la Región (Armijo, 2000; De Mattos, 1999).

**Cuadro 3.1.1 Distribución del crecimiento de la superficie del Gran Santiago según usos de suelo. Periodo 1990-2000.**

Uso de Suelo	Superficie (hectáreas)	Porcentaje
Residencial	4.918,6	40,8
Industrial	2.735,0	22,7
Uso agrícola	1.622,7	13,5
Vialidad	1.578,4	13,1
Asentamiento conurbado	481,3	4,0
Sin uso (baldíos)	348,6	2,9
Equipamiento	291,6	2,4
Usos no identificados	47,2	0,4
Áreas verdes	26,6	0,2
Total	12.049,6	100,0 %

Fuente: Ducci, 2002.

En el caso de los suelos de uso agrícola, cinco de las seis provincias sufrieron una disminución notable de la superficie agrícola, siendo las provincias que mayores pérdidas sufrieron: Santiago (4.160 ha.), Chacabuco (2.769 ha.), Maipo (2.546 ha.), Talagante (1.467 ha.) y Cordillera (1.347 ha.) (CONAF-CONAMA, 2003). No obstante, también se observan procesos de conversión de praderas y matorrales a terrenos agrícolas, siendo la Provincia de Melipilla la principal protagonista (6.088 ha. de las 8.250 ha. de praderas y matorrales convertidas), lo que evidencia la influencia de las políticas silvoagropecuarias que tienen efecto en la Región. Estos cambios de uso de suelo se evidencian especialmente entre los años 1995-2000. Para el año 1995, la agricultura se extendía por 252.192 ha. de la Región, lo que correspondía a un 16,2% de la superficie regional. Para el año 2000, la Región experimentó una reducción neta del 2,4%, equivalentes a 6.202,2 ha. (CONAF-CONAMA, 2003).

Si bien la agricultura ha sufrido una disminución constante, este comportamiento no es simétrico entre los distintos tipos de agricultura. El Cuadro 3.1.2 muestra una aproximación a lo que sería la evolución de la superficie de usos de suelo agrícolas entre los años 1997 y 2004. Cabe señalar que cuando se habla de aproximación es porque las cifras oficiales varían según el organismo institucional que las calcula.

A partir del Cuadro 3.1.2, se puede señalar que los usos de suelo agrícola que más transformaciones han sufrido constituyen a los con uso industrial (-44,3%), las praderas naturales (49,4%) y los cultivos de cereales (-30%). Mientras que aquellos que se han expandido constituyen a las vides de producción vinífera y pisquera (22,6%), y a los cultivos de leguminosas y tubérculos (20,2%). Al clasificar cada tipo de agricultura según su ciclo de reproducción, podemos dividir las en dos grupos mayores: cultivos anuales y cultivos permanentes (Cuadro 3.1.3). Los cultivos anuales estarían conformados por

aquellos cultivos que germinan, florecen y sucumben en un año, mientras que los cultivos permanentes estarían conformados por aquellos cuyo ciclo vital posea una duración mayor a una temporada. Cabe señalar que de esta clasificación se excluyó a las praderas naturales, pues para efectos de la presente investigación, éstas constituyen ecosistemas naturales.

Los cultivos anuales sufrieron un retroceso de un 30%, entre los años 1997 y 2004, lo cual podría venir siendo explicado por dinámicas de expansión urbana, así como por procesos de conversión a cultivos permanentes que se han desarrollado en la Región. Por otra parte, los cultivos permanentes, dícese cultivos frutales, y vides, pasan por una expansión de un 5,7% respecto al año 1997. Esto podría ser explicado parcialmente por el carácter exportador de frutas y vinos que el país empieza a adquirir tras la implementación de la política de estado para la agricultura en el año 2000.

**Cuadro 3.1.2 Variación de superficie de usos de suelos (en hectáreas) agrícolas a nivel regional entre los años 1997 y 2004. Región Metropolitana de Santiago.**

Actividad agrícola	1997-1998	2003-2004	Variación
Cereales	28.465	21.890	-30%
Leguminosas y tubérculos	3.593	4500	20,2%
Industriales	1.140	790	-44,3%
Praderas mejoradas y artificiales	14.257,2	15.648,64 <sup>3</sup>	8,9%
Praderas naturales	269.567,1	180.430 <sup>4</sup>	-49,4%
Praderas sembradas permanentes y de rotación	24.078,30	16.678,20	-30,7%
Frutales	44.241	44.834 <sup>5</sup>	1,3%
Vides viníferas y pisqueras <sup>6</sup>	8.261	10.680	29,3%
Total	369.524	278.773	-32,6%

Fuente: Elaboración propia en base a CIREN-ODEPA (2004); INE, (1997); INE; (1998); INE, (2004a); INE, (2004b)

**Cuadro 3.1.3 Tipos de cultivo según su ciclo vital.**

Tipo de cultivo	Actividad agrícola	Superficie 2004	Variación 1997-2004
Cultivo anual	Cereales	27.180	-22,1%
	Leguminosas y tubérculos		
	Industriales		
Cultivo permanente	Frutales	55.514	5,7%
	Vides viníferas y pisqueras		

Fuente: Elaboración propia en base a CIREN-ODEPA (2004); INE, (1997); INE; (1998); INE, (2004a); INE, (2004b).

Otra influencia antrópica a considerar constituye la actividad silvícola. Para el año 1997, según el VI Censo Agropecuario, la superficie destinada a plantaciones forestales

<sup>3</sup> Estimación realizada a partir de una regresión lineal en base a INE (2007)

<sup>4</sup> Estimación realizada a partir de una regresión lineal en base a INE (2007)

<sup>5</sup> Obtenido a partir de CIREN-ODEPA (2004)

<sup>6</sup> No se consideran vides de consumo fresco.

constituían 13.139,50 ha. mientras que para el año 2004, ésta se redujo a 9.031,68<sup>7</sup> ha., lo que significa una pérdida de un 31,3%, por lo que su relevancia en el paisaje regional ha disminuido.

Como se verá más adelante en la metodología, los usos de suelo anteriormente descritos se espacializaron a partir de la carta de uso de suelos del Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (GORE RMS) para el año 2003, y se sintetizaron los usos de suelo de ésta en 5 usos de suelo: cultivos anuales, cultivos permanentes, silvicultura, superficies artificiales y áreas naturales. La espacialización de éstas en la Región y sus Provincias se puede observar en las Figura 3.1.1, Figura 3.1.2, Figura 3.1.3, Figura 3.1.4, Figura 3.1.5, Figura 3.1.6 y Figura 3.1.7.

Otro aspecto en el que el sistema antrópico influye en los paisajes socioecológicos de la Región Metropolitana de Santiago constituyen los instrumentos de planificación territorial desarrollados desde la panarquía institucional. Éstos influyen en las unidades administrativas, las cuales son el destino de las distintas políticas económicas, ambientales y sociales que se originan desde los múltiples niveles jerárquicos de la panarquía institucional, no obstante, éstos no se caracterizarán por escapar a la profundidad del estudio. Entre dichos instrumentos de planificación territorial se encuentran: Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT), Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS), y Plan Regulador Comunal (PRC). Además, de éstos, que regulan la actividad antrópica, también existen aquellos cuyo fin es proteger/conservar/recuperar zonas naturales: Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE), Zonas de Interés Turístico (ZOIT).

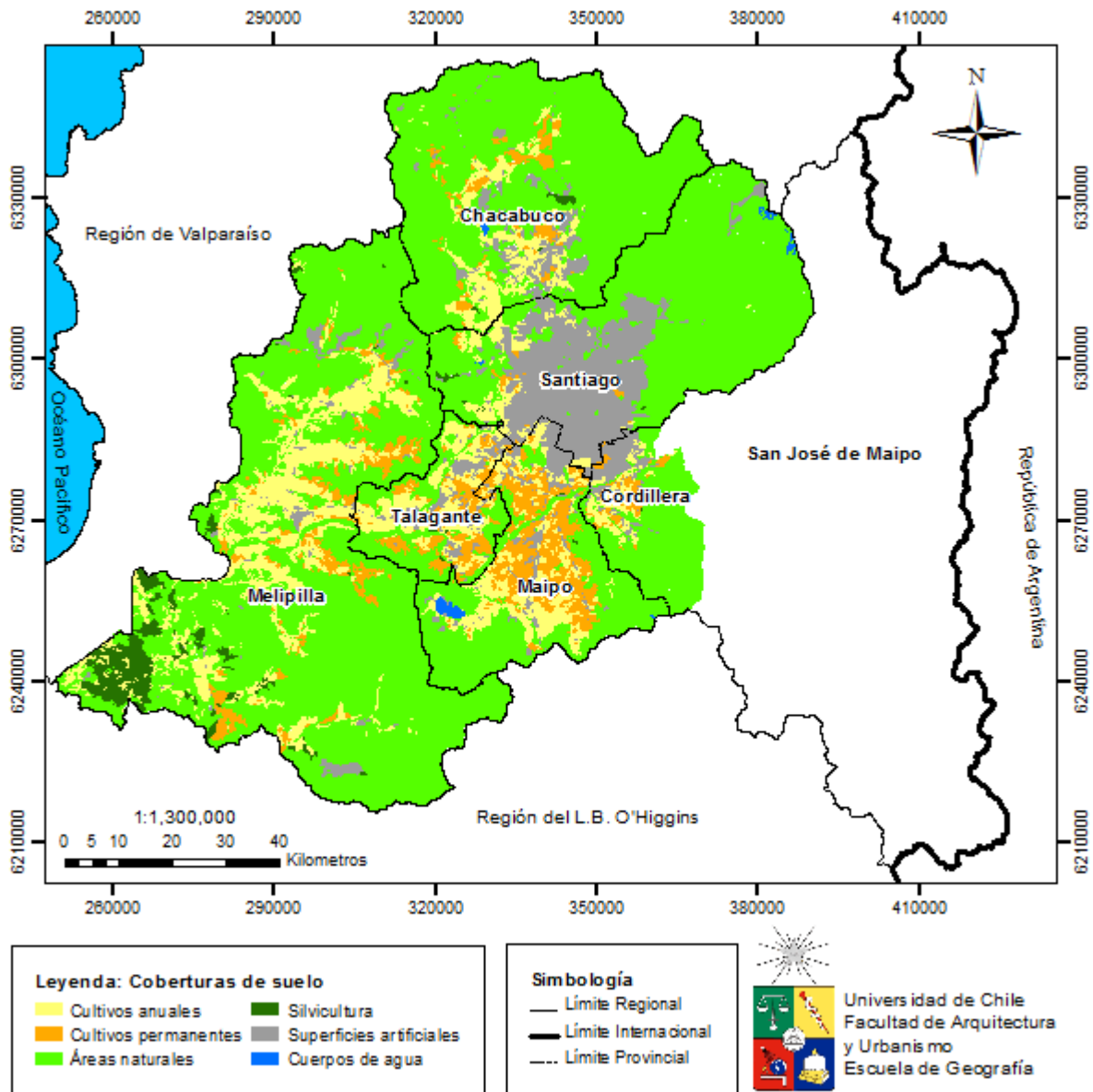
Otros instrumentos de planificación (no territorial) que influyen en los procesos socioecológicos de la Región Metropolitana constituyen: Plan Regional de Desarrollo Urbano (PRDU), Estrategia de Desarrollo Regional (EDR), Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO), Programa de Inversión Pública en Regiones (PROPIR), Comité interministerial para el Desarrollo de Zonas Extremas (CIDEZE), Programa de Infraestructura para el Desarrollo Territorial (PIRDT), Programa de Gestión Territorial, Estrategia para la Conservación de la Biodiversidad en la RMS, entre otros.

También cabe mencionar la cooperación público-privada para la creación de áreas para la conservación de la naturaleza (Sepulveda & Garcia, 1997). Éstos son abordados con mayor detalle y analizados en Bustos (1998), Iturriaga (2003), Boisier (1998), Armijo & Caviedes (1997), y Sabatini (2000)

---

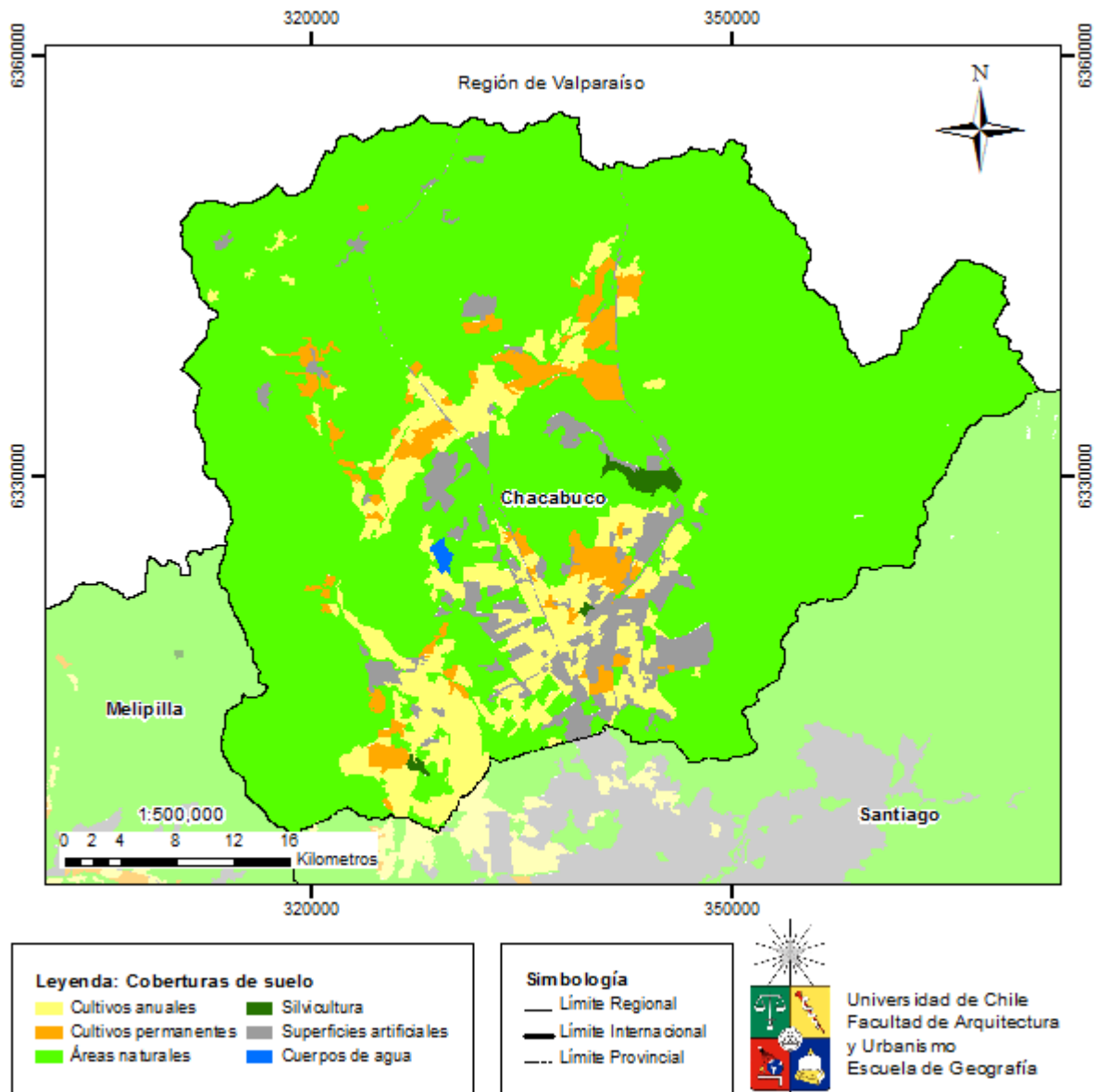
<sup>7</sup> Estimación realizada a partir de una regresión lineal en base a INE (2007)

Figura 3.1.1 Usos de suelo en la Región Metropolitana de Santiago para el año 2003.



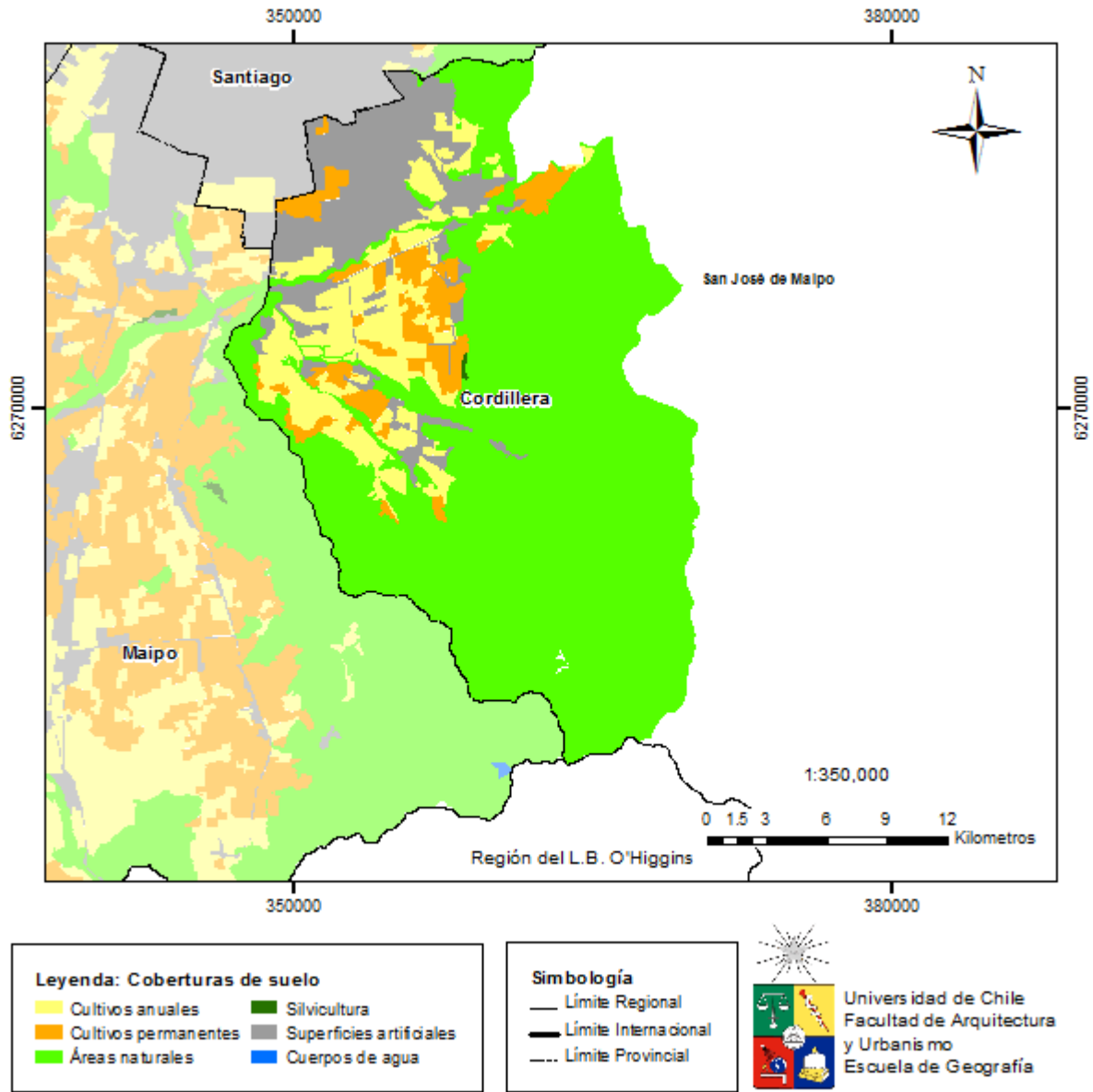
Fuente: Elaboración propia en base a GORE RMS (2003)

**Figura 3.1.2 Usos de suelo en la Provincia de Chacabuco. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003.**



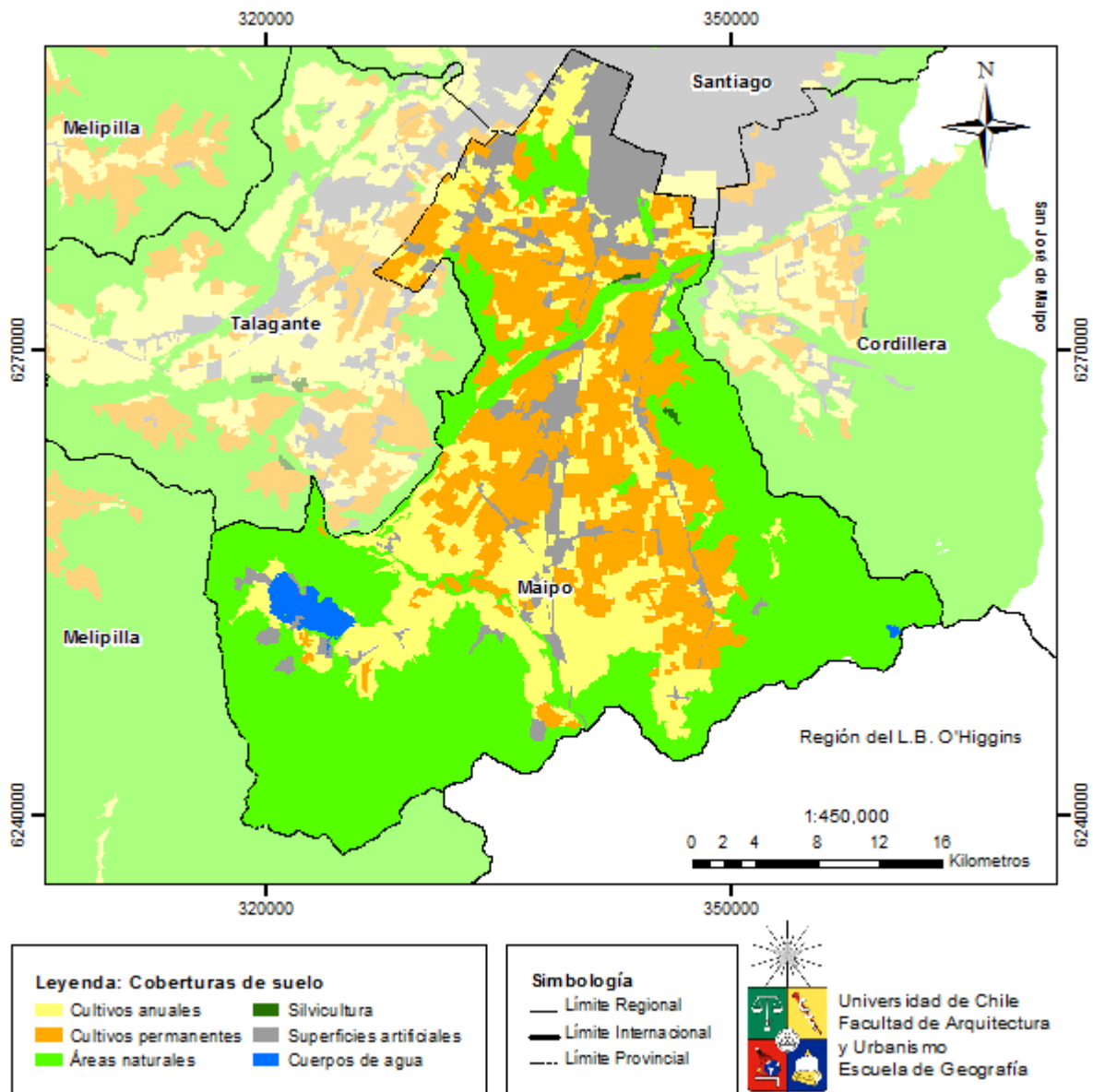
Fuente: Elaboración propia en base a GORE RMS (2003)

**Figura 3.1.3 Usos de suelo en la Provincia de Cordillera. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003.**



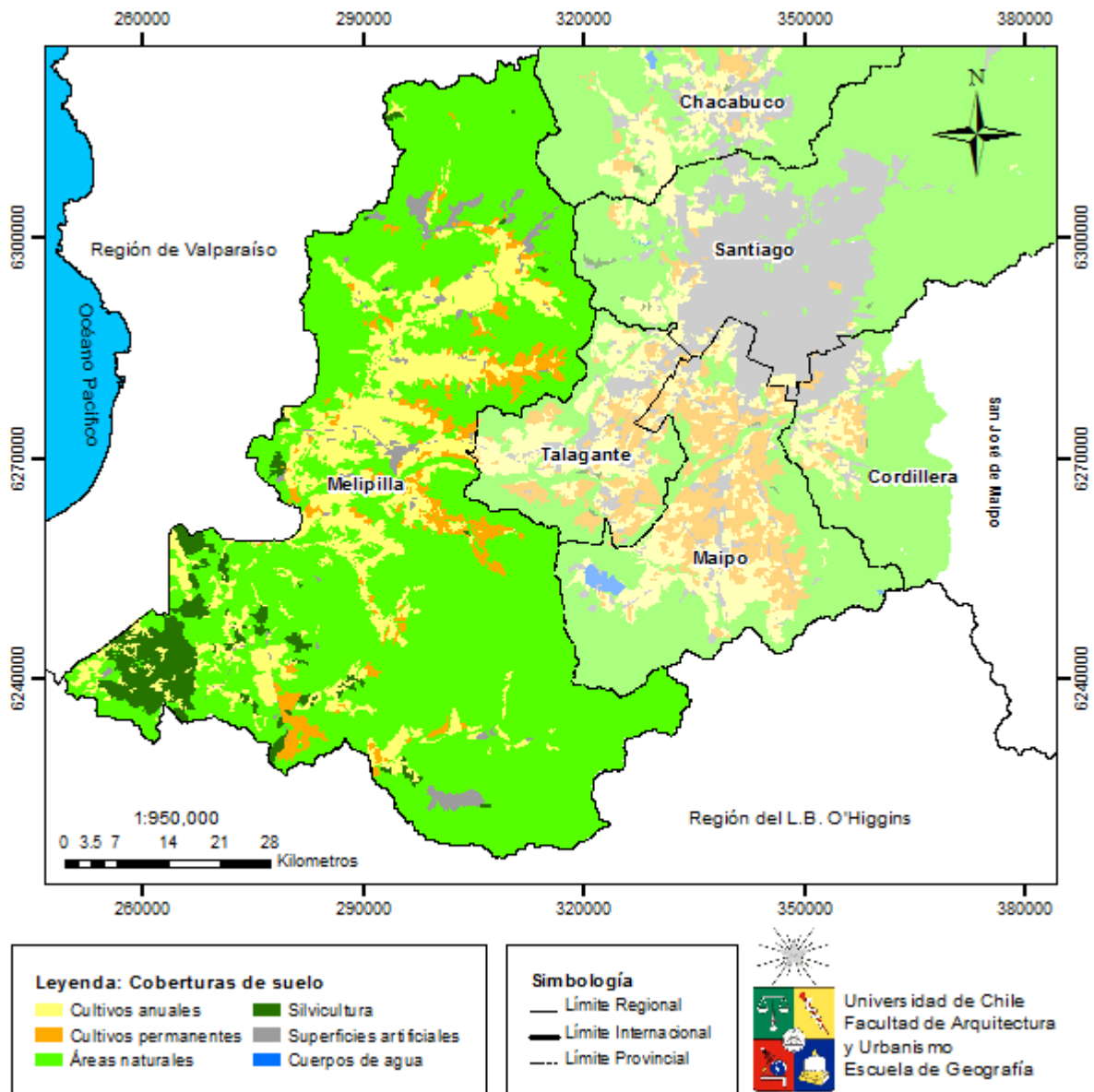
Fuente: Elaboración propia en base a GORE RMS (2003)

**Figura 3.1.4 Usos de suelo en la Provincia de Maipo. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003.**



Fuente: Elaboración propia en base a GORE RMS (2003)

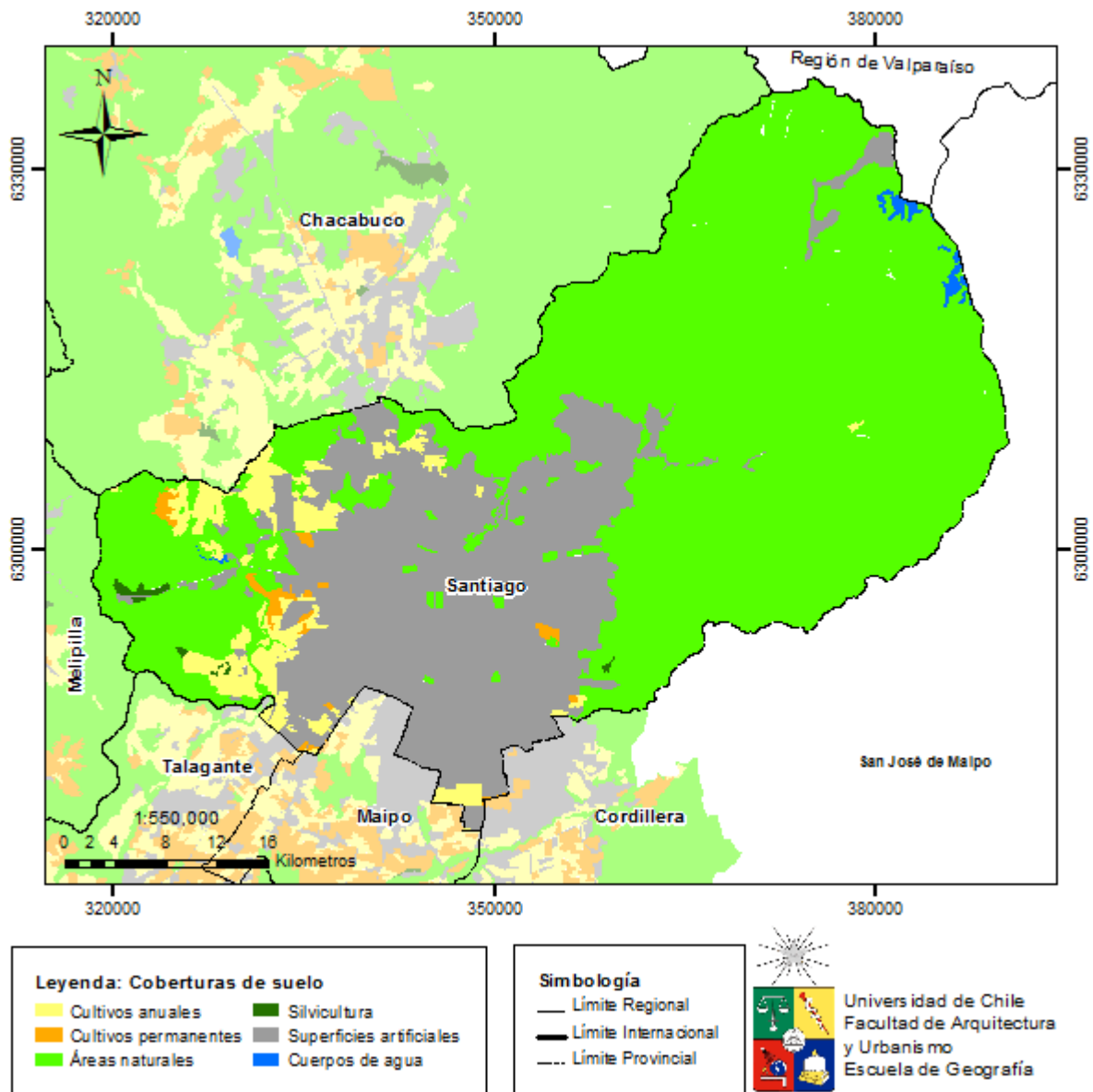
**Figura 3.1.5 Usos de suelo en la Provincia de Melipilla. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003.**



Fuente: Elaboración propia en base a GORE RMS (2003)

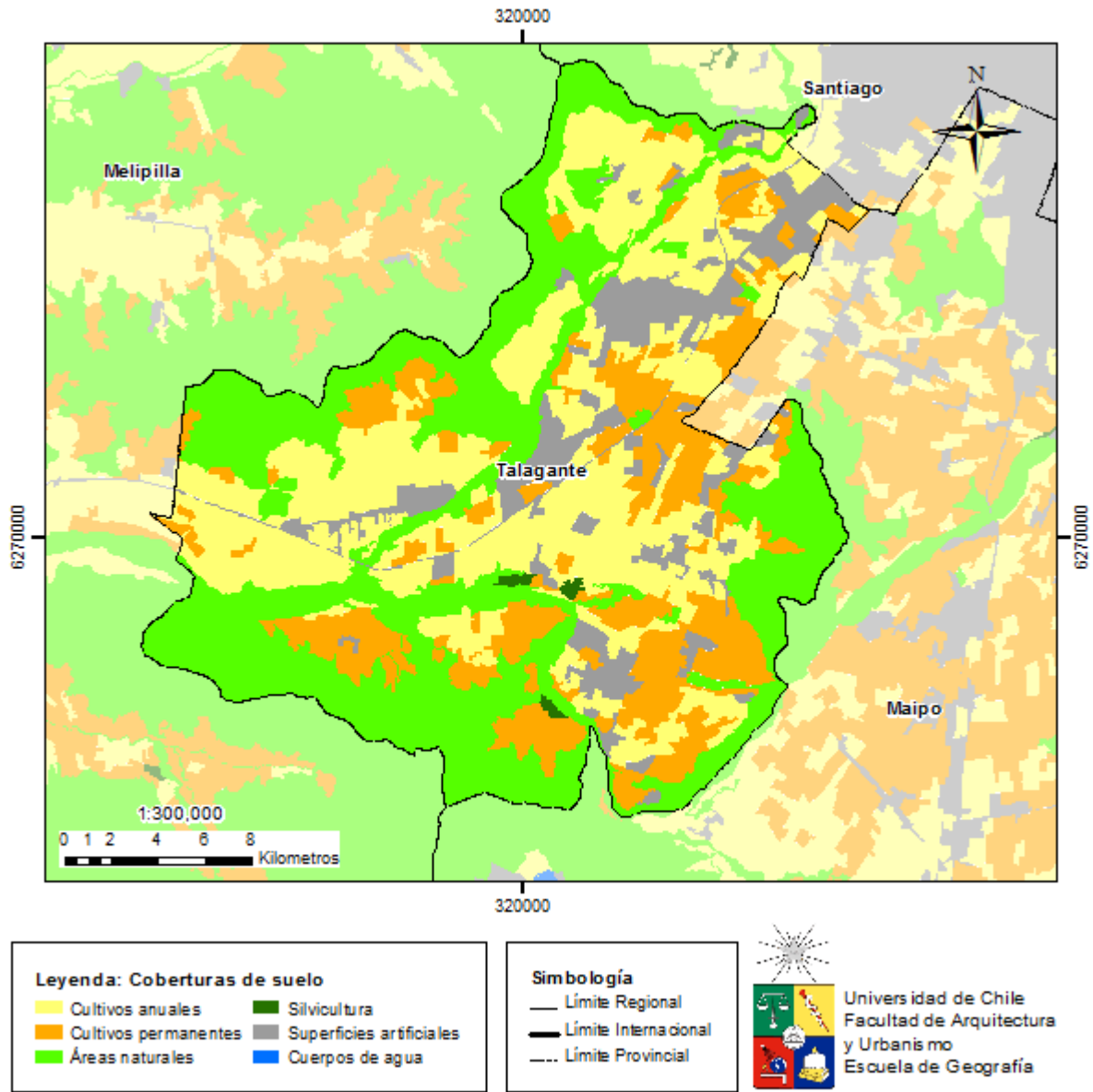


**Figura 3.1.6 Usos de suelo en la Provincia de Santiago. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003.**



Fuente: Elaboración propia en base a GORE RMS (2003)

**Figura 3.1.7 Usos de suelo en la Provincia de Talagante. Región Metropolitana de Santiago. Año 2003.**



Fuente: Elaboración propia en base a GORE RMS (2003)

### 3.2 Sistema Natural

En lo que respecta a clima, la Región Metropolitana de Santiago se ubica en la zona central de Chile, en la cual se encuentra el macrobioclima Mediterráneo, de acuerdo a la clasificación realizada por Luebert y Pliscoff (2006). Los bioclimas que se encuentran en la Región Metropolitana de Santiago se pueden observar en el Cuadro 3.2.1 (los detalles sobre cada Ombrotipo y Termotipo pueden observarse en Luebert y Pliscoff (2006).

Ésta se caracteriza por presentar una marcada estacionalidad, en la cual las precipitaciones se concentran durante el periodo invernal, alternado con un periodo de aridez en el verano (Luebert & Pliscoff, 2006). Otra de sus características también está dada por la variación interanual de sus precipitaciones (Luebert & Pliscoff, 2006). Estas variaciones interanuales se manifiestan en periodos más secos que otros, lo que tiene una fuerte influencia en la vegetación (Luebert & Pliscoff, 2006). Estos patrones de variación interanual están asociados con El Niño Oscilación Sur (ENSO), que en la fase cálida de su ciclo, la precipitación invernal tiende a ser mayor de lo normal en las zonas subtropicales de Sudamérica (Luebert & Pliscoff, 2006).

**Cuadro 3.2.1 Bioclimas, Ombrotipos y Termotipos de la Región Metropolitana de Santiago.**

Bioclima	Ombrotipos	Termotipos
Mediterráneo Pluviestacional	Seco Sub-húmedo Húmedo	Termomediterráneo Mesomediterráneo Supramediterráneo Oromediterráneo
Mediterráneo Xérico-océanico	Semi-árido	Criomediterráneo

Fuente: Elaboración propia en base a Luebert & Pliscoff, 2006.

Las principales formaciones vegetacionales presentes en la Región Metropolitana de Santiago, de acuerdo a Luebert y Pliscoff (2006) constituyen 5: bosque cerrado, bosque abierto, matorral, matorral bajo, y vegetación herbácea terrestre. Estos a su vez, se dividen en ocho pisos vegetacionales:

- Matorral Espinoso Mediterráneo Interior de *Puya coerulea* y *Colliguaja odorifera*
- Bosque Espinoso Mediterráneo Interior de *Acacia caven* y *Prosopis chilensis*
- Bosque esclerófilo Andino de *Kageneckia angustifolia* y *Guindilia trinervis*
- Bosque esclerófilo Andino de *Quillaja saponaria* y *Lithrea caustica*
- Matorral bajo mediterráneo costero de *Chuquiraga oppositifolia* y *Mulinum spinosum*
- Matorral bajo mediterráneo andino de *Chuquiraga oppositifolia* y *Nardophyllum lanatum*
- Matorral bajo mediterráneo andino de *Laretia acaulis* y *Berberis empetrifolia*

- Herbazal Mediterráneo andino de *Nastanthus sathulatus* y *Menonvillea sathulata*

De toda la superficie que estos pisos vegetacionales ocupan, de acuerdo a Luebert y Pliscoff (2006), solo el 2,1% se encuentra protegido por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE) (Cuadro 3.2.2), por lo que es de esperar que los proveedores de servicios ecosistémicos asociados a las áreas naturales colindantes a las actividades antrópicas sean poco resilientes frente a los procesos de cambio y expansión de éstas.

**Cuadro 3.2.2 Superficie total, remanente y protegida de los pisos de vegetación con presencia en la Región Metropolitana de Santiago<sup>8</sup>.**

Piso de Vegetación	Superficie total (km <sup>2</sup> )	Superficie de reemplazo (km <sup>2</sup> )	Superficie remanente (km <sup>2</sup> )	Superficie remanente (%)	Superficie protegida (%)
Matorral Espinoso Mediterráneo Interior de <i>Puya coerulea</i> y <i>Colliguaja odorífera</i>	526	1	524	99,8	0,0
Bosque Espinoso Mediterráneo Interior de <i>Acacia caven</i> y <i>Prosopis chilensis</i>	3.425	2.110	1.316	38,4	0,0
Bosque esclerófilo Andino de <i>Kageneckia angustifolia</i> y <i>Guindilia trinervis</i>	3.826	44	3.782	99,9	4,0
Bosque esclerófilo Andino de <i>Quillaja saponaria</i> y <i>Lithrea caustica</i>	3.210	1.551	1.659	51,7	0,7
Matorral bajo mediterráneo costero de <i>Chuquiraga oppositifolia</i> y <i>Mulinum spinosum</i>	45	0	45	100	0
Matorral bajo mediterráneo andino de <i>Chuquiraga oppositifolia</i> y <i>Nardophyllum lanatum</i>	3.694	10	3.684	99,7	2,4
Matorral bajo mediterráneo andino de <i>Laretia acaulis</i> y <i>Berberis empetrifolia</i>	9.156	14	9.143	99,9	1,7
Herbazal Mediterráneo andino de <i>Nastanthus spathulatus</i> y <i>Menonvillea spathulata</i>	4.485	3	4.482	99,9	2,3
<b>Total</b>	<b>28.367</b>	<b>3.733</b>	<b>24.634</b>	<b>86,8</b>	<b>2,1</b>

Fuente: Elaboración propia en base a Luebert & Pliscoff, 2006.

<sup>8</sup> Los valores presentados constituyen a los cálculos realizados a nivel país por Luebert y Pliscoff (2006) y no a los de la Región Metropolitana de Santiago.

## **Capítulo 4: Marco metodológico**

### **4.1 Carácter del estudio**

Si bien existe gran abundancia de literatura tratando el estudio de los sistemas socioecológicos en casos de estudios de diversa índole, hay escasa diversidad de estudios geográficos latinoamericanos relacionados a éste. La presente memoria de título constituye una investigación de carácter analítico y exploratorio, en la cual, al abordar la relación entre el crecimiento urbano, la expansión del uso de suelo destinado a actividades agrícolas, y los ecosistemas naturales de la Región Metropolitana de Santiago y su relación con las perturbaciones vegetacionales asociadas a los ESPs a niveles multiescalares, se aplican los postulados ofrecidos por el corpus teórico de los sistemas socioecológicos, y se ponen a prueba en función de herramientas y métodos propios de la geografía, tales como el análisis de información espacial a través de sistemas de información geográfica, y de la ecología del paisaje, tales como el análisis parches y paisajes, basándose en el trabajo de Zaccarelli et al. (2008), y Petrosillo et al. (2010).

### **4.2 Selección de área de estudio**

Para la presente memoria de título se define como área de estudio la Región Metropolitana de Santiago en dos niveles panárquicos de jerarquía político-administrativa: Región, y Provincia. El motivo para analizar los niveles político-administrativos reside en la influencia que tienen los sistemas antrópicos sobre los paisajes socioecológicos. Como unidades administrativas, son el destino de las distintas políticas económicas, ambientales y sociales que se originan desde los múltiples niveles jerárquicos de la panarquía institucional. Por ello, el uso de unidades político-administrativas permite observar y cuantificar con mayor facilidad el impacto de los sistemas antrópicos sobre los paisajes socioecológicos.

Cabe señalar que la comuna de San José de Maipo fue omitida de este estudio ya que el cálculo de índices vegetacionales como el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI por sus siglas en inglés) se ve fuertemente dificultado por los bajos niveles de iluminación en sus valles, producto de la compleja topografía de la comuna. Por lo demás, al ser una comuna cuya agricultura y asentamientos humanos representan una pequeña proporción de la superficie total de la comuna, no se le consideró de interés para el estudio. Otra razón para omitirla del análisis consistió en la dificultad de encontrar imágenes satelitales que posean óptimas condiciones atmosféricas y radiométricas para completar el mosaico que abarca la comuna.

Debido a estas razones, los subpaisajes socioecológicos que se analizarán dentro de la Región Metropolitana de Santiago constituyen a las Provincias de Chacabuco, Maipo, Melipilla, Santiago, y Talagante.

### 4.3 Selección del periodo de estudio

Dado que el estudio se centra principalmente en los proveedores de servicios ecosistémicos (ESPs), asociados a las coberturas vegetacionales, y que los cambios en éstos se ven a través de los cambios vegetacionales de origen antrópico, se hace necesario considerar las influencias multiescalares a nivel global, regional y local (Cumming, 2011). Para estos efectos, se consideró a nivel global la influencia del fenómeno de El Niño, a nivel regional el estado del ciclo fenológico de la vegetación, y a nivel local el promedio anual de precipitación. La idea detrás de esto subyace en reducir las influencias físico-naturales externas que puedan alterar los índices vegetacionales, y la clasificación de perturbaciones antrópicas, provocando discrepancias interanuales las cuales podrían llevar a resultados distorsionados y a conclusiones erróneas.

De esta manera, como periodo de estudio se eligieron dos años que cumplieren con los siguientes requisitos:

- Nivel global: El año anterior a la fecha a elegir debió ser uno en el cual los efectos de El Niño no hayan provocado valores que en su mayoría excedan el rango de -0,5 y 0,5 en el ONI (Índice Oceánico de El Niño, por sus siglas en inglés);
- Nivel regional: Las fechas de las imágenes satelitales deben coincidir en su fase del ciclo fenológico, es decir, deben ser del mismo mes;
- Nivel local: El año anterior a las fechas a elegir deben registrar promedios anuales de precipitación similares. Esto, bajo la suposición de que la vegetación de la zona central de Chile depende en cierto grado de las precipitaciones recibidas durante el periodo invernal dada la escasez de precipitaciones en el periodo estival (Luebert y Pliscoff, 2006).
- Escala de tiempo: La escala de tiempo debe ser media/pequeña (menor a 10 años de diferencia) para aumentar la probabilidad de captar exclusivamente cambios de origen antrópico.
- Aspectos técnicos a): La fecha tardía debe coincidir en +/-1 año con alguna de las cartas de uso de suelos del Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (2003 y 2012).
- Aspectos técnicos b): Las imágenes deben estar, en su mayoría, libres de nubes en el área de estudio y pixeles defectuosos, y los pares (row 83-84) debieron ser tomadas el mismo día.

Los valores del ONI se obtuvieron en la página web del Centro de Predicción Climática del NOAA, mientras que los registros de precipitación se obtuvieron por medio de la Dirección General de Aguas (DGA, Información pública, 2014).

El proceso que se ideó para definir el periodo de estudio es detallado a continuación:

- Primero se definieron los años que cumplen con el requisito a nivel global, escala de tiempo y aspectos técnicos a).

- Luego, de los años restantes, en el aspecto local, se eligen los más parecidos en términos de precipitaciones.
- Finalmente, de los años que quedan, se definieron los años que cumplen con los requisitos a nivel regional y con los aspectos técnicos b).

A partir éste criterio, se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) Para la escala local, en lo que respecta a precipitaciones, entre los años anteriores a 1994, 2002, y 2004 (Cuadro 4.3.1), se encontraron tres pares de años con precipitaciones similares: 1993-2001, con una diferencia de 7.85 mm; 1993-2003, con y 1996-2003. Por lo tanto, se obtienen 3 pares candidatos como periodo de estudio: 1994-2004; 1994-2002; y 1996-2004.
- b) Para la escala global, en consideración del Índice Oceánico del Niño (ONI), la escala de tiempo media/pequeña (menor a 10 años), y los aspectos técnicos a) (fecha tardía debe ser +/-1 año de diferencia con alguna de las caras de uso de suelo del GORE RMS) los años elegibles, para fecha temprana serían 1994, 1997, y para fecha tardía serían 2002 y 2004 (Cuadro 4.3.2).
- c) Finalmente, para la escala regional, y considerando los requisitos de escala regional y aspectos técnicos b), se encontró que sólo el par 1997-2004, en el mes de Enero, cumple con los requisitos. Para los otros pares no se encontraron pares (row 83-84) de imágenes LANDSAT que estuviesen libres de nubes y líneas de pixeles perdidos, que las imágenes de una misma fecha fuesen tomadas en el mismo día, y que además, las imágenes correspondientes al par fuesen del mismo mes.

Tomando en consideración lo anterior, se determinó que el periodo de estudio de la presente investigación corresponderá al mes de Enero para el periodo entre 1997-2004.

#### **Cuadro 4.3.1 Promedio anual de precipitaciones para los años para elegir periodo de estudio.**

Año	Promedio anual de precipitaciones (mm)
1993	32,12
1996	15,93
2001	39,97
2003	25,18

Fuente: Elaboración propia en base a los registros de precipitación de la Dirección General de Aguas para los años 1992-2012



**Cuadro 4.3.2 Valores del Índice Oceánico del Niño (ONI) para el periodo 1992-2012.**

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1	0.7	0.3	0	-0.2	-0.3	-0.2	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	1	1.2
1995	1	0.8	0.6	0.3	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3
1998	2.2	1.8	1.4	0.9	0.4	-0.2	-0.7	-1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5
1999	-1.5	-1.3	-1	-0.9	-0.9	-1	-1	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.5	-1.2	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
2002	-0.2	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3
2003	1.1	0.8	0.4	0	-0.2	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0	-0.2	-0.5	-0.8
2006	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1	1
2007	0.7	0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-1.4
2008	-1.5	-1.5	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.5	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6
2010	1.6	1.3	1	0.6	0.1	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.6	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1
2012	-0.9	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	0	0.1	0.4	0.5	0.6	0.2	0

Fuente: Elaboración propia en base a Climate Prediction Center. NOAA (documento en línea)

#### 4.4 Métodos y Materiales

Para el desarrollo de los objetivos de la presente investigación, se utilizaron cuatro imágenes satelitales ortorectificadas por la USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos, por sus siglas en inglés), cuyo detalle se puede observar en la Cuadro 4.4.1 y en la Figura 4.4.2.

**Cuadro 4.4.1 Imágenes satelitales utilizadas en la presente memoria de título.**

Sensor	Fecha	Path/Row	Resolución espacial	RMS (pixeles)
LANDSAT 5 TM	26/01/1997	233/83		0.191
LANDSAT 5 TM	26/01/1997	233/84	30m/pixel bandas 1-7.	0.181
LANDSAT 5 TM	30/01/2004	233/83	120 m/pixel banda 6.	0.156
LANDSAT 5 TM	30/01/2004	233/84		0.169

Fuente: Elaboración propia en base a metadata de imágenes Landsat 5.

Para el procesamiento y análisis de la información satelital se utilizaron los programas de SIG, ArcGIS 10, Idrisi Selva, y el software de lenguaje estadístico "R". Para el análisis de patrones de perturbación se utilizó el software SAGA GIS. Además, en el uso de imágenes y polígonos, se trabajó utilizando el datum geodésico WGS84.

La secuencia de pasos en las que se desarrolla la presente memoria de título se encuentra la Figura 4.4.1.

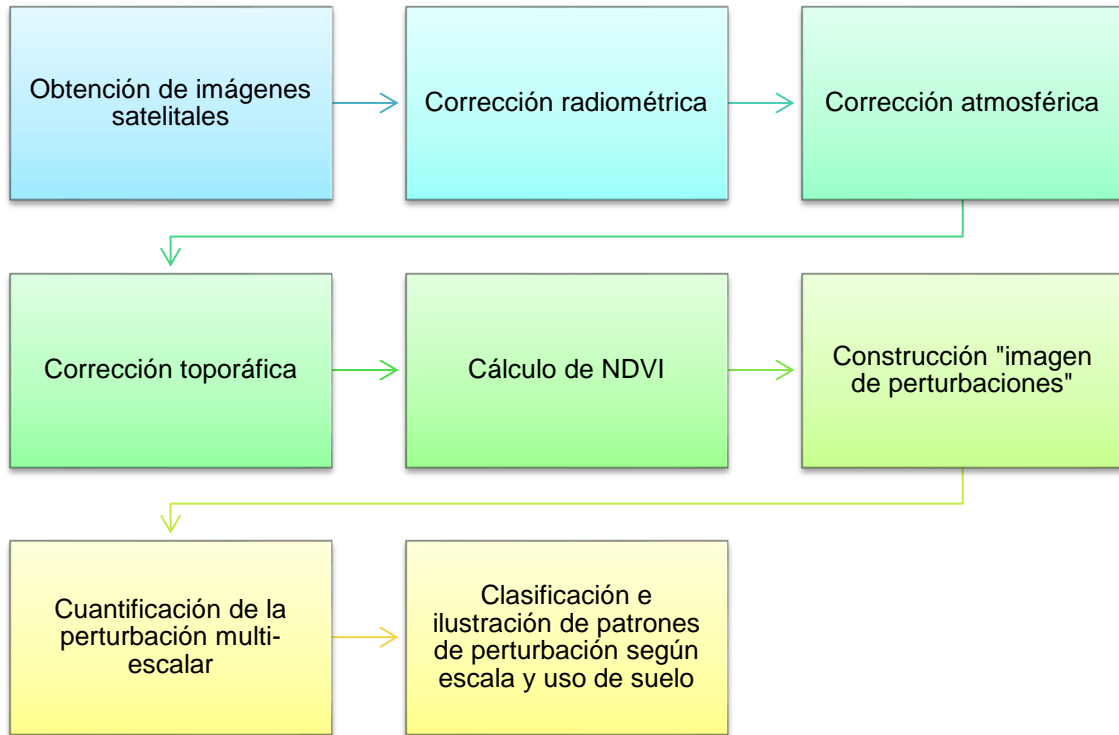
##### 4.4.1 Corrección radiométrica (pixeles perdidos)

Al tratarse de imágenes sin procesar, éstas usualmente presentan vacíos de información en determinados pixeles, producto de las condiciones del satélite al momento de tomar la imagen, los cuales pueden presentar valores extremadamente altos o bajos. Si bien no se puede obtener información donde no la hay, sí se puede estimar a partir de algoritmos que permiten cubrir dicha falta de información.

Para corregir las anomalías dichas anteriormente, se procedió a utilizar el módulo *FILTER* del software Idrisi. El filtro usado consistió en un *median 3x3*. Los valores de las bandas quedaron en números reales, lo cual incrementa el tamaño del archivo a trabajar. Por ello, mediante el módulo *CONVERT* se convirtieron a Byte/Integer.

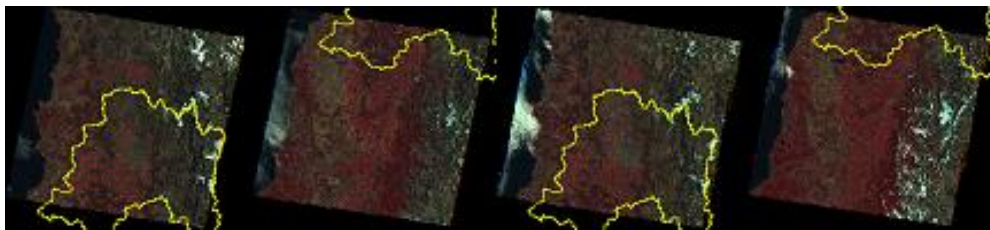
Las imágenes también suelen presentar bandeados (o *stripes*) producto de desperfectos en el sensor a la hora de tomar la imagen. Para detectar la presencia de estas anomalías se utilizó el módulo de análisis *PCA* (*Principal Components Analysis* por sus siglas en inglés) de Idrisi. A partir de las 7 bandas de cada imagen se obtuvieron 7 componentes. Ninguno mostró signos de bandeo significativo.

**Figura 4.4.1 Pasos a seguir en la presente memoria de título.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.4.2 Imágenes satelitales utilizadas. De izquierda a derecha: año 1997, row 83, 84 y año 2004, row 83 y 84. Bandas 4, 3, 2. Ningún método de estiramiento aplicado.**



Fuente: Elaboración propia, en base a imágenes Landsat 5.

#### 4.4.2 Corrección atmosférica

Al tratar con imágenes satelitales sin procesar, es necesario hacerles una corrección atmosférica, puesto que la reflectividad de los objetos registrada por el sensor remoto es afectada generalmente por condiciones tales como la dispersión y absorción atmosférica, la geometría de la iluminación entre el sensor y el objeto, y la calibración del sensor (Teillet, 1986). Lo anterior normalmente resulta en una distorsión de la reflectividad real de los objetos, lo que en consecuencia afecta la extracción de información de las imágenes (Mahiny & Turner, 2007). Song et al. (2001) señalan que las correcciones atmosféricas

son necesarias para la reclasificación de la vegetación, pues la distorsión que producen los gases de la atmosfera puede dar aumentos de hasta el 50% en el NDVI de coberturas vegetacionales dispersas.

Si bien existen múltiples metodologías para la corrección atmosférica, cada una con sus ventajas y desventajas, la decisión sobre qué método usar depende de los objetivos que se pretenden abordar. El método COST, desarrollado por Chavez (1996) a partir del método DOS (*Dark Object Substraction*) (Chavez, 1988) es entre los más populares debido a su relación costo/beneficio (Mahiny & Turner, 2007). La ventaja que ofrece el método COST por sobre otras metodologías radica en que requiere sólo información relativa al sensor, a diferencia de otros métodos como el 6s que requieren información física *in situ* (Mausel, Brondizio & Moran, 2001). Si bien Wu, Wang y Bauer (2005) encontraron que el método COST presenta buenos resultados para el espectro visible (bandas 1-3), es menos preciso para las bandas del infrarrojo. Producto de lo anterior el método COST no será utilizado para la presente memoria de título puesto que el cálculo del NDVI requiere el uso de la banda infrarroja cercana (banda 4).

Otra metodología para realizar una corrección atmosférica corresponde a la desarrollada por Song et al. (2001) a partir del método DOS (Chavez, 1988), la cual se denomina DOS4 y ofrece resultados más precisos que el método COST a la hora de determinar la reflectancia de la vegetación (Song, y Guan, 2008).

El método de DOS4 fue desarrollado para incorporar el efecto de los aerosoles atmosféricos en la corrección atmosférica (Song et al. 2001, citado en Goslee, 2011). Para entender el método DOS4 es necesario entender la relación entre la radiancia a nivel satelital y la reflectancia de la superficie. Kaufman y Sendra (1988) definen esta relación entre una superficie lambertiana (que refleja la misma cantidad de luz independiente del ángulo de visión) y una atmosfera libre de nubes como la siguiente ecuación:

$$L_{sat} = L_p + \frac{\rho F_d T_v}{\pi(1-s\rho)}$$

Ecuación 4.1 Fuente: Song et al. (2001)

Donde  $L_{sat}$  es la radiancia a nivel satelital,  $L_p$  corresponde a la dispersión (*haze*, o neblina),  $F_d$  es la irradiancia recibida en la superficie,  $T_v$  es la transmitancia atmosférica desde un objeto hacia el sensor,  $s$  es la fracción de la "*upper radiation back-scattered*" desde la atmosfera hacia la superficie, y  $p$  es la reflectancia en la superficie.

Por otra parte, la irradiancia recibida a la superficie de la tierra, expresada como " $F_d = E_b + E_{down}$ ", donde  $E_{down}$  es la "*downwelling diffuse irradiance*" y  $E_b$  es la irradiancia del rayo, " $E_b = E_0 \cos(\theta_z) T_z$ ", donde  $E_0$  es la constante solar exoatmosférica,  $T_z$  la transmitancia atmosférica en la dirección de la iluminación, y  $\theta_z$  el ángulo cenit solar. Dado que  $s$  es pequeña en la Eq 4.1, puede ser obviada, por lo que al resolver  $p$  en la Eq1 se tiene:

$$\rho = \frac{\pi(L_{sat} - L_p)}{T_v(E_0 \cos(\theta_z)T_z + E_{down})}$$

Ecuación 4.2 Fuente: Song et al. (2001)

Dado los efectos de dispersión atmosférica, los objetos oscuros no tienden a ser absolutamente oscuros (Chavez, 1988). Asumiendo que un 1% de la reflectancia de la superficie constituye a objetos oscuros (Chavez, 1989, 1996), se tiene que el “haze” se puede estimar como:

$$L_p = G \cdot DN_{min} + B - 0.01[E_0 \cos(\theta_0)T_z + E_{down}]T_v/\pi$$

Ecuación 4.3 Fuente: Song et al. (2001)

Donde G es el “gain” del sensor y B es el “bias”, ambos encontrados en la metadata de las imágenes, y ambos usados para convertir los DN a la radiancia capturada por el satélite. Song, et al (2001) proponen que el valor de DN<sub>min</sub> sea obtenido como el DN más oscuro en al menos 1000 pixeles dentro de la imagen.

A partir de esto, Song et al. (2001) señalan que el método DOS4 se diferencia del método DOS tradicional en que el primero intenta incluir los efectos de los aerosoles atmosféricos en T<sub>v</sub> y T<sub>z</sub>. En este método se asume que la radiancia del cielo es isotrópica (Moran et al., 1992). Con esta asunción, el valor de 4πL<sub>p</sub> estima la cantidad de irradiancia exoatmosférica perdida. A partir de esto, la densidad óptica de la atmósfera puede ser estimada como:

$$T_z = e^{-\tau/\cos(\theta_z)} = 1 - \frac{4\pi L_p}{E_0 \cos(\theta_z)}$$

Ecuación 4.4 Fuente: Song et al. (2001)

Donde ambos lados de la Ecuación 4.4 estiman la transmitancia atmosférica en la dirección de la iluminación. Al resolver τ y sustituirlo con la Ecuación 4.3 lleva a:

$$\tau = -\cos(\theta_z) \cdot \ln \left( 1 - \frac{4\pi[G \cdot DN_{min} + B - 0.01(E_0 \cos(\theta_z)T_z + E_{down})T_v/\pi]}{E_0 \cos(\theta_z)} \right)$$

Ecuación 4.5 Fuente: Song et al. (2001)

Donde E<sub>down</sub> es estimado por πL<sub>p</sub>, pero T<sub>v</sub> y T<sub>z</sub> son desconocidos antes de que τ sea estimado. Song, et al (2001) definen T<sub>v</sub> = T<sub>z</sub> = 1.0, y a partir de esto realizan múltiples iteraciones hasta que τ sea estabilizado, lo que usualmente toma 4-5 iteraciones (Song, et al, 2001).

Para aplicar el método descrito para corregir atmosféricamente las imágenes se utilizó el software de lenguaje estadístico R, con el package Landsat, desarrollado por Goslee (2011), el cual permite aplicar el método anterior de manera rápida y eficiente.

En su aplicación, se utilizó la siguiente línea de comandos, ejemplificada con la Banda 1 de la imagen del año 2004 correspondiente al path 233 y row 83:

```
R> library(landsat)
#Cargar archivos
R> b1_2004<-readGDAL("F:/Memoria/Imágenes/2006/Pre-AC/Pre-AC-top-B1_2004.tif")
#Dark Object Substraction (DOS)
R> SHV <- table(b1_2004@data[, 1])
R> SHV <- min(as.numeric(names(SHV)[SHV > 10000]))
R> DOS.2004 <- DOS(sat = 5, SHV = SHV, SHV.band = 1, Grescale = 0.766, Brescale
+ = -2.286, sunelev = 50.27511939, edist = ESDist("2004-01-30"))$DNfinal.mean
R> DOS.2004
#si SHV<55 -> coef-4
R> DOS.2004 <- DOS.2004[, 1]
#Modified Dark Object Substraction (DOS4)
R> b1.2004.DOS4refl <- radiocorr(b1_2004, Grescale = 0.766, Brescale = -2.286,
sunelev = 50.27511939, edist = ESDist("2004-01-30"), Esun = 1983, Lhaze = ,
+ DOS.2004[1], method = "DOS4")
#Exportar a Tiff
R> writeGDAL(b1.2004.DOS4refl, "F:/Tesis/Imágenes/2004/AC/AC-top-B1_2004.tif",
drivername = "GTiff", type = "Float32")
```

#### 4.4.3 Corrección topográfica

Debido a la compleja topografía de la Cordillera de Los Andes, que posee ángulos de iluminación reducidos en algunas zonas de ésta, se decidió hacer una corrección topográfica, ya que la razón entre las bandas producida por el NDVI no pudo corregir estos errores satisfactoriamente.

Si bien existen múltiples metodologías para realizar una corrección topográfica, es ampliamente aceptado en la literatura el uso de métodos no-lambertianos puesto que estos desempeñan mejores resultados que sus pares lambertianos (Riaño et al., 2003, citado en Goslee, 2011). Entre los métodos no-lambertianos que destacan se tiene al método de corrección C, o la corrección topográfica de Minnaerth, con sus variaciones (ver literatura citada). No obstante, para la presente investigación se utilizó el método no-lambertiano de modelado de la iluminación, presentado en el manual de Idrisi (Eastman, 2009).

El modelo en cuestión, que se puede observar de manera detallada en el manual de Idrisi, utiliza un modelo digital de elevación para crear una representación de las condiciones de iluminación al momento en que fue tomada la imagen (*Hillshade*). Luego, a partir de las ecuaciones de regresión de las bandas que se desean corregir, el *hillshade* es calibrado según la pendiente y la intercepción de estas ecuaciones. Finalmente, estos productos se substraen de las bandas, y se les añade el promedio de cada banda. El resultado es un estimado de cómo se vería la superficie si esta fuese plana (Eastman, 2009)

Los ángulos de iluminación que se utilizaron para crear el *Hillshade* se pueden encontrar en la Cuadro 4.4.2.

#### **Cuadro 4.4.2 Ángulos de azimuth y elevación de las imágenes utilizadas.**

Sensor	Fecha	Path/Row	Elevación Solar	Azimuth
LANDSAT 5 TM	26/01/1997	233/83	47,80005903°	81,17074195°
LANDSAT 5 TM	26/01/1997	233/84	47,31679546°	79,84150168°
LANDSAT 5 TM	30/01/2004	233/83	50,27511939°	77,44436778°
LANDSAT 5 TM	30/01/2004	233/84	49,70346794°	76,01652999°

Fuente: Elaboración propia en base a metadata de imágenes Landsat 5.

#### **4.4.4 Cálculo del Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI):**

Se utilizó el Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) ya que éste ha sido validado como un robusto indicador de la fotosíntesis de la vegetación, poseer sólidas relaciones para con los procesos socioecológicos como conversiones de hábitat, o rotación de cultivos, y también estar relacionado a varios indicadores y características de la vegetación (Young & Harris, 2005). Este índice se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Banda Infrarroja} - \text{Banda Roja}}{\text{Banda Infrarroja} + \text{Banda Roja}}$$

Ecuación 4.6 Fuente: Eastman, 2012.

Para el cálculo del NDVI se utilizó un mosaico de las imágenes ya corregidas en el software ArcGIS 10, obteniendo de este modo dos imágenes únicas para el año 2001 y 2006, con sus respectivas imágenes de NDVI, las cuales se calcularon utilizando la aplicación *VEGINDEX* de Idrisi.

Posteriormente, mediante la aplicación *IMAGEDIFF* se obtiene una imagen de diferenciación estandarizada entre las dos fechas. Se utilizó una máscara conteniendo el área de estudio y los cuerpos de agua para que el producto final no incluyera cuerpos de agua ni zonas ajenas al área de estudio.

#### **4.4.5 Construcción “mapa de perturbaciones”**

Como se definió en el marco teórico, una perturbación es un evento discreto tanto en el tiempo como el espacio que, a través de cambios en la cobertura vegetal, cataliza cambios en los ciclos adaptativos de los sistemas ecológicos, sociales o socioecológicos expresados en coberturas y usos de suelo. Desde una perspectiva espacial, la intensificación del uso de suelo constituye una especie de perturbación puesto los terrenos agrícolas tienden a ser más dinámicos que otros tipos de uso de suelo (Young & Harris, 2005), ya que con sus técnicas extensivas puede actuar como fuente o sumidero en el sentido del potencial esparcimiento de agentes de perturbación como el fuego, pesticidas, fertilizantes, plagas, enfermedades, y especies ajenas hacia las áreas no-

agrícolas, conllevando una variedad de potenciales efectos ecológicos a una escala de paisaje (Zaccarelli et al., 2008).

Ya que el paisaje está, en su mayoría, definido por la cobertura de la vegetación, y en base al trabajo de Zaccarelli et al. (2008), se operacionalizó la medición de la perturbación a través de cualquier alteración detectable en las coberturas de suelo que reflejen cambios significativos y/o frecuentes en el NDVI, que puedan ser atribuidos a perturbaciones inducidas por humanos en la ventana de tiempo estudiada.

Al igual que en el trabajo de Zaccarelli et al. (2008), la presente memoria de título se enfocó en las dinámicas de cambio de uso de suelo que incluyen tanto pérdidas como ganancias en el NDVI, por lo que procesos como la expansión e intensificación agrícola, la transformación de hábitats perennes a campos de cultivo, prácticas como la quema de suelo, rotación de cultivos, expansión urbana, reforestación, deforestación y aumento de las áreas verdes son detectados como perturbaciones.

A partir de la imagen de diferenciación estandarizada del NDVI entre los años 1997 y 2004, se realizó una reclasificación en el software ArcGIS 10 para diferenciar los valores de NDVI que se ubiquen en los 5% más extremos (10% en total), diferenciándose del resto de la imagen, y así obtener una imagen binaria con pixeles perturbados y no perturbados. Este corte arbitrario se eligió por 2 razones: porque de esta manera se reducirían las probabilidades de analizar “ruidos de fondo” que se obtendrían con valores más altos (como con un corte 40% en total); y porque se reducirían las probabilidades de analizar patrones locales y extremos (como con un corte de 2% en total) (Zaccarelli et al., 2008).

#### **4.4.6 Cuantificación de las perturbaciones multi-escalares**

Para la cuantificación de la perturbación se utilizó una variación del modelo de fragmentación de bosques de Riitters et al. (2000), propuesta por Zurlini et al. (2006). En ésta, dos variables de patrones son utilizadas: La composición (Pd), es decir, las cantidades de varias entidades (en este caso perturbaciones); y la configuración (Pdd), la distribución espacial de estas entidades (Li & Reynolds, 1994; Fortin et al., 2003; a través de Zaccarelli, 2008). En su operacionalización, Pd hace referencia a la proporción de pixeles perturbados, mientras que Pdd constituye una estimación robusta de la probabilidad de que, para un pixel perturbado, su vecino también lo esté (Riitters et al., 2000).

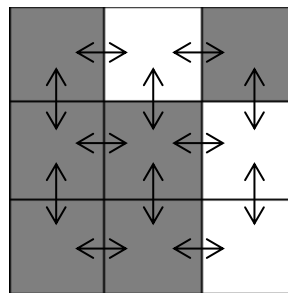
Para el cálculo de la composición (Pd), tomando como ejemplo una imagen binaria de 3x3 pixeles (Figura 4.4.3) en la cual los pixeles oscurecidos representan pixeles perturbados, y los blancos no perturbados se tiene que ésta estaría dada por la proporción de pixeles perturbados en la imagen, que en este caso son 6/9, es decir, Pd, tendría un valor de 0,67.

El cálculo de la configuración (Pdd) es más complejo. En el ejemplo de la Figura 4.4.3, si tomamos los pares de pixeles en direcciones cardinales (norte, sur, este y oeste), se tiene



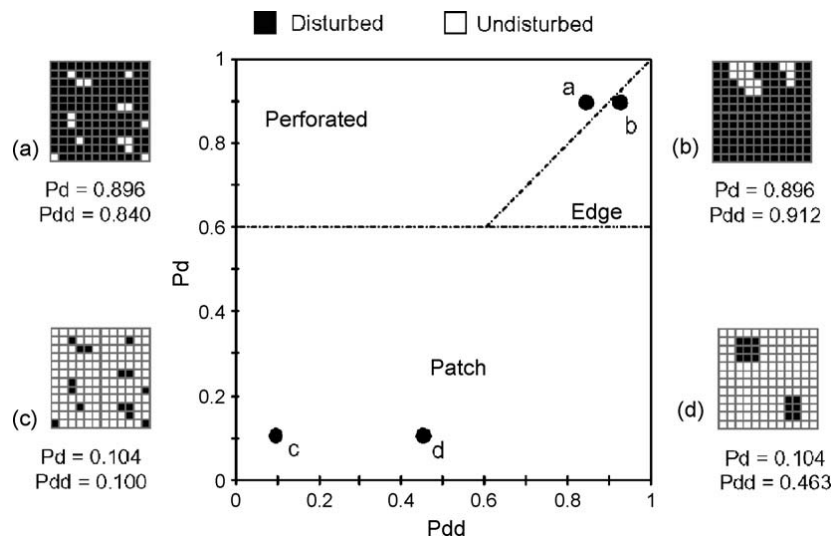
que el número total de pares de píxeles adyacentes es de 12 (flechas en la Figura 4.4.3). De estos, 11 tienen al menos un píxel perturbado, de los cuales sólo 5 son pares perturbación-perturbación, por lo tanto, Pdd sería 5/11, o 0,45. En la Figura 4.4.4 se pueden observar algunos ejemplos de valores de Pd, y Pdd, y cómo sería su representación espacial. En ésta, el ejemplo a) constituye un paisaje muy perturbado con perforaciones no perturbadas; en b) se tiene un paisaje altamente perturbado, pero con clusters de zonas no perturbadas; en c) se tiene un paisaje no perturbado, y con perturbaciones menores, y dispersas; y en d) se tiene un paisaje poco perturbado, pero con el mismo número de perturbaciones que c, pero concentradas.

**Figura 4.4.3 Ejemplo del modelo de fragmentación de bosques de Riitters et al. (2000)**



Fuente: Elaboración propia en base a Riitters et al. (2000)

**Figura 4.4.4 Ejemplo de composición y configuración y su representación gráfica en una ventana fija.**



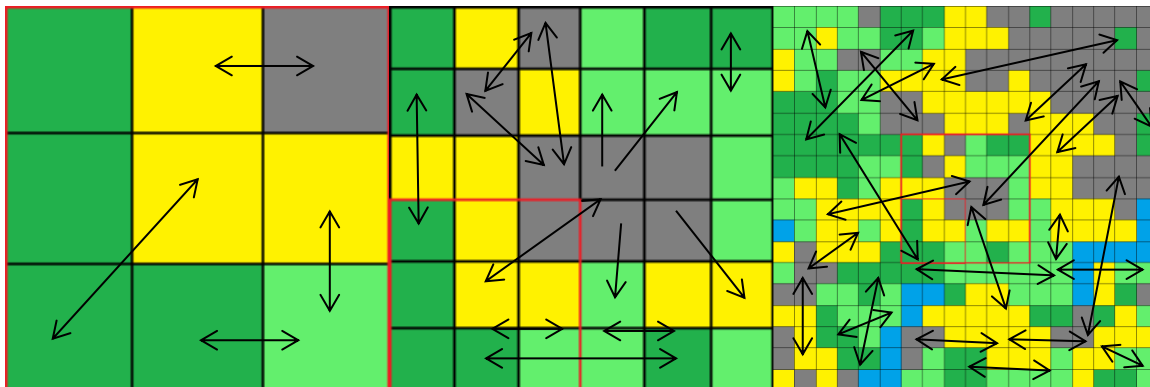
Fuente: Petrosillo, et al. (2010)

A partir del software SAGA GIS, se calculan los valores de composición (porcentaje de píxeles perturbados en una unidad geográfica dada) y de configuración (adyacencia de los píxeles perturbados) para cada unidad geográfica en la panarquía, utilizando el algoritmo de ventanas móviles para obtener imágenes que ilustran la composición y la configuración

en cada unidad geográfica a una escala definida. El algoritmo de ventanas móviles es un algoritmo que subdivide la imagen raster a utilizar en múltiples “ventanas”, de una dimensión determinada, alrededor de un pixel focal. En cada “ventana” se calculan las métricas deseadas (que en este caso constituyen a composición y contagio), y se le asigna el valor de dichas métricas al pixel focal. Luego, el algoritmo se repite sucesivamente por todo el raster.

Para abordar el concepto multiescalar, se utilizaron múltiples ventanas de distintos tamaños, pues de esa manera se abre la posibilidad de analizar el paisaje a través de varias escalas espaciales, de manera de abarcar una complejidad cada vez mayor en las interrelaciones de sus componentes (Figura 4.4.5). Se utilizaron 10 ventanas de 3x3, 5x5, 9x9, 15x15, 25x25, 45x45, 75x75, 115x115, 165x165, y 225x225 pixeles que varían desde 0.81 a 4556.3 hectáreas. La razón del tamaño de estas ventanas radica en que son las utilizadas por el trabajo de Zaccarelli et al. (2008) y otro tamaño de ventanas podría alterar la comparación. Así se obtienen 10 rasters de composición, y 10 de configuración, por cada unidad geográfica estudiada.

**Figura 4.4.5 Ejemplo de un paisaje socioecológico a distintas escalas, y las interrelaciones entre sus componentes.**



a) Ventana de 3x3

b) Ventana de 6x6

c) Ventana de 18x18

Leyenda: Gris: Urbano, Amarillo: Agrícola, Verde claro: Vegetación dispersa, Verde oscuro: Bosque. Azul: Cuerpos de agua. Fuente: elaboración propia

Una vez obtenida las imágenes con los resultados del algoritmo, se procede a hacer un “extract by mask” por cada nivel de la panarquía a estudiar (el nivel regional constituye la imagen de perturbación original), dando en total 5 sub-imágenes correspondientes al nivel de provincias, y 2 sub-sub-imágenes correspondientes al nivel de comunas.

Zaccarelli et al. (2008) hacen referencia a la importancia del CP, o punto de convergencia, el cual representa el valor de una ventana ideal de igual tamaño que la unidad geográfica de un paisaje socioecológico dado dentro de la panarquía. Teóricamente, las trayectorias de perturbación deberían tender hacia este punto a medida que el tamaño de la ventana aumenta.

Dado que las aplicaciones del modelo de Riitters et al. (2000) se basan en el algoritmo de ventanas móviles, no se pudo encontrar una aplicación que calculara el CP. Por ello, se programó una aplicación que permita hacerlo en lenguaje C++.

#### 4.4.7 Clasificación e ilustración de patrones de perturbación según escala y uso de suelo

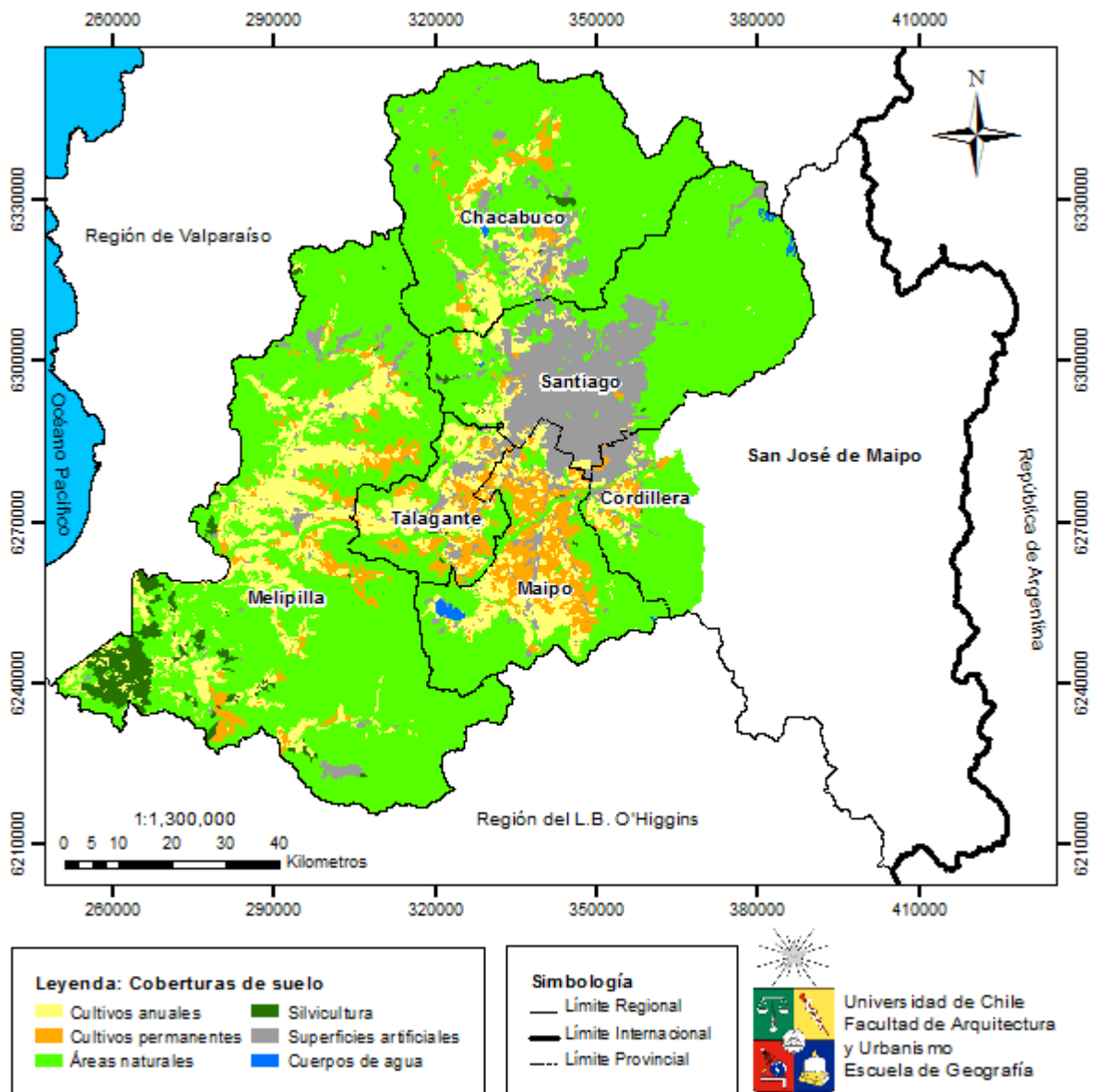
Para observar el comportamiento de los patrones de perturbación según el uso de suelo, cinco categorías fueron desarrolladas (Cuadro 4.4.3 y Figura 4.4.6) a partir de la carta de uso de suelos de la Región Metropolitana de Santiago para el año 2003, desarrollada por el Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (GORE, 2003) a escala de 1:100.000.

**Cuadro 4.4.3 Conversión de clases de la carta de uso de suelo de la Región Metropolitana de Santiago para el año 2003, escala de 1:100.000.**

Categoría	Clase
Cultivos anuales	Cultivos
Cultivos permanentes	Frutales, Parronales-Viñas
Áreas naturales	Bosque-renoval, Humedales y vegas, Matorral arborescente, Matorral con suculentas, Praderas, Recreacional, Ríos y esteros, Estepa andina central, Altas cumbres sin vegetación permanente
Superficies artificiales	Aeródromo y aeropuerto, Agroindustrial, Área Urbana, Asentamiento menor, Central y subestación eléctrica, Embalse, Extracción de áridos, Industrial, Infraestructura vial, Minería, Otros usos (militar, basurales), Parcela de agrado, Planta de tratamiento, Tranque de regadío, Tranque de relave, Urbano preferentemente mixto
Silvicultura	Plantaciones
No analizadas	Glaciares y nieves, Laguna

Fuente: Elaboración propia, en base a la carta de uso de suelos del Gobierno Regional Metropolitano para el año 2003.

**Figura 4.4.6 Coberturas definidas en base a la carta de uso y cobertura de suelo para la Región Metropolitana de Santiago, año 2003.**



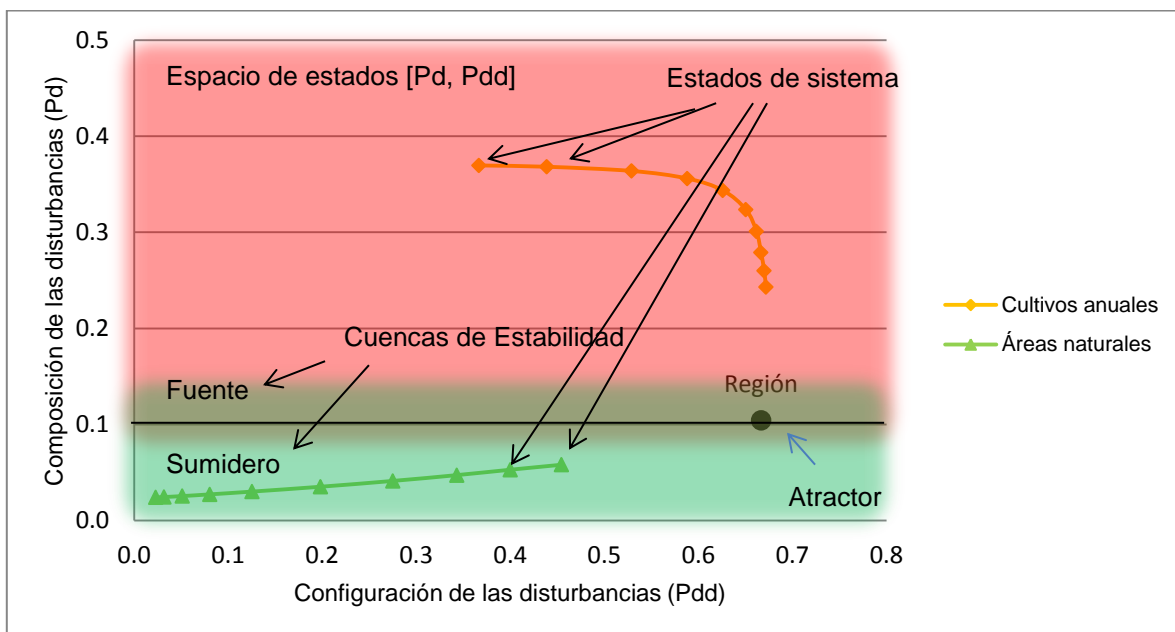
Fuente: Elaboración propia, en base a la carta de uso de suelos del Gobierno Regional Metropolitano para el año 2003.

A partir de esta reclasificación, se descompuso el raster de usos de suelo en las cinco categorías, de manera que se obtuviera un raster por categoría. Luego, a través de la herramienta "Extract by mask" del software ArcGIS 10 se extrajeron las composiciones y configuraciones obtenidas a partir de las ventanas móviles. De esta manera, se obtienen rasters de composición y configuración por cada unidad geográfica estudiada y por cada ventana móvil utilizada para cada tipo de uso de suelo.

Para poder observar las tendencias de perturbación, según escala y uso de suelo, se extrajo el promedio de composición y configuración de cada clase de uso de suelo por ventana móvil por cada unidad geográfica estudiada, y luego se tabularon en un archivo Excel. Luego, se producen dos tipos de gráficos:

En el primero, se contrasta tanto composición, como configuración, según clase de uso de suelo, con los distintos tamaños de ventanas/escalas. Mientras que en el segundo, se grafica el valor de Pd y Pdd para cada ventana móvil y clase de uso de suelo, junto con los CP, en un espacio en el cual eje Y constituye la composición (Pd) y la configuración (Pdd) constituye el eje X, como se muestra en la Figura 4.4.7.

**Figura 4.4.7 Espacio de estado para los paisajes socioecológicos del nivel jerárquico Región.**



Fuente: Elaboración propia.

Para complementar los gráficos también se calculó la tasa promedio con la cual la conectividad de la perturbación tiende a crecer en función de la escala. Para ello, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{dd} Km^{-1} = \frac{(P_{dd} \text{ ventana máxima} - P_{dd} \text{ ventana mínima})}{\text{Tamaño ventana máxima}}$$

Ecuación 4.7 Fuente: Zaccarelli et al. (2008)

Las trayectorias multiescalares en el espacio [Pd,Pdd] indican si es que y dónde las perturbaciones pueden actuar como una fuente o sumidero potencial. Si la trayectoria media es siempre mayor que el CP de referencia, y tiende hacia el CP, entonces las perturbaciones de uso de suelo actúan como una fuente puesto que hay altos niveles locales de perturbación dentro de una región mayor con menores perturbaciones. De lo

contrario, las perturbaciones de uso de suelo actúan como un sumidero debido a que hay bajos niveles locales de perturbación dentro de una región mayor con varias perturbaciones.

Para comparar los CPs por su Pd y Pdd, se utilizan razones logarítmicas de probabilidad (Agresti, 1996). La razón de probabilidad es definida por Zaccarelli et al. (2008) como:

$$\frac{\frac{\text{Píxeles disturbados}}{\text{Píxeles no disturbados}}}{\frac{\text{Píxeles disturbados del nivel superior}}{\text{Píxeles no disturbados del nivel superior}}}$$

Ecuación 4.8 Fuente: Zaccarelli et al. (2008)

Si, por ejemplo, una provincia tiene 350/1000 píxeles disiturbados, y la región tiene 1000/10000, la razón de probabilidad será de 4.85, puesto que  $(350/650)/(1000/9000) = 4.85$  aprox. Ello significa que esa provincia tendrá 4.85 veces las probabilidades de adquirir píxeles perturbados más que la región. Una razón de probabilidad de 1 indica que una distubación es igual de probable en ambos paisajes socioecológicos, mientras que una probablidad mayor a 1 indica que la perturbación es más probable en el paisaje socioecológico numerador. Luego, se calcula el logaritmo natural de las razones de probabilidad, puesto que provee mayor simetría en grandes muestreos, permitiendo la evaluación entre dos proporciones (Agresti, 1996, a través de Zaccarelli et al., 2008).

## Capítulo 5: Resultados

A partir de las metodologías planteadas en el capítulo 4, se obtienen los resultados expuestos en el presente capítulo. Éstos se encuentran organizados de dos maneras. En primer lugar, los resultados son expuestos según su escala espacial, presentando de esta manera los patrones de perturbación multiescalar a nivel regional, y luego provincial. Luego, se expone una comparación entre los puntos de convergencia a niveles inter e intra escalar. Cabe señalar que en este capítulo sólo se exponen los resultados obtenidos. Éstos serán analizados en el capítulo 6.

### 5.1 Patrones de perturbación multiescalar a nivel de región

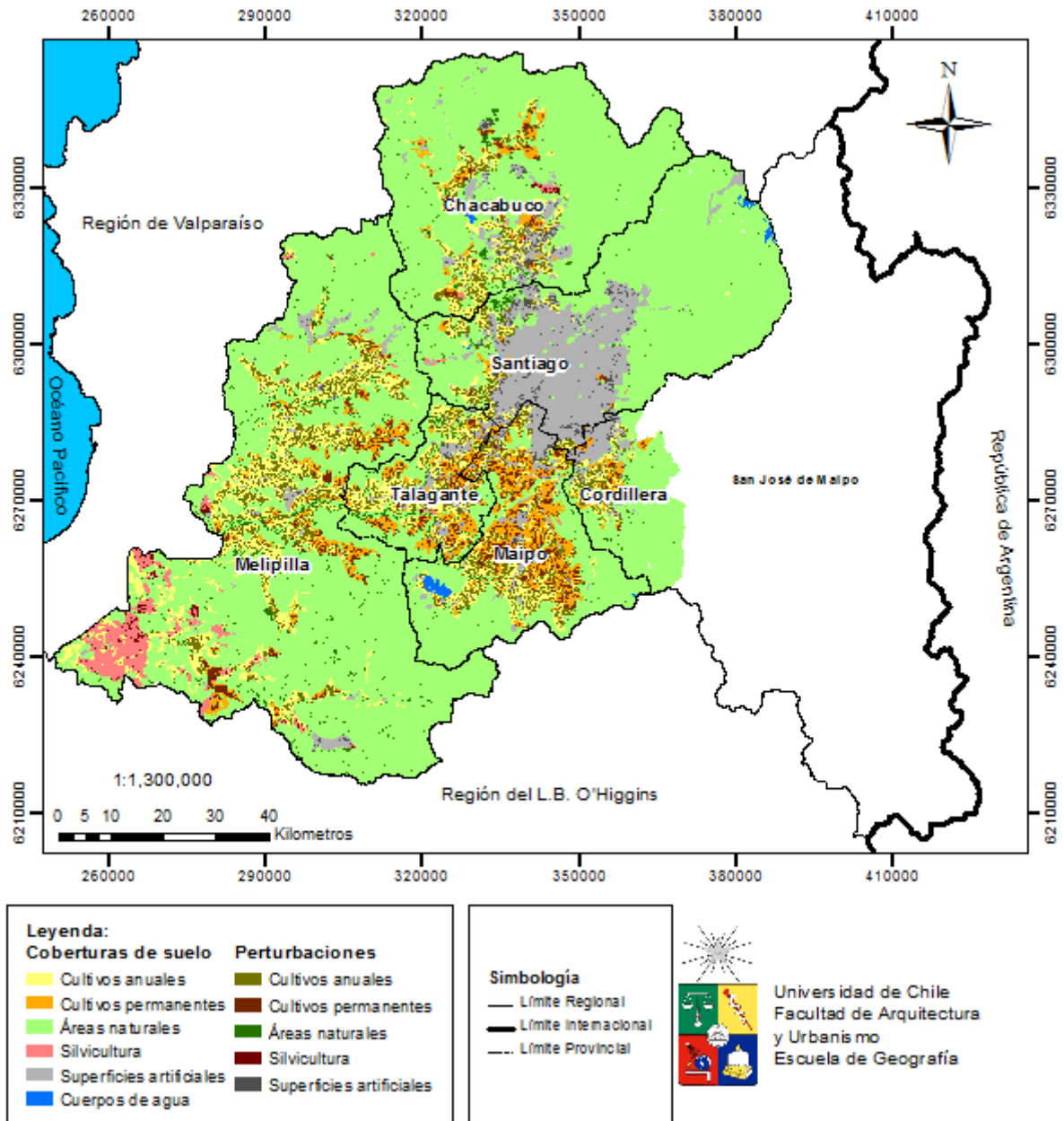
A nivel regional, las perturbaciones están distribuidas por toda la región (Figura 5.1.1 y Figura 5.1.2). Al analizar la trayectoria multiescalar de la composición (Pd) y configuración (Pdd) (descritos capítulo 4, sección 4.4.3) de la perturbación según uso y cobertura de suelo (Figura 5.1.3 y 5.1.4), se tiene que las trayectorias de la perturbación a través de múltiples escalas espaciales presentan dos tipos de comportamiento en cuanto a composición de ésta, y tres en cuanto a configuración:

Análisis de la composición:

En el primero, o tipo pd1, la composición, o proporción de perturbaciones tiende a decrecer a medida que se aumenta la escala. Esto se puede interpretar como zonas altamente perturbadas, las cuales se encuentran insertas en paisajes con menor perturbación. Dentro de este tipo de comportamiento se encuentran tipos de uso y cobertura de suelo tales como cultivos anuales, que constituyen un 13,82% de la superficie regional (Figura 5.1.2) y permanentes (6,58%), y en menor medida, a la silvicultura (1,92%), los que se caracterizan por ser usos de suelo con altos niveles de transformación vegetativa.

El otro tipo de comportamiento, o tipo pd2 se caracteriza en que la composición de la perturbación tiende a aumentar a medida que sube la escala, lo que puede ser interpretado como zonas con bajos niveles de perturbación insertos en paisajes más perturbados en comparación. En este tipo de comportamiento es posible encontrar a las superficies artificiales (9,73%) y a las áreas naturales (67,73%). Ambas pueden ser explicadas por la pequeña proporción de áreas perturbadas en comparación con el total de la superficie que éstas cubren.

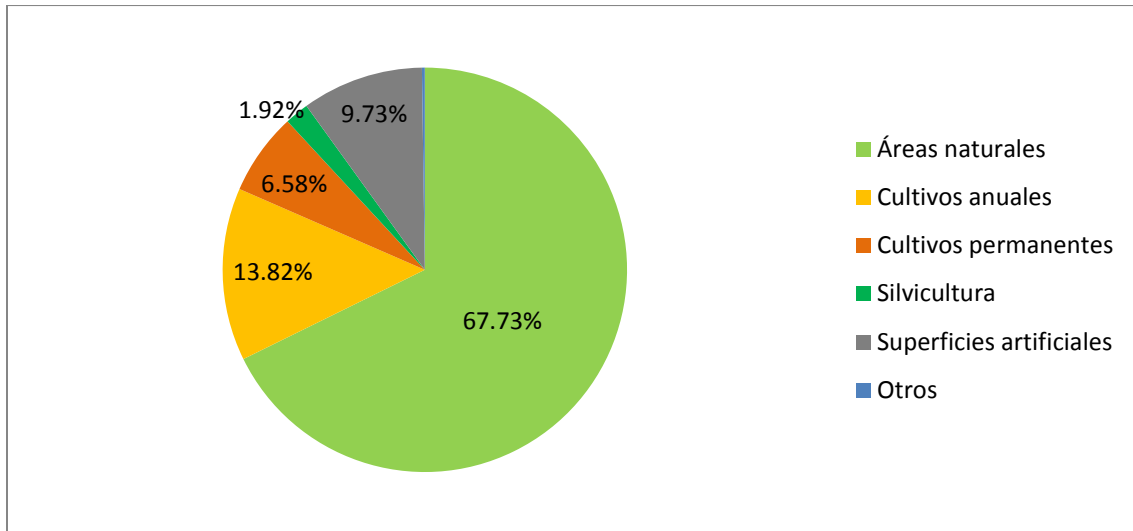
**Figura 5.1.1 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.**



Fuente: Elaboración propia.

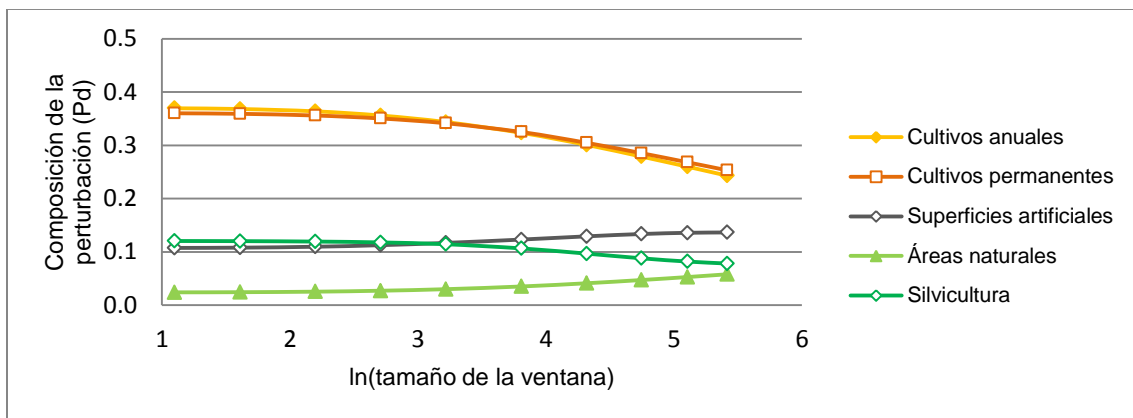


**Figura 5.1.2 Distribución de los usos de suelo estudiados en la Región Metropolitana de Santiago para el año 2003.**



Fuente: Elaboración propia en base a GORE, 2003.

**Figura 5.1.3 Trayectorias de la composición de la perturbación según tamaño de la ventana en la Región Metropolitana de Santiago.**



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la configuración:

Cuando se analiza la trayectoria multiescalar de la configuración de las perturbaciones según uso y cobertura de suelo (Figura 5.1.4), se tiene que las clases de uso/cobertura de suelo se pueden clasificar en tres tipos de comportamiento:

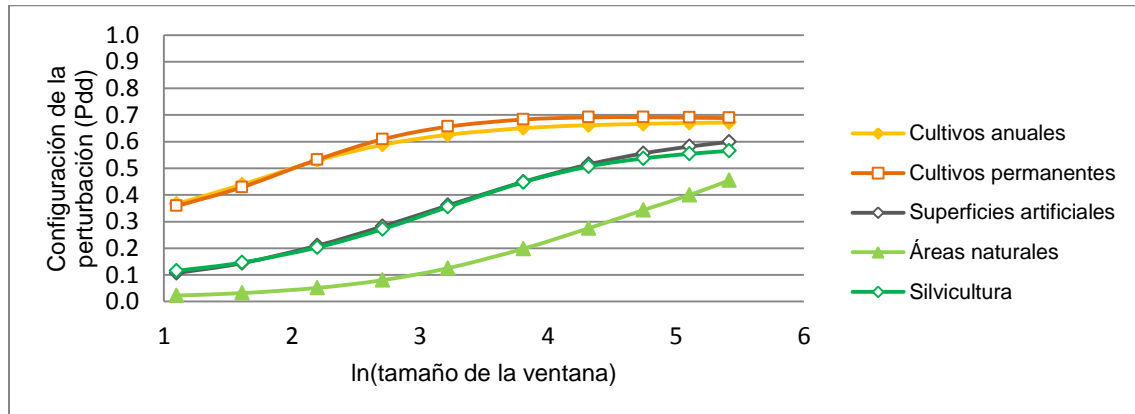
En el primero, al que llamaremos pdd1, la trayectoria de la configuración de la perturbación posee una forma cóncava, en la cual la conectividad de las perturbaciones tiende a crecer aritméticamente hasta estabilizarse a grandes escalas. Este comportamiento se caracteriza por tener perturbaciones locales altamente conectadas,

que a grandes escalas se encuentran muy localizadas en dentro de un paisaje con menor conectividad de perturbaciones. Dentro de este comportamiento es posible encontrar a los cultivos anuales y permanentes.

El segundo comportamiento que es posible identificar, o pdd2, posee un patrón convexo en su trayectoria multiescalar. En este comportamiento entran aquellos usos/coberturas que posean perturbaciones dispersas, con muy poca, o nula conectividad entre ellas, y que se encuentran inmersas en un paisaje cuyas perturbaciones están cada vez más conectadas entre sí. Las áreas naturales constituyen la única cobertura de suelo con este comportamiento.

El tercer comportamiento, o pdd3, es un tanto inusual en el sentido de que posee una forma convexa a pequeñas escalas, que luego se transforma a una forma cóncava, describiendo una "S" muy suavizada. Una manera de interpretar este comportamiento sería que a escalas pequeñas y medias, las perturbaciones estarían pobremente interconectadas y se encontrarían en paisajes con mayores niveles de perturbaciones conectadas, pero que a mayor escala, éstas se incorporarían en paisajes muy poco alterados, con muy bajos niveles de conectividad, y donde las perturbaciones que hay se encuentran muy concentradas. Tal es el caso de los usos de suelo asociados a las superficies artificiales y a la silvicultura.

**Figura 5.1.4 Trayectorias de la configuración de la perturbación según tamaño de la ventana en la Región Metropolitana de Santiago.**



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los perfiles de perturbación:

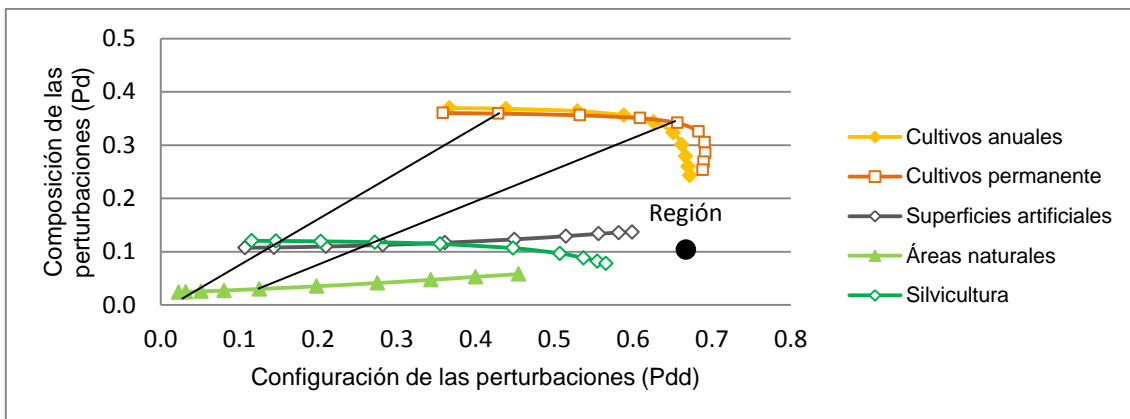
La combinación de los patrones observados en las Figura 5.1.3 y Figura 5.1.4, dan como resultado los patrones de perturbación ilustrados en el espacio [Pd, Pdd] de la Figura 5.1.5 los cuales, al igual que en las Figura 5.1.3 y Figura 5.1.4, se comportan de manera diferente según el uso de suelo que se observe.

A partir de la Figura 5.1.5, se tiene que tanto cultivos anuales, como cultivos permanentes, poseen los más altos niveles de composición y configuración en la región y

que a grandes ventanas (escalas), estos tienden a converger hacia el Punto de Convergencia (CP) regional (Capítulo 4, sección 4.4.6). Estos usos de suelo parecen tener comportamientos de perturbaciones muy similares (más que cualquier otro tipo de uso de suelo), por lo que estos usos de suelo podrían ser considerados como fuentes de perturbación.

Por otra parte, las superficies artificiales tienden a presentar niveles moderados de perturbación, los cuales es posible que estén asociados a la expansión urbana y a la creación de áreas verdes. Cabe señalar que la curva ligeramente convexa que retrata la trayectoria de perturbación daría cuenta de un comportamiento de sumidero. No obstante, el hecho de que la curva se sitúe por sobre el CP Regional, sumado a que las dinámicas y comportamientos de las superficies artificiales tienden a ser irreversibles en el mediano-corto plazo, se puede decir que son inherentemente fuentes de perturbación.

**Figura 5.1.5 Patrones de perturbación multiescalar, según uso/cobertura de suelo en la Región Metropolitana de Santiago.**



Fuente: Elaboración propia.

Las áreas dedicadas a la silvicultura, por su parte, parecen comportarse como fuentes de perturbaciones a pequeñas escalas, pero a un nivel muchísimo menor que las áreas agrícolas, para luego convertirse en sumideros en las escalas más grandes. Esto porque, a escalas pequeñas, se ubica por sobre el CP, mientras que a mayor escala se ubica por debajo de éste. También se puede decir que a partir de la trayectoria de las perturbaciones multiescalares de las áreas silvícolas, éstas poseen zonas perturbadas insertas en paisajes con menores niveles de perturbación.

Finalmente, las áreas naturales poseen valores de perturbación extremadamente bajos en comparación con el resto de la región, indicando que las perturbaciones en las áreas naturales son escasas y aisladas. No obstante, hay que tener en consideración que gran parte de las áreas naturales se encuentran en lugares de difícil acceso, por lo que las perturbaciones de origen antrópico serían puntuales y localizadas. Debido a estos comportamientos tanto en composición como configuración, es posible señalar que las áreas naturales poseen un comportamiento de tipo sumidero hacia donde las perturbaciones desarrolladas en otros usos de suelo podrían llegar propagarse.

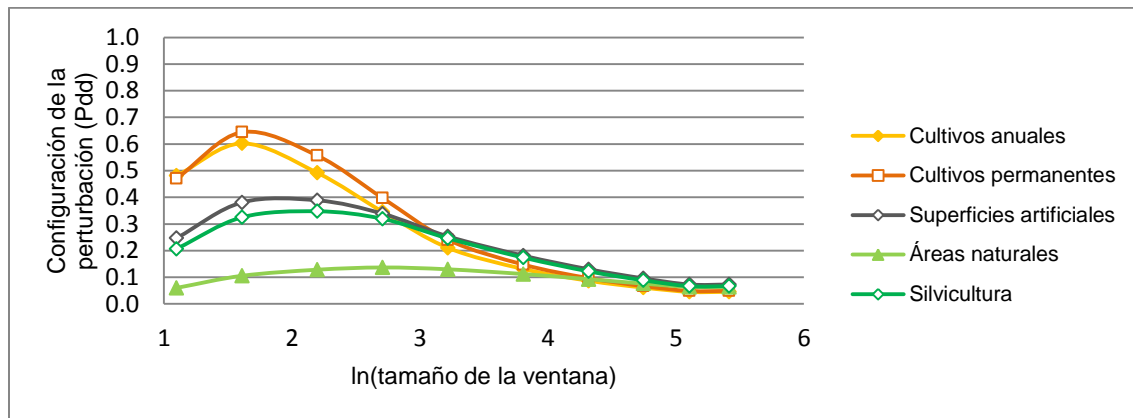
Otro aspecto interesante a abordar es que existen grandes vacíos entre el tamaño máximo de la ventana y CP. Según Zaccarelli et al. (2008), estos vacíos dependen del valor de la configuración inicial, y el crecimiento multi-escalar de la configuración dentro de las diez ventanas ( $\Delta P_{dd} km^{-1}$ , Cuadro 5.1.1, y Figura 5.1.6). De especial interés es la diferencia de configuración de las perturbaciones entre cultivos anuales y permanentes, con las áreas naturales (Cuadro 5.1.1 y Figura 5.1.6). Considerando que, tanto cultivos anuales, como cultivos permanentes poseen una configuración inicial de las perturbaciones cercana a 16 veces la de las áreas naturales, estos dos usos de suelo presentan incrementos relativamente altos de Pdd, pues el crecimiento promedio de configuración multi-escalar a los 1.35 km<sup>2</sup> (quinta ventana, de 45x45 pixeles) de los cultivos anuales fue de 0,21, y para los cultivos permanentes fue de 0,24, mientras que para las áreas naturales fue de 0,13, lo cual indica que el crecimiento de la conectividad fue altamente desigual, en los dos primeros, y más equitativo en el segundo (Figura 5.1.6). Para el caso de las superficies artificiales y la silvicultura, éstas se encuentran en un término medio, pero a grandes escalas, son las que más rápido crecen. Estas diferencias, según Zaccarelli et al. (2008) serían indicadores de discordancias espaciales multi-escalares desde el punto de vista de las tasas acumulativas de aglomeración de perturbaciones a través de las escalas.

**Cuadro 5.1.1 Crecimiento promedio de la configuración multi-escalar ( $\Delta P_{dd} km^{-1}$ ) según tamaño de la ventana y uso/cobertura de suelo, para la Región Metropolitana de Santiago.**

Tamaño Ventana (Km)	Cultivos anuales	Cultivos permanentes	Superficies artificiales	Áreas naturales	Silvicultura
0,15	0,481	0,470	0,247	0,060	0,207
0,27	0,602	0,644	0,381	0,106	0,325
0,45	0,492	0,556	0,389	0,128	0,348
0,75	0,346	0,397	0,339	0,137	0,319
1,35	0,210	0,240	0,253	0,130	0,246
2,25	0,131	0,148	0,181	0,112	0,174
3,45	0,087	0,097	0,130	0,093	0,122
4,95	0,061	0,067	0,096	0,076	0,089
6,75	0,045	0,049	0,073	0,064	0,067

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.1.6 Crecimiento promedio de la configuración multi-escalar ( $\Delta P_{dd} km^{-1}$ ) según tamaño de la ventana y uso/cobertura de suelo, para la Región Metropolitana de Santiago.**



Fuente: Elaboración propia.

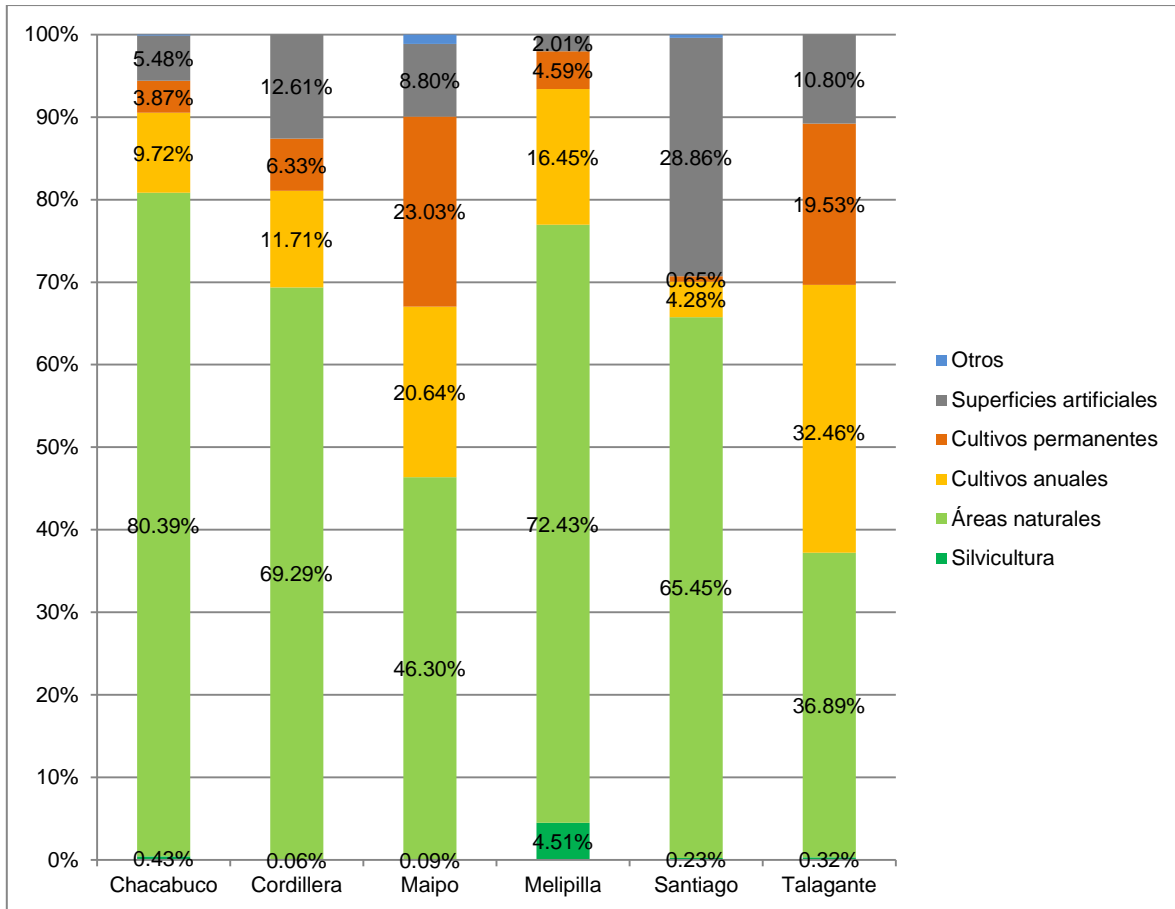
## 5.2 Patrones de perturbación multiescalar a nivel de Provincia

A nivel provincial, el comportamiento de las perturbaciones presenta grandes variaciones según la Provincia que se analice, aunque algunos comportamientos tienden a permanecer constantes. Al igual que a nivel Regional, los usos y coberturas de suelo con los mayores niveles de perturbación se presentan en aquellos de uso antrópico (cultivos anuales, permanentes, silvicultura, y superficies artificiales). La distribución de los usos de suelo en las Provincias respecto a la superficie total de éstas se puede ver en la Figura 5.2.1, y la localización de las perturbaciones por Provincia en las Figura 5.2.2, Figura 5.2.3, Figura 5.2.4, Figura 5.2.5, Figura 5.2.6 y Figura 5.2.7.

Análisis de la composición:

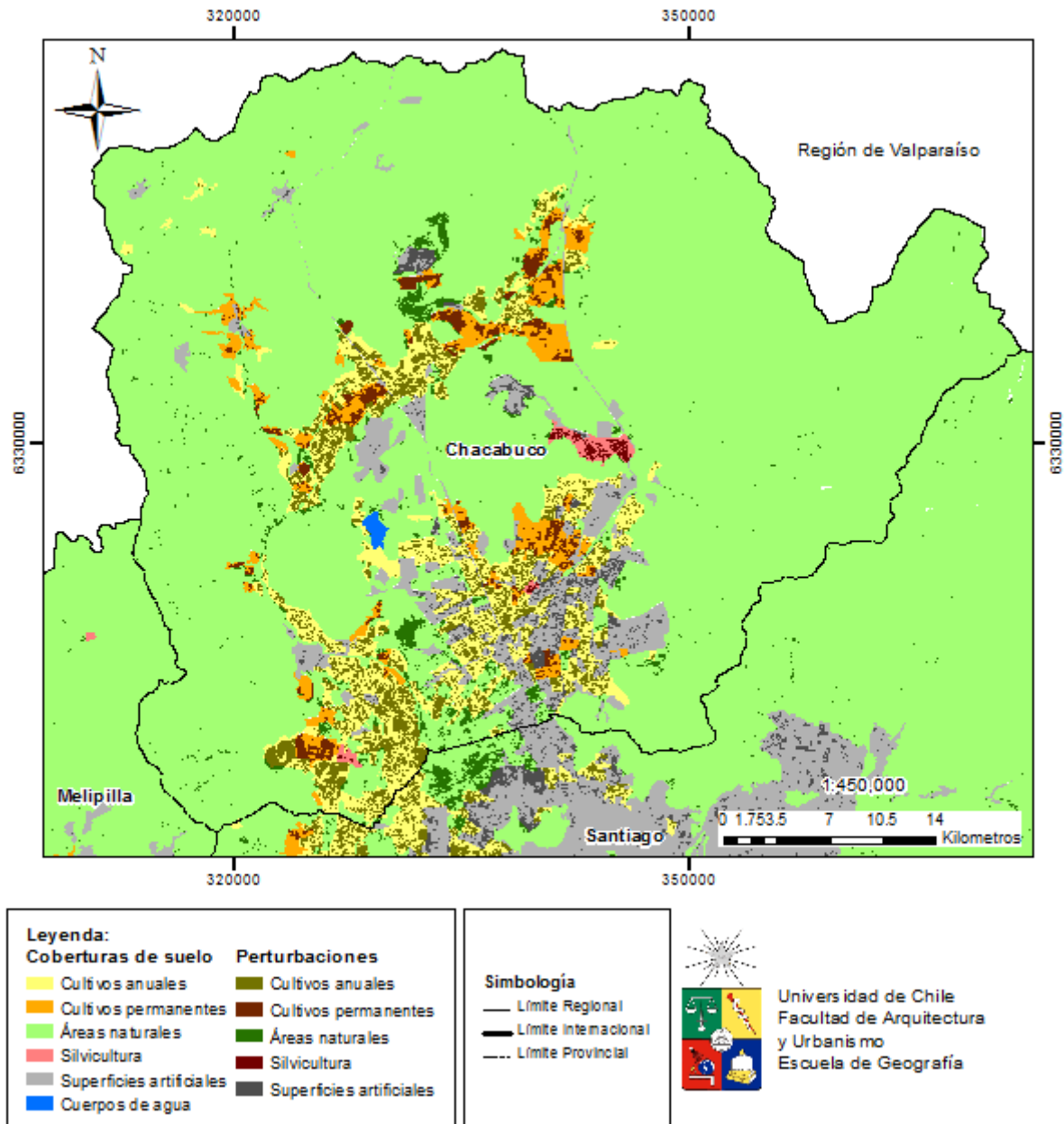
El tipo de uso de suelo cuyas perturbaciones serán más predominantes varía de Provincia en Provincia. Así, en términos de composición (Figura 5.2.8) se tiene que los cultivos anuales, con un comportamiento tipo pd1, presentan la mayor composición de perturbaciones en todas las Provincias, a excepción de Melipilla, donde predominan los cultivos permanentes. A los cultivos anuales le siguen los cultivos permanentes, también con comportamiento de tipo pd1, excepto en Chacabuco, donde a escalas pequeñas y medias (escalas  $< 5,06 km^2$ ) el protagonismo lo tiene la silvicultura. No obstante, en Chacabuco la importancia de la silvicultura decrece considerablemente en escalas grandes (escalas  $\geq 5,06 km^2$ ), siendo posible interpretarla como paisajes que están altamente perturbados, pero localizados en zonas con muy poca proporción de perturbación en comparación con el resto de los usos de suelo. La situación inversa se da en la Provincia de Talagante, donde los cultivos permanentes pierden protagonismo a escalas medianas y grandes (escala  $\geq 1,82 km^2$ ) donde el nivel de composición se estabiliza y permanece invariable a través de las escalas, lo cual indicaría que en Talagante, la silvicultura a escalas superiores o iguales a las  $5,06 km^2$  ha, poseen un comportamiento constante.

**Figura 5.2.1 Porcentaje de distribución de los usos de suelo para las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago en el año 2003.**



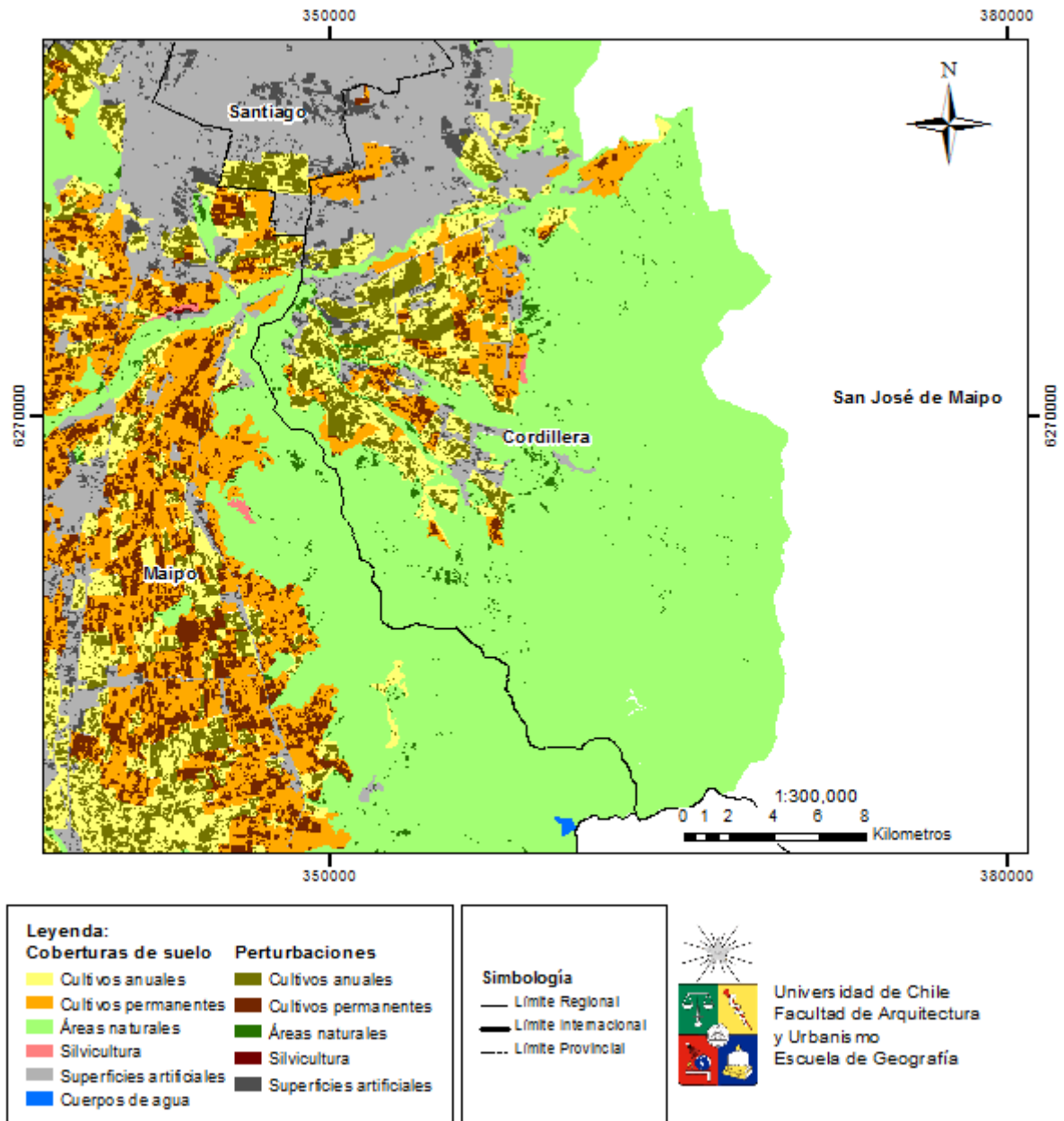
Fuente: Elaboración propia en base a GORE, 2004.

**Figura 5.2.2 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.**



Fuente: Elaboración propia.

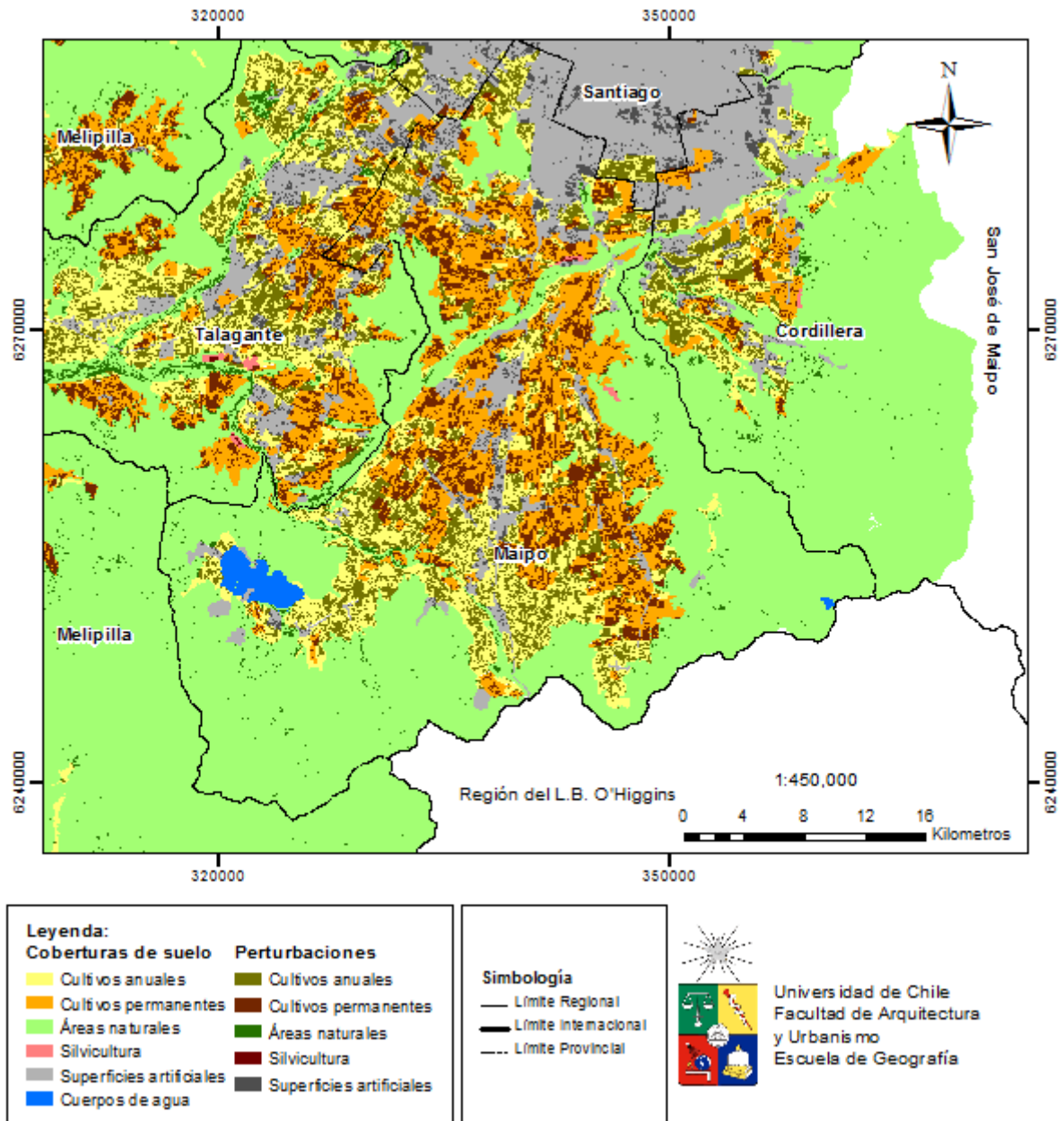
**Figura 5.2.3 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Cordillera, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.**



Fuente: Elaboración propia.

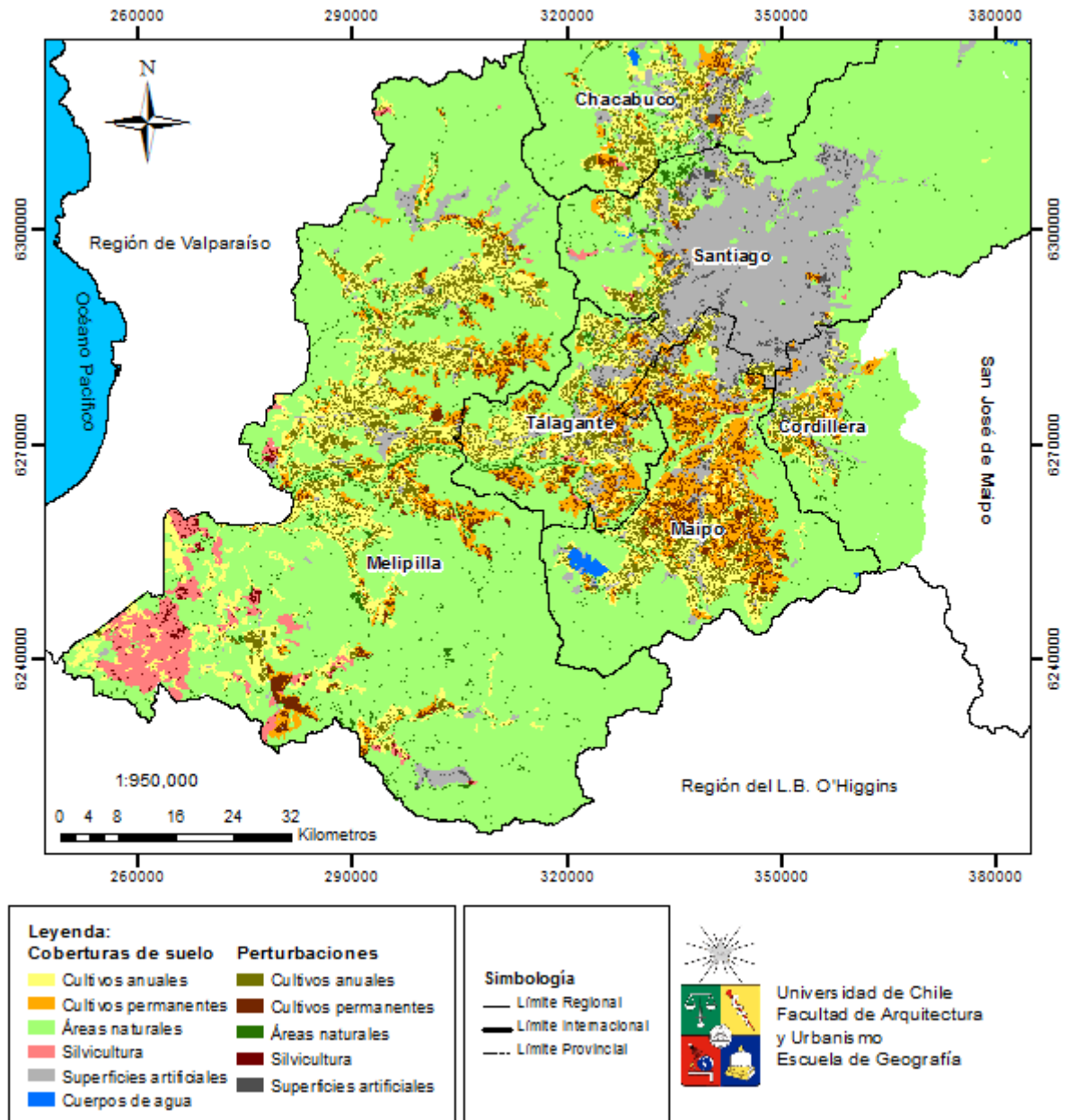


**Figura 5.2.4 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Maipo, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.**



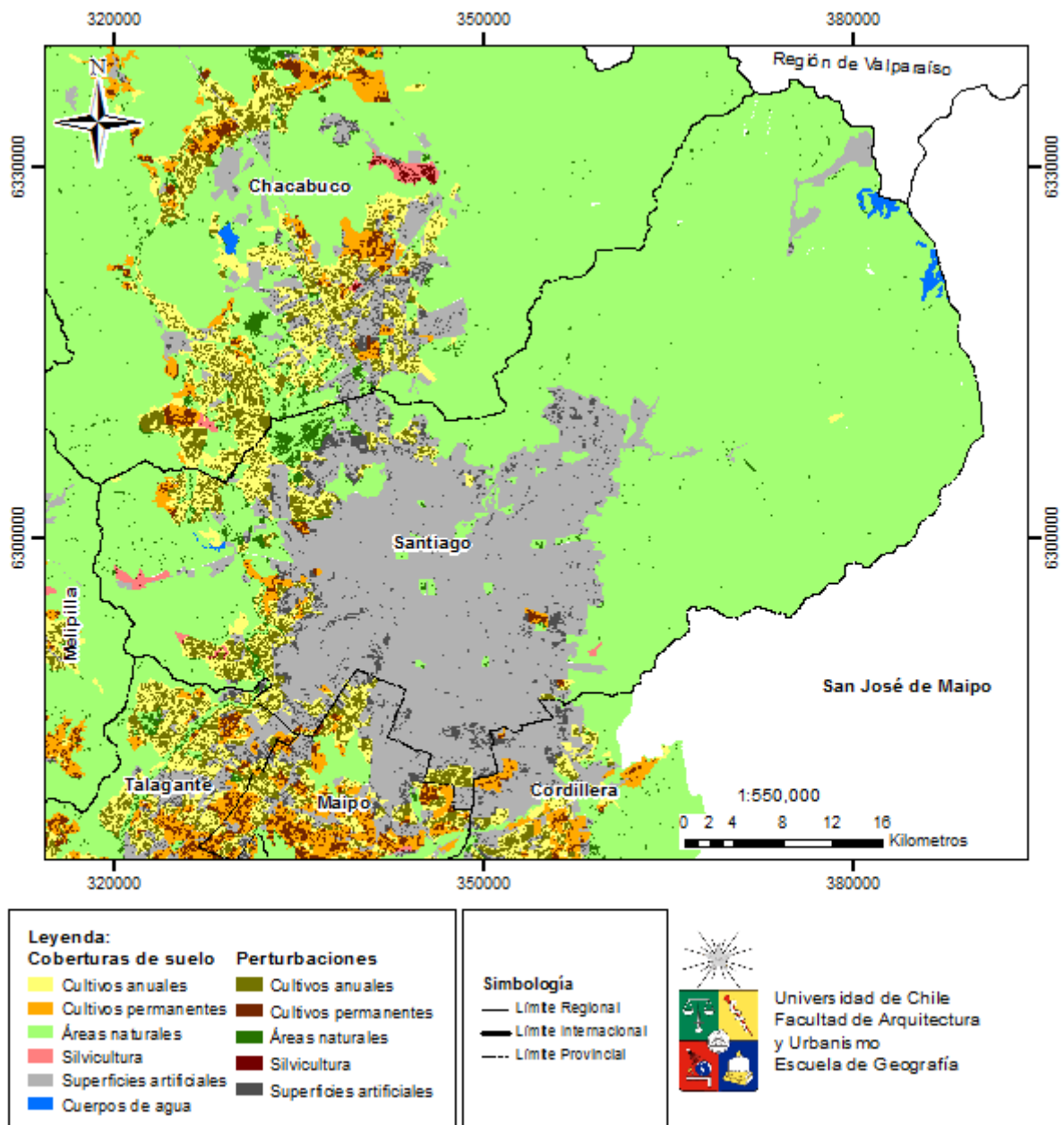
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.2.5 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Melipilla, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.**



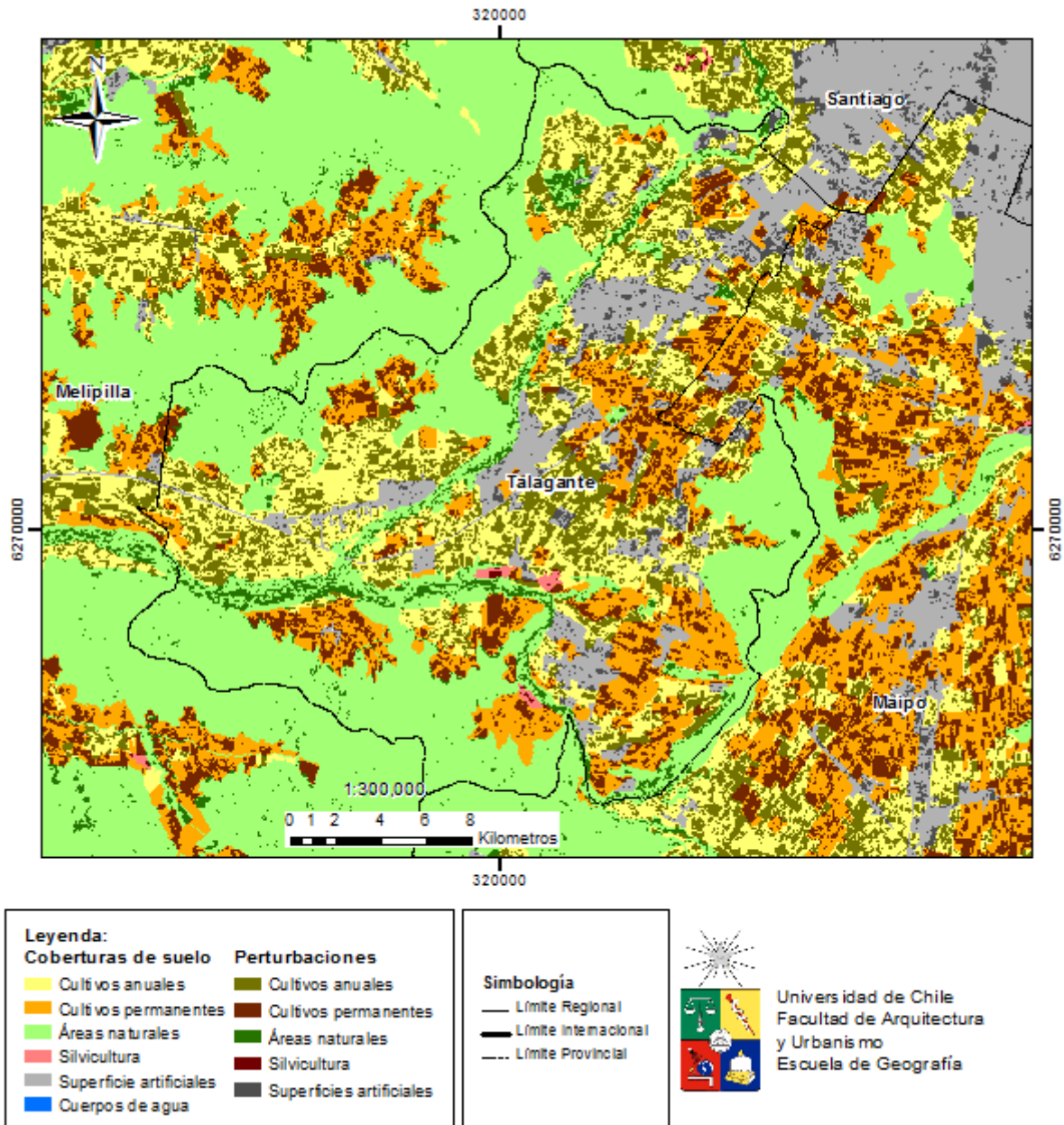
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.2.6 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Santiago, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.2.7 Perturbaciones, y usos/coberturas de suelo en la Provincia de Talagante, Región Metropolitana de Santiago, para los años 1997-2004.**



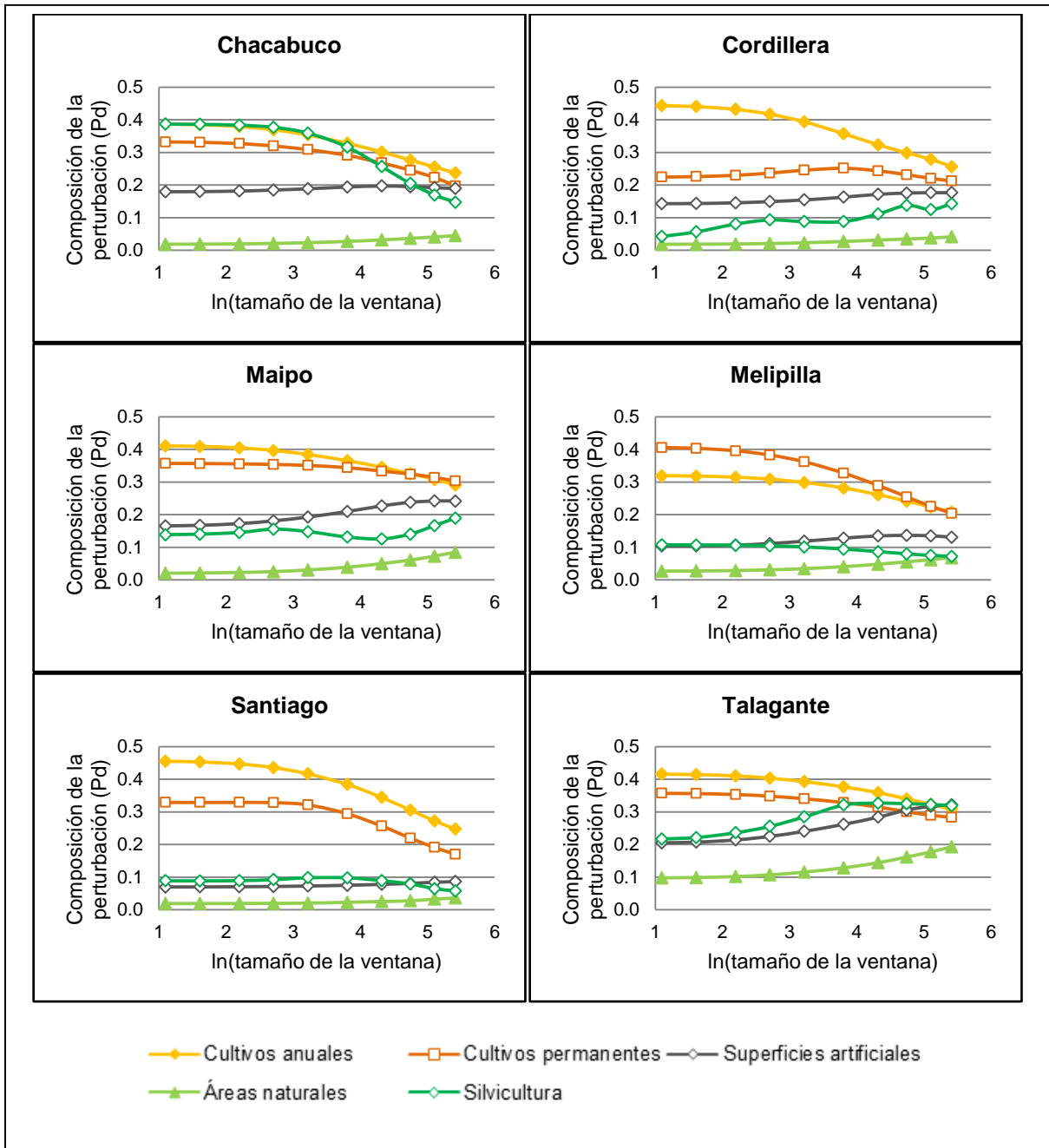
Fuente: Elaboración propia.

La composición de perturbaciones en las superficies artificiales presenta gran variación según la Provincia que se analice, pero en general, tienden a adoptar el comportamiento tipo pd2, o a ser uniforme independiente de la escala. Chacabuco, Cordillera, Maipo y Talagante parecen poseer la mayor composición de perturbaciones en las superficies artificiales, pero con comportamientos diferentes. La composición de las perturbaciones en Chacabuco parece comportarse de manera constante, invariable de la escala de análisis, mientras que en Cordillera, Maipo, Melipilla y Talagante aumenta a medida que la escala de análisis se incrementa. Santiago, por otra parte, presenta muy bajos niveles de perturbación en comparación a sus provincias vecinas. Esto puede ser atribuido a la baja proporción entre píxeles perturbados atribuibles al crecimiento urbano/creación áreas verdes, y el total de la superficie urbana de la provincia.

En lo que respecta a la silvicultura, el comportamiento de la composición de esta presenta interesantes variaciones ya que su comportamiento entre las Provincias no es igual. Por ejemplo, como se mencionó anteriormente, en Chacabuco a escalas pequeñas y medias constituye la principal fuente de perturbación, mientras que en Talagante lo es a medias y grandes escalas. En Melipilla y Santiago, por otra parte, la proporción de píxeles perturbados en los usos de suelo silvícolas tiende a comportarse de manera muy similar y a decrecer ligeramente a medida que la escala asciende. Si bien la mayoría tiene un comportamiento tipo pd1, en Cordillera y Maipo la composición de las perturbaciones posee un comportamiento muy atípico, presentando subidas y bajadas irregulares a través de las escalas en el caso de Cordillera, y una repentina caída y nuevo ascenso en el caso de Maipo. Tales comportamientos serán analizados en el capítulo 6.

Finalmente, las áreas naturales, al igual que a nivel regional, presentan muy bajos niveles de composición donde  $Pd < 0,1$  en todas las Provincias. Ahora, si bien las áreas naturales en Talagante poseen  $Pd > 0,1$ , sigue siendo la cobertura de uso de suelo que presenta la menor composición de perturbaciones. Posee claramente un tipo de comportamiento pd2.

**Figura 5.2.8 Trayectorias de la composición de la perturbación según tamaño de la ventana en las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago.**



Fuente: Elaboración propia

### Análisis de la configuración:

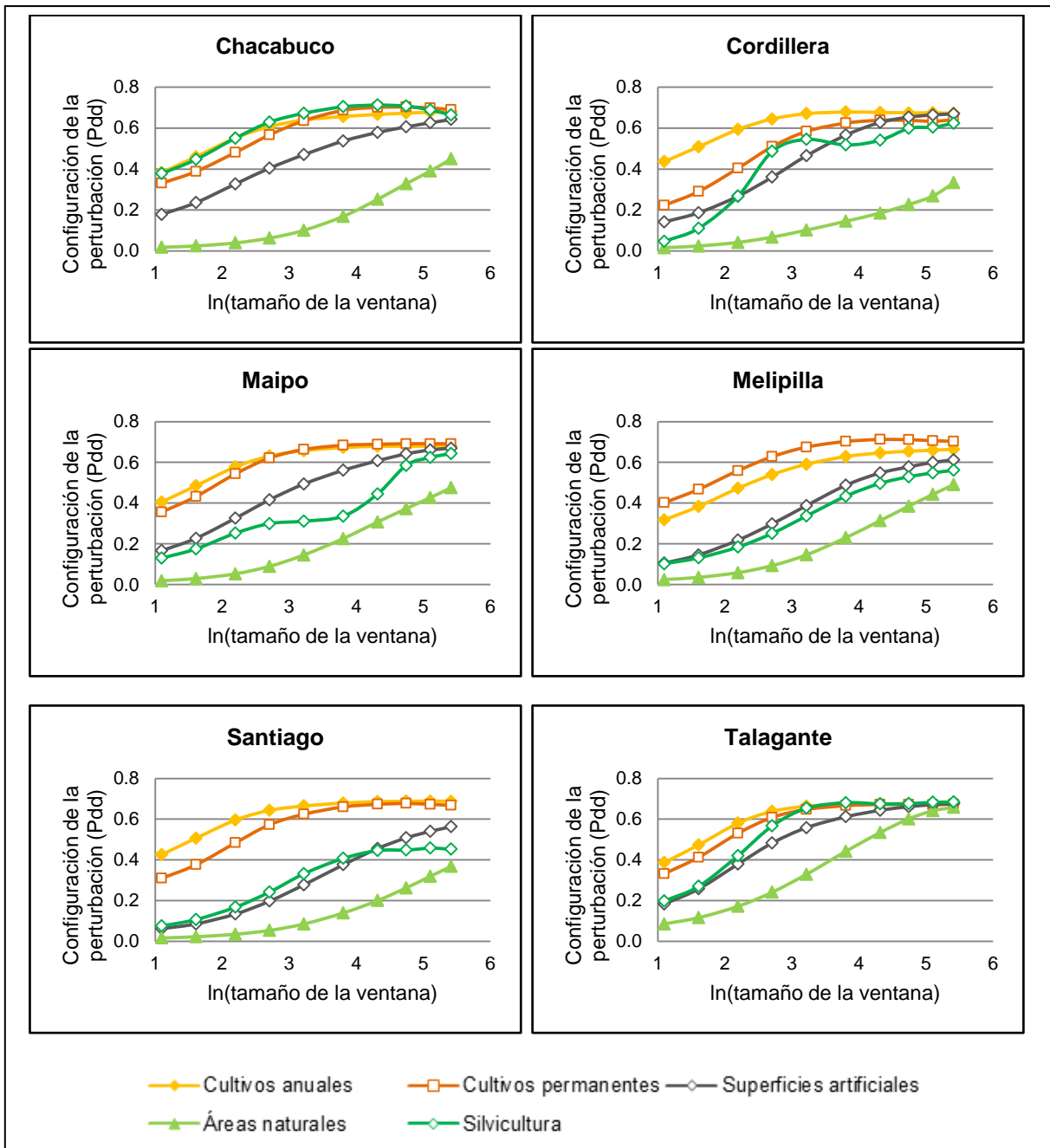
En el caso de la configuración (Figura 5.2.9) se tiene que los cultivos anuales poseen un claro patrón pdd1, y constituyen el uso de suelo con mayor predominancia de perturbaciones conectadas en cuatro de las seis Provincias de la Región, siendo Melipilla y Chacabuco la excepción, las cuales serán abordadas en mayor detalle en el capítulo 6. Los cultivos permanentes también poseen un claro patrón pdd1, excepto en Cordillera, donde las perturbaciones parecen ser uniformes independiente de la escala, excepto a escalas medias donde tiene un pequeño incremento. En general, los cultivos permanentes representan el segundo uso de suelo con las perturbaciones más interconectadas, a excepción de Chacabuco y Melipilla, donde ocupan el tercer y primer lugar respectivamente.

Las superficies artificiales poseen un patrón de tipo pdd3 en las Provincias de Cordillera, Melipilla, Talagante y Santiago, mientras que en Chacabuco y Maipo parece ser de tipo Pdd1, y es el uso de suelo de origen antrópico con menor conectividad en sus perturbaciones en Chacabuco, Santiago y Talagante, mientras que en Cordillera, Maipo y Melipilla está por encima de la silvicultura.

Ésta última posee un patrón tipo pdd1 en Chacabuco, y Talagante, mientras que en Melipilla y Santiago parece ser de tipo pdd3. Talagante llama la atención debido a que la conectividad de las perturbaciones aumenta significativamente con la escala hasta estabilizarse a escalas medias ( $0.56 \text{ km}^2$ ) Cordillera y Maipo, al igual que en el caso de las configuraciones, poseen patrones anómalos en los que la conectividad se dispara, o se hunde a escalas medias, y vuelve a elevarse. El porqué de este tipo de comportamiento será analizado en el capítulo 6.

Las áreas naturales, al igual que a nivel regional, presentan un patrón de tipo pdd2, siendo en todas las Provincias el uso de suelo con los menores niveles de conectividad entre sus perturbaciones.

**Figura 5.2.9 Trayectorias de la configuración de la perturbación según tamaño de la ventana en las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago.**



Fuente: Elaboración propia



### Análisis de los perfiles de perturbación:

Al analizar el cruce entre composición y configuración se obtienen los perfiles de perturbación en las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago (Figura 5.2.10). Lo primero que se puede observar es cómo la gran mayoría de las trayectorias de los usos de suelo tiende a alinearse en torno al eje Pdd, con un alineamiento en torno al eje Pd a tamaños de ventana más grandes. A su vez, es posible observar que la localización del CP en el espacio [Pd, Pdd] varía enormemente de Provincia en Provincia, diferenciándolas entre sí, que varían desde Santiago [0,62, 0,05] hasta Talagante [0,67, 0,26].

A este nivel jerárquico se puede observar que existen claras diferencias entre los patrones de perturbación para un mismo uso de suelo de distintas Provincias, así como diferencias en los patrones de perturbación entre los usos de suelo de una misma Provincia. El hecho de que se puedan observar distintos patrones para un mismo uso de suelo a través de las Provincias, o que en el mismo uso de suelo el patrón cambie, denota que los roles de fuente y sumidero pueden variar entre las distintas Provincias, o dentro de una misma Provincia, y que se alternen según la escala de análisis (Zaccarelli, 2008).

Se puede observar que en las Provincias de la Región los perfiles de perturbación tienden a ser bastante dispersos, mostrando grandes diferencias entre los máximos y mínimos de Pd y Pdd para la mayoría de las Provincias, e incluso la Región (Cuadro 5.2.1), lo que denota sistemas de fuente/sumidero bastante contrastados en casi todas las Provincias.

**Cuadro 5.2.1 Diferencias entre máximo y mínimo para Pd y Pdd en la Región Metropolitana de Santiago y sus Provincias.**

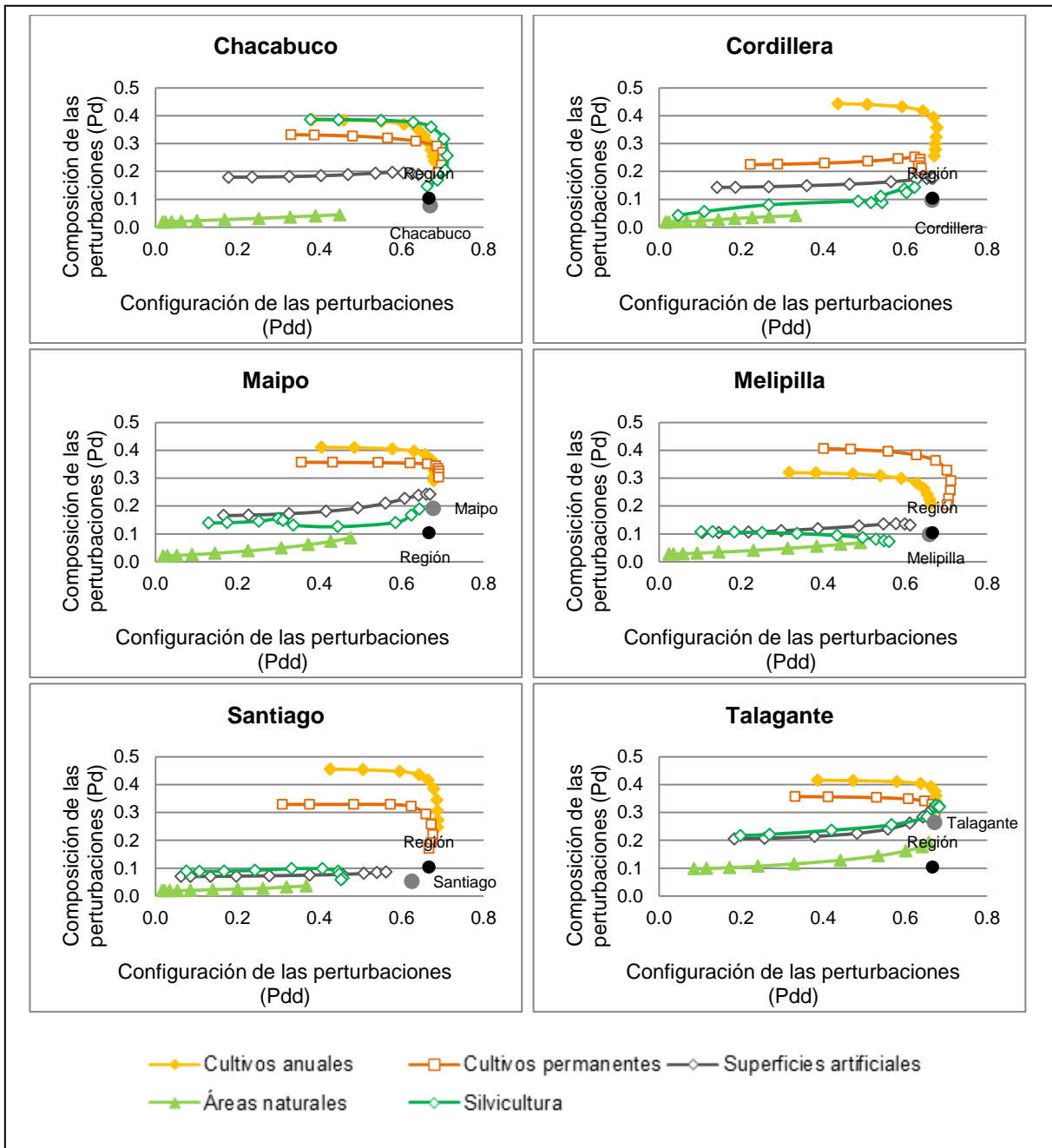
Unidad territorial	Pd (máx)	Pd (mín)	$\Delta Pd$	Pdd (máx)	Pdd (mín)	$\Delta Pdd$
RMS	0,37	0,02	0,35	0,69	0,02	0,67
Chacabuco	0,39	0,02	0,37	0,71	0,02	0,69
Cordillera	0,44	0,02	0,42	0,68	0,02	0,66
Maipo	0,41	0,02	0,39	0,69	0,02	0,67
Melipilla	0,41	0,03	0,38	0,71	0,03	0,69
Santiago	0,46	0,02	0,44	0,69	0,02	0,67
Talagante	0,42	0,10	0,32	0,68	0,09	0,60

Fuente: Elaboración propia.

Lo primero que puede observarse es que para todas las Provincias (excepto Chacabuco donde la silvicultura juega un rol igual de importante) los cultivos, tanto anuales como permanentes, constituyen el uso de suelo con la mayor composición y configuración de perturbaciones, situándose por encima del CP provincial e incluso regional, lo que denota el claro rol de fuente que estos dos tipos de usos de suelo constituyen. Lo particular de estos dos usos de suelo es que la conectividad tiende a estancarse e incluso a decrecer, orientando la trayectoria hacia el CP provincial, lo que denota que las perturbaciones en estos usos de suelo constituyen localidades altamente concentradas y conectadas, algo que va acorde a la geografía de la Región Metropolitana de Santiago, donde la gran

mayoría de la agricultura se desarrolla en estructuras geomorfológicas caracterizadas por su baja pendiente. También cabe señalar que en todas las provincias, las trayectorias de perturbación de estos dos usos de suelo se sitúan por encima del CP provincial, e incluso regional, lo que da cuenta del rol de fuente de perturbaciones que poseen estos usos de suelo respecto a sus provincias y a la región.

**Figura 5.2.10 Patrones de perturbación multiescalar, según uso/cobertura de suelo en las Provincias de la Región Metropolitana de Santiago**



Fuente: Elaboración propia.

Las superficies artificiales poseen trayectorias que varían enormemente de Provincia en Provincia, lo que permite observar que los usos de suelos asociados a esta clasificación se desarrollan de manera heterogénea en la Región. En Chacabuco, Cordillera, Melipilla y Santiago, las superficies artificiales poseen trayectorias que se sitúan por encima del CP Provincial y que se alinean en torno al eje de las abscisas, lo que indica que la composición de las perturbaciones originadas en estos usos de suelo no varía significativamente con la escala. No así, es la configuración que tiende a aumentar con la escala, por lo que a partir de estos factores se puede decir que las superficies artificiales actúan como fuentes en estas cuatro Provincias. Por ende, en estas cuatro Provincias, las superficies artificiales constituyen una fuente de perturbaciones, pero en una menor medida respecto a la agricultura anual y permanente.

En Maipo y Talagante, por otra parte, las superficies artificiales inician sus trayectorias por debajo del CP Provincial, lo que indica que a escalas locales, éstas tienden a comportarse como sumideros de perturbaciones. Pero a mayores escalas, entre los 0,56 y los 1,82 km<sup>2</sup>, las trayectorias se desarrollan por sobre el CP Provincial, pasando a poseer un comportamiento de fuente de perturbaciones. De acuerdo a Zaccarelli, et al. (2008), estos cambios entre fuente/sumidero a lo largo de las escalas sería causa de incongruencias con las trayectorias de otros usos de suelo, las cuales serán discutidas en el capítulo 6.

Las trayectorias de la silvicultura también varían según la Provincia que se analice. En Chacabuco poseen alta composición y configuración, situándose muy por encima del CP Provincial y ligeramente por encima de la agricultura anual. Este comportamiento da cuenta de que en esta provincia, la silvicultura constituye una fuente de perturbaciones. En la Provincia de Santiago, la trayectoria también se sitúa ligeramente por sobre el CP, pero tiende a estancarse en torno a Pdd = 0,46, cuando el CP se ubica en Pdd = 0,62. Esto indicaría que a grandes escalas (ventana > 6) la silvicultura se encontraría en un espacio poco perturbado, donde la única fuente de perturbación sería ésta.

En la Provincia de Talagante, la silvicultura se comporta como un sumidero a escalas pequeñas, puesto que se sitúa por debajo del CP Provincial. Ya a partir de la cuarta ventana (0,2 km<sup>2</sup>) la trayectoria se sitúa por sobre el CP Provincial, y pasa a comportarse como una fuente de perturbaciones. Lo contrario sucede en la Provincia de Melipilla, donde este uso de suelo se comporta como una fuente a escalas pequeñas, pero cuya trayectoria lo transforma en sumidero a grandes escalas. En otras palabras, a escalas locales la silvicultura actúa como una fuente de perturbaciones hacia sus entornos inmediatos, pero que a mayores escalas ésta recibe las perturbaciones de otros usos de suelo.

Maipo y Cordillera son dos casos especiales que para este uso de suelo presentan anomalías bastante extrañas en la trayectoria de éste. En el caso de Maipo, la composición de la perturbación cae súbitamente, mientras que la configuración se estanca a partir de quinta ventana, a los 0,56 km<sup>2</sup>, para luego volver a dispararse a octava ventana, a los 11,9 km<sup>2</sup>. En Cordillera, la anomalía es aún más extraña, pues la composición cae súbitamente a partir de la cuarta ventana (0,2 km<sup>2</sup>), vuelve a dispararse en la sexta ventana (1,8 km<sup>2</sup>) y vuelve a caer en la novena (24,5 km<sup>2</sup>) para volver a saltar

a la décima (45,6 km<sup>2</sup>). Con la configuración, se tiene que en las primeras ventanas se dan incrementos gigantescos de  $\Delta P_{dd} \text{ km}^{-1} = 0,68$  en la cuarta ventana, muy por encima de cualquier uso de suelo en toda la Región o sus Provincias, para luego retroceder en la sexta ventana, recuperarse muy levemente en la séptima, estancarse en la octava hasta la novena, y subir insignificadamente en la décima.

Las áreas naturales en todas las Provincias poseen trayectorias que se caracterizan por su baja composición y configuración de perturbaciones, y que se sitúan muy por debajo del CP Provincial. Este comportamiento podría ser explicado por la topografía de la Región, en donde las actividades antrópicas se desarrollan en los fondos de valle, mientras que en su gran mayoría, las colinas, cerros y cadenas montañosas, donde se encuentra gran variedad de ecosistemas, y que son de difícil acceso para el ser humano, se encuentran con bajos niveles de perturbación en comparación con los fondos de valle. Estas características convierten a las áreas naturales en sumideros de perturbaciones desarrolladas en otros usos de suelo.

### **5.3 Comparación intra e inter-escalar de los puntos de convergencia (CP) de los paisajes socioecológicos de la Región Metropolitana de Santiago y sus Provincias.**

Como se ha mencionado antes, el rol de los CP es cuantificar la intensidad de los patrones de perturbación en todo el paisaje socioecológico de un nivel político administrativo en cuestión. Si bien la composición y configuración de las perturbaciones están distribuidos de manera aparentemente aleatoria entre los subsistemas de la panarquía, los valores de CP provinciales serían correspondientemente similares a los de la región entera, de lo contrario, la composición y la perturbación relativa de los subsistemas sería responsable de las diferencias observadas en la distribución de las perturbaciones (Zaccarelli et al., 2008).

En el caso de estudio, los logaritmos de las razones de probabilidad muestran diferencias significativas en el caso de la composición (Pd), mas no en el caso de la configuración (Pdd), donde los valores tienden a ser bastante similares. Esto implica que si bien la composición sigue un patrón geográfico claro, es decir, hay zonas más perturbadas que otras, la configuración de las perturbaciones parece ser homogénea, es decir, presenta patrones de distribución/aglomeración similares en todas las Provincias de la Región. Por ello, se puede decir que la contribución de perturbaciones al CP regional varía de Provincia en Provincia, no obstante la distribución de las perturbaciones parece ser igual en todas éstas.

Yendo en más detalle sobre el comportamiento de las perturbaciones (Cuadro 5.3.1), los logaritmos de las razones de probabilidad más altos pertenecen a la Provincia de Talagante en el caso de Pd, lo que indicaría que ésta se comportaría como una fuente de perturbaciones a nivel regional, mientras que en lo que respecta a Pdd, la Provincia de Maipo posee el valor más alto, pero ubicándose por un mínimo margen por sobre el 0 (sin variedades entre los niveles jerárquicos), por lo que para efectos prácticos, no existe una variabilidad significativa en la aglomeración/conectividad de las perturbaciones con respecto al nivel regional.

Por otra parte, la Provincia de Santiago posee los menores valores para la composición de la perturbación (Pd), así como también en configuración (Pdd), lo que indicaría que esta Provincia actuaría como sumidero de perturbaciones, así como también sería aquella que posee las perturbaciones menos aglomeradas.

**Cuadro 5.3.1 Valores de CP para los SELs en Provincias en la panarquía de la Región Metropolitana de Santiago, sus razones de probabilidad (RP) y sus logaritmos (Log RP) respecto al nivel regional.**

SELs en unidad territorial	Pd				Pdd			
	Valor	RP	Log RP	Límites de confiabilidad <sup>9</sup>	Valor	RP	Log RP	Límites de confiabilidad <sup>1</sup>
RMS	0,104	-	-	-	0,667	-	-	-
Chacabuco	0,078	0,722	-0,325	[-0,330;-0,320]	0,671	1,018	0,017	[0,014;0,020]
Cordillera	0,097	0,924	-0,079	[-0,088;-0,071]	0,666	0,997	-0,003	[-0,008;0,003]
Maipo	0,191	2,061	0,723	[0,718;0,728]	0,678	1,051	0,050	[0,046;0,054]
Melipilla	0,098	0,931	-0,071	[-0,075;-0,068]	0,660	0,972	-0,028	[-0,031;-0,026]
Santiago	0,052	0,475	-0,744	[-0,750;-0,738]	0,625	0,835	-0,180	[-0,183;-0,177]
Talagante	0,264	3,074	1,123	[1,117;1,129]	0,672	1,026	0,026	[0,020;0,031]

Fuente: Elaboración propia.

<sup>9</sup> Límite de confiabilidad del 95% para los logaritmos de las razones de probabilidad

## Capítulo 6: Discusión

En este capítulo los resultados obtenidos a través de los métodos descritos en el capítulo IV y expuestos en el capítulo V son analizados en un contexto definido por el marco teórico, expuesto en el capítulo II, de manera que se pueda obtener un entendimiento más completo de los patrones de perturbación antropogénica en los usos de suelo de la Región Metropolitana de Santiago. Además, los resultados obtenidos en el capítulo V se pueden ver resumidos en el Anexo 1.

### 6.1 Sobre los perfiles de perturbación

Según Petrosillo et al. (2010), las perturbaciones antropogénicas, tales como los cambios en los usos de suelo, están determinadas por los componentes sociales de los SELs. Estos componentes consisten en grupos de personas organizados a distintos niveles jerárquicos (como por ejemplo: vivienda, pueblo, comuna, provincia, región y nación). Dentro de esta panarquía los participantes tienen distintas visiones respecto a qué estados de sistema son deseables a cada nivel. Cada sistema de uso de suelo en la panarquía es propenso a traslapar múltiples barreras tanto como de propiedad y como jurídicas, y caer al menos en tres niveles de decisión y control administrativo: Región, Provincia y Comuna, de los cuales sólo se estudiaron los dos primeros.

Los resultados obtenidos parecen coincidir con lo que se sabe respecto a las dinámicas de uso y cobertura de suelo en la Región Metropolitana de Santiago.

En el caso de los cultivos anuales y permanentes, llama la atención los altos niveles de perturbación detectados a nivel regional (Figura 5.1.5), considerando que las imágenes satelitales fueron tomadas con una diferencia de cuatro días entre las dos fechas (26-01-1997 y 30-01-2004), por lo que se esperaría que los cultivos anuales se encuentren en las mismas fases del ciclo adaptativo. No obstante, las enormes diferencias de NDVI entre ambas fechas, indicativas de la aparición de perturbaciones, permiten hipotetizar que tal cambio es producto de transformaciones en los tipos de cultivos (de una especie a otra), cambios en las prácticas agrícolas, como la expansión y homogenización de los cultivos, o incluso cambios en el uso de suelo. Estas observaciones parecen ser acordes a los variados procesos de conversión y reconversión de éstos descritos en los censos agropecuarios, plasmados en el capítulo III y expuestos nuevamente en los Cuadro 6.1.1 y Cuadro 6.1.2.

**Cuadro 6.1.1 Variación de superficie de cultivos anuales (en hectáreas) nivel regional entre los años 1997 y 2004. Región Metropolitana de Santiago.**

Actividad agrícola	1997-1998	2003-2004	Variación
Cereales	28.465	21.890	-30%
Leguminosas y tubérculos	3.593	4500	20,20%
Industriales	1.140	790	-44,30%
Total	33.198,00	27.180,00	-18,13%

Fuente: Elaboración propia en base a INE (1997) e INE (2004a)

**Cuadro 6.1.2 Variación de superficie de cultivos permanentes (en hectáreas) nivel regional entre los años 1997 y 2004. Región Metropolitana de Santiago.**

Actividad agrícola	1997-1998	2003-2004	Variación
Frutales	44.241	44.834	1,34%
Vides viníferas y pisqueras	8.261	10.680	29,28%
Total	52.502	55.514	5,74%

Fuente: Elaboración propia en base a CIREN-ODEPA (2004)

Respecto a las superficies artificiales, se observó que estas presentan niveles de perturbación moderados para la Región y sus Provincias, comportándose en todas como fuentes de perturbaciones, aunque en algunos casos existen cambios de comportamiento entre escalas. Contrario a lo que se podría pensar, procesos de perturbación característicos de las superficies artificiales, como la expansión urbana, se encuentran por debajo de aquellos generados en la agricultura (anual como permanente). Este comportamiento podría ser explicado por la escala temporal, en la cual la velocidad de transformación y expansión de los paisajes agrícolas es mayor a la de los paisajes con superficies artificiales, como se observó en el Capítulo III, y que, por ende, la proporción entre perturbaciones agrícolas y artificiales tendería a ser desigual.

Un aspecto único de las superficies artificiales es que tienden a ser permanentes. En otras palabras, una cobertura de suelo (Ej: áreas naturales) puede cambiar a superficies artificiales, pero es poco probable que suceda lo contrario. Esto implica que las perturbaciones detectadas en las superficies artificiales que puedan ser atribuidas a la expansión urbana alteran permanentemente los sistemas socioecológicos en donde tienen lugar, provocando la generación y/o modificación de las dinámicas, patrones y procesos de estos sistemas, así como la generación de nuevas propiedades de emergencia derivada de éstas (Por ejemplo: problemas de conectividad vial en la comuna de Quilicura debido a los procesos de dispersión urbana (Escudero, 2013) los cuales a su vez desencadenarían en problemas ambientales). Si bien lo mismo puede decirse de otros usos y coberturas de suelo, las superficies artificiales destacan en este aspecto ya que las modificaciones que provocan tienden a ser negativas desde el punto de vista ambiental, pues desarticularían permanentemente a los ESPs que se encuentran en el lugar de expansión.

En lo que respecta a la silvicultura, se tiene que ésta posee comportamientos bastante divergentes entre una Provincia y otra. Su rol de fuente en algunas Provincias como Chacabuco, o Talagante y Melipilla, podría traducirse en que el contagio de perturbaciones originarias de éstas hacia sus entornos inmediatos es bastante factible si se dan las condiciones adecuadas para un tipo de perturbación determinado (desde cambios en la propiedad de la tierra que permitan la expansión de la agricultura, hasta propagación de incendios). No obstante, dado su mínima proporcionalidad respecto a otras coberturas de suelo y como su rol de fuente de perturbaciones estaría limitado sólo a los paisajes inmediatamente contiguos, su relevancia sería mínima en comparación con los otros usos/coberturas de suelo.

Las áreas naturales, las cuales componen cerca del 68% de la Región, presentan perturbaciones muy escasas y dispersas en todas las Provincias. Esto podría deberse a la topografía característica de la Región Metropolitana de Santiago, en la cual la gran mayoría de las actividades antrópicas se llevan a cabo en los fondos de valle, dejando las medias y altas montañas con una intervención humana muy reducida y limitada a actividades muy específicas como la minería o la generación de energía. Esta topografía actuaría muchas veces como los límites de los sistemas antrópicos, pues el coste social, económico y ecológico de la expansión de estos límites sería restrictivo (la agricultura y la urbanización en alta montaña es económicamente poco rentable, por ejemplo).

## **6.2 Sobre los roles fuente-sumidero**

Confirmando lo observado por Zaccarelli et al. (2008), los patrones geográficos entre las Provincias, y los cuales son observados en el Cuadro 5.3.1 sugieren que entre los patrones de perturbación de las coberturas de suelo, existen roles fuente-sumidero llevados a cabo a través de las diferentes escalas por diferentes SELs y usos de suelo en la panarquía en lo que se refiere al potencial de dispersión de los agentes de perturbación a las áreas circundantes (Zaccarelli, et al., 2008). En el caso de estudio, se tiene que tanto Maipo como Talagante, dos comunas con más del 40% de su superficie dedicada a la agricultura (Figura 5.2.1) actúan como potenciales fuentes de perturbación a nivel regional. El porqué de esto estaría dado por el rol de las áreas naturales como amortiguador de las perturbaciones, puesto que estas dos Provincias son también las que menos áreas naturales poseen (46% y 37% aproximadamente), y serían las que estarían menos limitadas por la topografía regional, al ubicarse en zonas de baja altitud y baja pendiente (Figura 6.4.1).

## **6.3 Sobre las incongruencias**

Las relaciones que se dan entre los usos de suelo en el espacio [Pd, Pdd] pueden llevar a incongruencias, o *mismatches* entre escalas, las cuales juegan un papel crucial en las dinámicas de los SELs, pues de ellas pueden esperarse consecuencias espaciales cuando las escalas espaciales de gestión, y las escalas espaciales de los procesos ecosistémicos no se alinean, llevan a ineficiencias, pérdida de componentes importantes del sistema ecológico, y finalmente, disrupción de los SELs (Cash, et al. 2006, citado en Zaccarelli, et al., 2008; Cumming, et al., 2006, citado en Petrosillo, et al., 2010). Las incongruencias son derivadas de los procesos sociales, políticos y económicos inherentes a la tenencia del suelo, los cuales constituyen la jerarquía de instituciones político-sociales que manejan la propiedad, uso, y gestión de los recursos del suelo (Petrosillo, et al., 2010). Estas incongruencias, que se dan cuando dos usos de suelo poseen perfiles de perturbación distantes para una misma ventana (líneas punteadas en la Figura 5.1.3), pueden indicar el rol fuente-sumidero que tienen esos usos de suelo entre sí, a la misma escala, o inter-escalar, llevando a disrupciones en las dinámicas de los SELs (Ej. Cuando una zona natural con pocas perturbaciones se encuentra rodeada por cultivos anuales altamente perturbados).



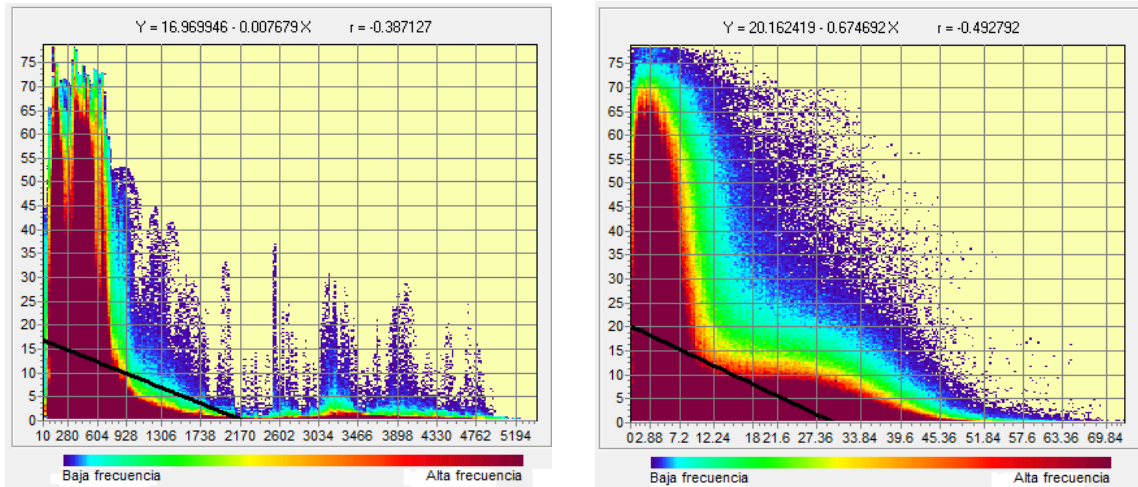
#### **6.4 Sobre la resiliencia espacial**

Se puede obtener una idea de cómo los SELs podrían lidiar con las consecuencias de estas incongruencias entre usos de suelos. En los perfiles de perturbaciones (Figura 5.1.3 y Figura 5.2.10), y en la distribución espacial de éstos (Figura 5.1.1, Figura 5.2.2, Figura 5.2.3, Figura 5.2.4, Figura 5.2.5, Figura 5.2.6, y Figura 5.2.7) es posible observar claramente algunas de las variables internas de la resiliencia espacial de los paisajes socioecológicos de la Región, y las Provincias. La organización espacial de los SELs tiene un patrón muy marcado en todas las provincias, en que los cultivos anuales y permanentes, así como la silvicultura tienden a desarrollarse en proximidad de las superficies artificiales asociadas a los asentamientos humanos, mientras que todos estos usos de suelo están rodeados por áreas naturales. Los límites del sistema están muy marcados por la topografía regional donde, como se ha mencionado anteriormente, existe una fuerte correlación negativa entre la presencia de perturbaciones y la pendiente, así como también con la altitud (Figura 6.4.1, y Figura 6.4.2). Mientras que también es posible observar variables externas de los SELs, como por ejemplo la conectividad, aparentemente alta entre los cultivos anuales y permanentes dada su proximidad espacial, y que también parece reflejarse en la alta configuración de las perturbaciones de estos usos de suelo. Finalmente, el otro aspecto externo de la resiliencia espacial que es posible observar son las relaciones fuente-sumidero entre los usos de suelo, que ya han sido descritas.

A partir de todo lo anterior se puede desprender lo siguiente: los altos niveles de perturbación en los cultivos tanto anuales como permanentes en el periodo de estudio, parecen indicar que la resiliencia de los EPSs que se encuentran en éstos hacia las perturbaciones fue considerablemente baja. La resiliencia de la silvicultura también parece ser baja, aunque varía entre Provincias, siendo baja en Chacabuco, y alta en Melipilla. Las superficies artificiales, por sus moderados niveles de perturbación en todas las Provincias, parecen ser relativamente resilientes en el corto plazo. Mientras que las áreas naturales son altamente resilientes en el corto plazo, principalmente debido a la protección que la topografía les brinda respecto a las actividades antrópicas.

Similar a la resiliencia, la vulnerabilidad de los ESPs, estudiada por Zurlini, et al. (2006) y Petrosillo, et al. (2010), tendería a ser mayor en las escalas donde la perturbación es más probable, y donde ésta se encuentra más aglomerada. Petrosillo, et al. (2010), al adoptar el filtro grueso (coarse filter), asumen que los ESPs se encontrarían en las áreas naturales y en los cultivos permanentes, los cuales sostendrían la mayoría de los componentes (poblaciones, especies, grupos funcionales, redes alimenticias, tipos de hábitat o mosaicos de hábitat) que colectivamente producen los servicios ecosistémicos. De acuerdo a estos autores, mientras mayor sea la diferencia en la composición entre dos usos de suelo (Cultivos anuales y áreas naturales), mayor será la vulnerabilidad de los ESPs en las áreas naturales, pues en aquellos lares donde las áreas naturales estén rodeadas por zonas agrícolas será más probable que las perturbaciones de las segundas se expandan hacia las primeras. Como se mencionó anteriormente, la posibilidad de que esto ocurra dependerá de la resiliencia espacial de las áreas naturales.

**Figura 6.4.1 Correlación entre altitud (msnm) y composición y pendiente y composición de las perturbaciones.**

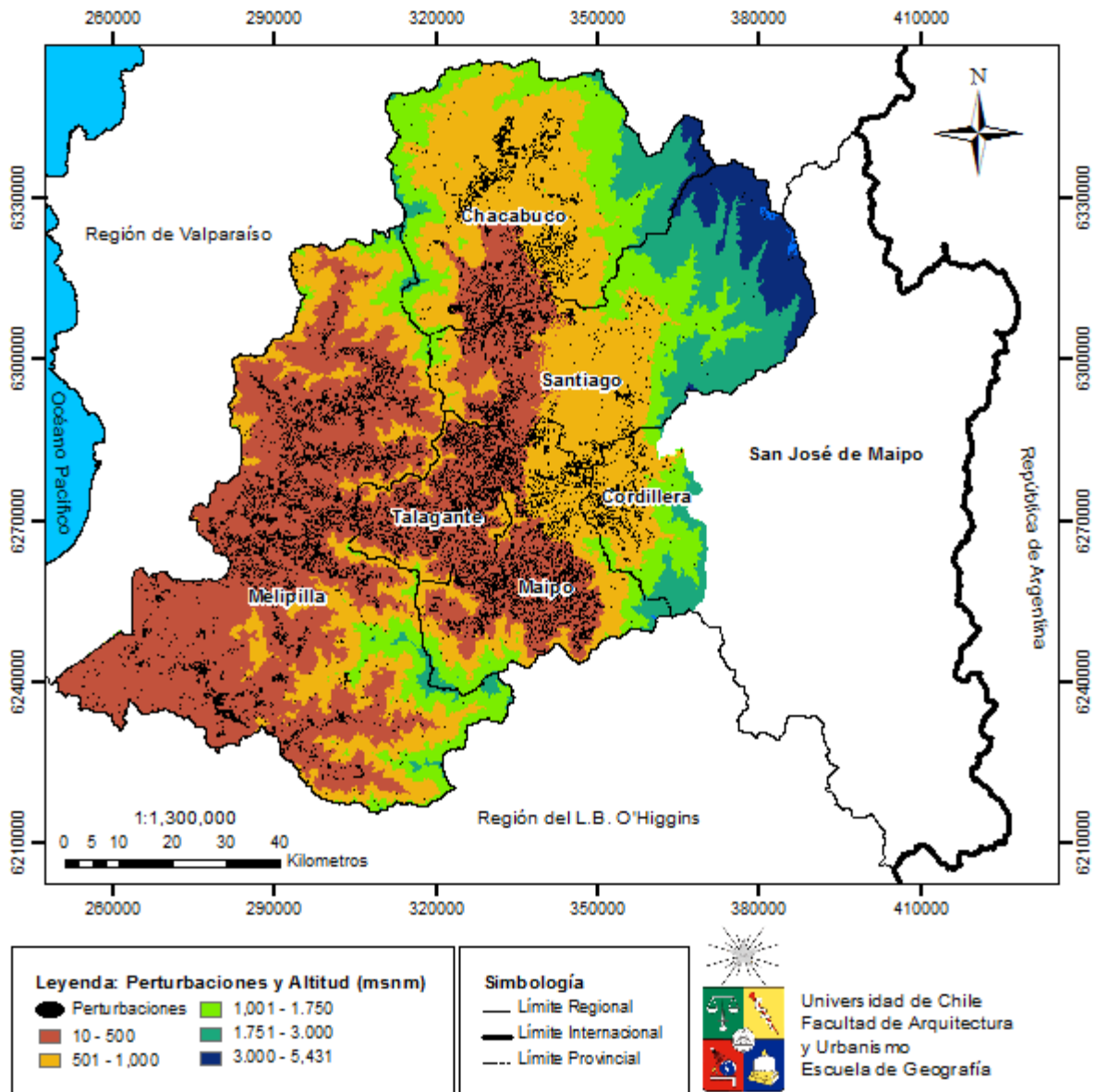


a) Correlación entre altitud (eje x) y Pdd (eje y)

b) Correlación entre Pendiente (eje x) y Pdd (eje y)

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.4.2 Distribución de las perturbaciones según altitud (msnm) en la Región Metropolitana de Santiago.**



Fuente: Elaboración propia.

## 6.5 Comparando la Región Metropolitana de Santiago con Apulia, Italia

Contrastando los resultados obtenidos con los de Zaccarelli, et al. (2008), la principal diferencia se observa es la enorme diferencia que existe entre los regímenes de perturbación de la Región Metropolitana de Santiago (Figuras 5.1.3 y 5.2.4), y los de la Región de Apulia, en Italia (Figura 6.5.1 y Figura 6.5.2). Apulia destaca por sus bajísimos regímenes de perturbación en comparación a la RMS. No obstante, hay que considerar que la clasificación de los usos de suelo en el trabajo de Zaccarelli et al. (2008) difiere de la clasificación utilizada en la presente memoria, ya que los organismos encargados de crear las cartas de uso de suelo [Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (GORE RMS) en la RMS y la Agencia Ambiental Europea (AAE) en Europa] poseen distintos criterios para la clasificación de uso de suelo, resultando en agregaciones distintas entre los dos trabajos. Sin embargo, algunos paralelos pueden ser dibujados. Los cultivos anuales constituyen las principales fuentes de perturbación en ambas regiones, mientras que las áreas naturales son sumideros. No obstante, los cultivos permanentes en Apulia también son sumideros, mientras que en la RMS son fuentes de perturbación. Esto puede deberse a que en Italia las prácticas agrícolas se encuentran bien consolidadas, mientras que en Chile éstas han sufrido cambios debido al enfoque adoptado por la política agrícola “Chile potencia alimentaria” (MINAGRI, 2000).

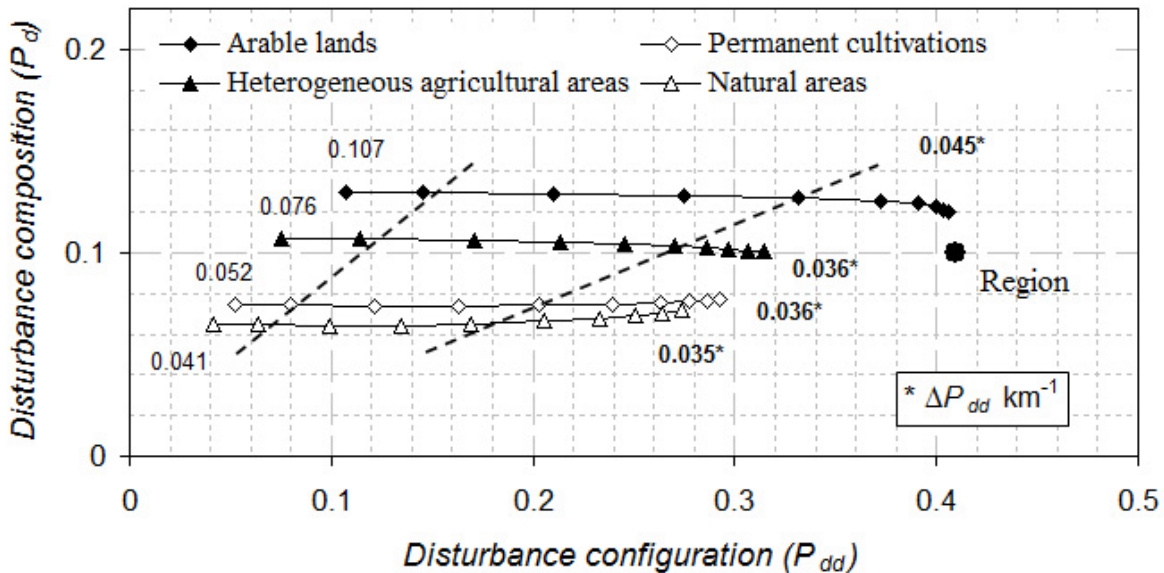
Esto llama la atención en el sentido de que, en Apulia, las áreas naturales y los cultivos permanentes tienen el potencial para aumentar la resiliencia de los SELs al actuar como reguladores y compensadores de perturbaciones. Sin embargo, los cultivos permanentes constituyen una fuente de perturbación en la Región Metropolitana de Santiago. Esto, sumado a la distribución espacial de las coberturas de suelo, fuertemente marcada por la topografía, en donde las coberturas antrópicas se sitúan principalmente en fondo de valle, y las naturales en medias y altas montañas, dificulta dicho rol de compensador/regulador que podrían ejercer los sumideros.

Por otra parte, los roles fuente-sumidero están mucho más marcados entre las Provincias de Apulia (Cuadro 6.5.1) que en la RMS (Cuadro 5.3.1), siendo Foggia la principal fuente de perturbaciones, y Bari el principal sumidero (Figura 6.5.2). A su vez, Foggia es donde las perturbaciones están más aglomeradas, mientras que en Brindisi es donde están más dispersas. En contraste, Talagante es la provincia donde hay una mayor proporción de perturbaciones, y que actuaría como fuente, mientras que Santiago sería la menos perturbada debido a la poca variación en lo que a cobertura vegetativa se refiere durante el periodo de estudio. En lo que respecta a configuración, todas las Provincias de la RMS presentan comportamientos similares, exceptuando Santiago, lo que indica que en éstas las perturbaciones se encuentran igualmente aglomeradas. No obstante, la Provincia donde más están aglomeradas es en Maipo, con un margen menor a 0,1 en Log RP respecto al resto de las Provincias.

Finalmente, es importante señalar que los roles fuente-sumidero entre las Provincias puede estar fuertemente influenciado por el sesgo estadístico que provocan las áreas naturales de alta montaña en la Región, las cuales son prácticamente inmunes a las

perturbaciones en el corto plazo, salvo por actividades como la minería y la generación de energía. Si se considerasen solamente las áreas naturales de baja montaña, los roles fuente-sumidero de perturbaciones antrópicas podrían cambiar drásticamente.

**Figura 6.5.1 Patrones de perturbación multiescalar, según uso/cobertura de suelo en la Región de Apulia, Italia.**



Fuente: Zaccarelli, et al. (2008)

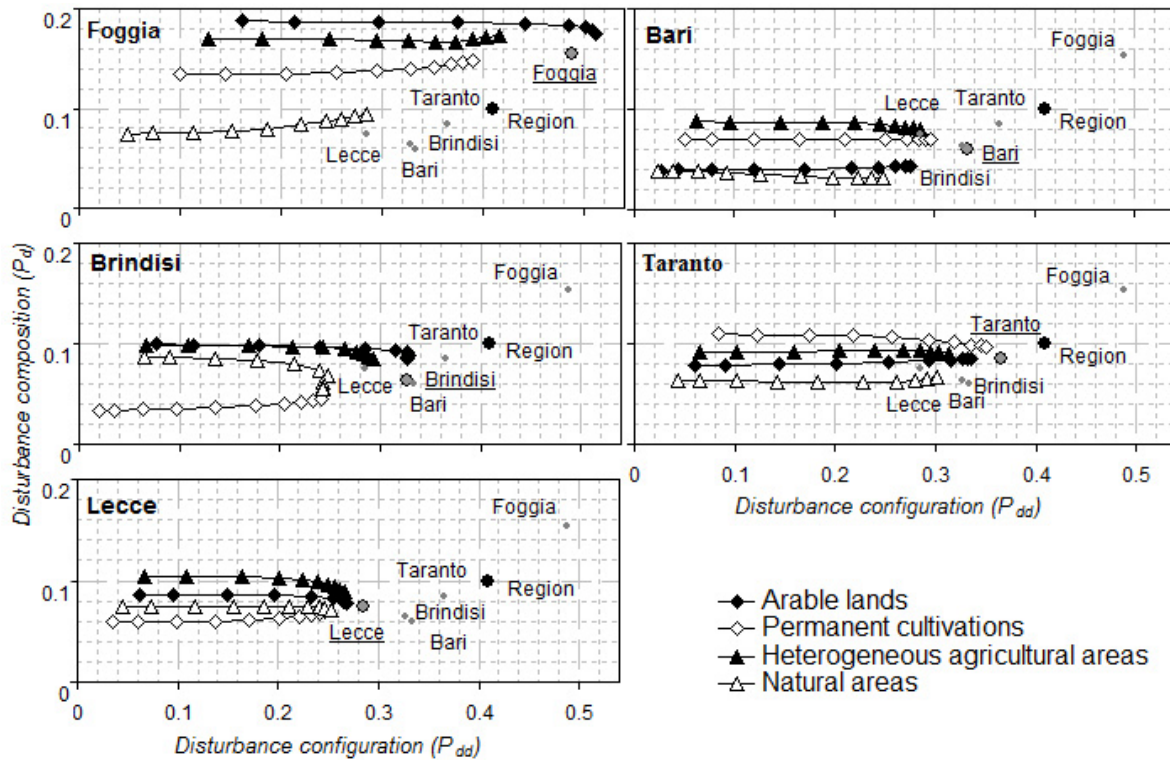
**Cuadro 6.5.1 Valores de CP para los SELs en Provincias en la panarquía de la Región de Apulia, Italia, sus razones de probabilidad (RP) y sus logaritmos (Log RP) respecto al nivel regional.**

SELs en unidad territorial	Pd			Pdd		
	RP	Log RP	Límites de confiabilidad <sup>10</sup>	RP	Log RP	Límites de confiabilidad <sup>1</sup>
<i>Bari</i>	0,564	-0,572	[-0,576; -0,568]	0,707	-0,347	[-0,352; -0,343]
<i>Brindisi</i>	0,615	-0,486	[-0,491; -0,480]	0,691	-0,370	[-0,377; -0,363]
<i>Foggia</i>	1,638	0,494	[0,491; 0,496]	1,355	0,303	[0,301; 0,306]
<i>Lecce</i>	0,719	-0,330	[-0,334; -0,325]	0,564	0,572	[-0,578; -0,567]
<i>Taranto</i>	0,836	-0,179	[-0,184; -0,175]	0,817	-0,202	[-0,207; -0,197]

Fuente: Modificado de Zaccarelli, et al. (2008)

<sup>10</sup> Límite de confiabilidad del 95% para los logaritmos de las razones de probabilidad

**Figura 6.5.2 Patrones de perturbación multiescalar, según uso/cobertura de suelo en las Provincias de la Región de Apulia, Italia.**



Fuente: Zaccarelli, et al. (2008)

## **Capítulo 7: Conclusiones**

### **7.1 Resumen de la investigación**

Como sistemas complejos y adaptativos, los paisajes socioecológicos forman parte de una panarquía donde las interrelaciones que se dan entre éstos producen transformaciones. Estas transformaciones, las cuales responden a condiciones multiescalares, tanto sociales (e.g: economía global, regional y local) como ecológicas (condiciones climáticas globales y regionales), influyen en las dinámicas de cambio de uso y cobertura de suelo, las cuales finalmente constituyen perturbaciones, pues al alterar los componentes de un sistema ecológico, o incluso social, se alteran consecuentemente los ciclos adaptativos de los proveedores de servicios ecológicos (ESPs), y consecuentemente servicios ecosistémicos que éstos proveen.

Durante la presente investigación se analizaron los patrones de perturbación, operacionalizados como cambios en la cobertura vegetal, a través de múltiples escalas espaciales para cinco coberturas de uso de suelo: cultivos anuales, cultivos permanentes, silvicultura, superficies artificiales (tales como la urbanización y la minería), y áreas naturales. Se encontró que a nivel regional, los cultivos anuales y los cultivos permanentes constituyeron la mayor fuente de perturbaciones en el área de estudio para el periodo estudiado. Le siguen con regímenes medios, las zonas urbanas y silvícolas. Las áreas naturales, por otra parte, constituyen sumideros de perturbaciones. Se halló que estos regímenes de perturbación, y su probable expansión, están fuertemente condicionados por la topografía de la Región, presentando dependencias tanto de la altura como de la pendiente en lo que a la distribución espacial respecta.

A diferencia de lo encontrado por Zaccarelli, et al. (2008), las Provincias estudiadas no presentaron diferencias importantes en cuanto a la configuración y composición de las perturbaciones en general, lo que indica que éstas se comportan de manera relativamente homogénea en cuanto al aporte de perturbación al nivel regional. La excepción es la Provincia de Talagante donde es claramente una fuente de perturbaciones, mientras que la Provincia de Santiago podría ser catalogado como un sumidero debido a la poca variación en la cobertura vegetal en comparación con las otras Provincias.

### **7.2 Conclusiones de los resultados en general**

El entendimiento de las interacciones complejas que se dan entre los distintos sistemas socioecológicos, y como estas se manifiestan en el espacio geográfico a través de perturbaciones, es importante para la comprensión de las dinámicas de uso de suelo y para el desarrollo de la sustentabilidad. Durante el periodo de estudio, en la Región Metropolitana de Santiago, la principal fuente predominante, tanto a nivel regional como provincial, se encuentra en los cultivos anuales, seguidos por los cultivos permanentes. Las superficies artificiales, como la urbanización y la minería, constituyen la tercera fuente de perturbaciones predominante, aunque hay Provincias como Melipilla, Santiago y Chacabuco, donde la silvicultura posee un rol un tanto más protagónico. Por lo tanto, al contrario de lo que se pensó en un principio, los cultivos permanentes no constituyen un

sumidero, sino una fuente de perturbaciones, mientras que las superficies artificiales poseen un rol mucho menor al hipotetizado, y la silvicultura varía su rol según la escala espacial.

La escala espacial juega un rol clave en las dinámicas de los paisajes socioecológicos, y entenderlas y abordarlas correctamente es esencial para una gestión sustentable y eficaz. Respecto a ello, las múltiples discordancias entre cultivos tanto anuales como permanentes, y superficies artificiales, áreas naturales y silvícolas implican que los agentes de perturbación provenientes desde la agricultura, como puede ser la contaminación con insecticidas o herbicidas, pestes, así como expansión agrícola, podrían esparcirse con mayor facilidad a los paisajes aledaños a los sistemas agrícolas. No obstante, se requieren mayores estudios, y con mayor especificidad al respecto para poder validar completamente esta hipótesis, puesto que los resultados obtenidos sólo indican la existencia de un problema entre estos usos de suelo y no profundizan ni analizan estos problemas.

Los agentes de perturbación provenientes de las distintas coberturas y usos de suelo que cubren el espacio geográfico no están distribuidas homogéneamente en éste, y, en el caso de la Región Metropolitana de Santiago, muestran un claro patrón de organización en las cuales pareciera que las áreas de baja pendiente y de altitud baja o media son preferenciales para los sistemas antrópicos. En este sentido, los cambios en la cobertura vegetal en la Región se encuentran, tanto en cantidad como en distribución de éstos, repartidos de manera relativamente homogénea entre las Provincias. Ahora, si bien hay Provincias como Maipo y Talagante que se podría decir que aportan la mayor cantidad de perturbación en la Región, su contribución es marginal cuando se le compara con otras Regiones como Apulia, en Italia, donde la contribución de las Provincias a la perturbación Regional es más notoria, y además poseen una menor proporción de áreas naturales que sus pares provinciales.

Por ello es posible decir que no hay Provincias en la RMS que puedan ser consideradas como grandes fuentes de perturbación, sino que todas contribuyen de manera relativamente equitativa a la Región, y que, por ende, la gestión de la perturbación podría ser abordada desde una escala más general (a nivel regional), por sobre una escala más local (provincial, o comunal).

En este sentido, las áreas naturales juegan un papel clave puesto que podrían actuar como reguladores y compensadores de las perturbaciones antrópicas, aumentando la resiliencia de los SELs de la Región. Sin embargo, y considerando la distribución espacial de las coberturas de suelo, dicho rol se encuentra dificultado por la ausencia de una cobertura de suelo que actúe como estabilizadora (como lo es el caso de los cultivos permanentes en la Región de Apulia), por lo que la planificación debiese incluir algún mecanismo para establecer coberturas de suelo que puedan cumplir dicho rol.



### 7.3 Conclusiones del método

Las metodologías que se utilizaron en esta investigación pueden ser divididas y analizadas en varias partes. No obstante, las dos secciones más importantes son la principal (aquella con la que se llegó a los resultados a partir de los datos preparados: Capítulo IV, secciones 4.4 a 4.8), y la de definición de escala temporal (Capítulo IV, sección 4.6).

El método principal utilizado en esta investigación, propuesto por Zaccarelli, et al. (2008) es derivado del índice de fragmentación forestal de Riitters (Riitters, et al., 2000). Éste constituye una potencial innovación en el análisis y cuantificación multiescalar de elementos espacialmente discretos, como pueden ser los usos y cobertura de suelo y sus cambios espacio-temporales; el análisis de redes biológicas, o de expansión urbana.

Sin embargo, se encontró que el método posee dos importantes aspectos que dificultan la comparación con otros estudios, las cuales están relacionadas con el tamaño del área de estudio y de las coberturas de suelo. El primer aspecto hace referencia al tamaño del área de estudio y su incidencia en la cuantificación de las perturbaciones. Esta cuantificación, como se observó en la metodología, clasifica los píxeles de NDVI diferencial estandarizado que se encuentren en los 5% más extremos. Por ende, cuáles serán estos píxeles dependerá del tamaño de la imagen que componga el área de estudio, puesto que ello implicaría mayor variabilidad de los valores y de los extremos. Otro factor importante del método es la arbitrariedad de la selección del criterio que definen los extremos, pues se puede decir que, junto con lo anterior, la comparación entre los resultados y conclusiones de distintos estudios llega a ser dificultosa.

Por otra parte, la agregación de las clasificaciones de uso de suelo para el análisis depende netamente del criterio que se utilizó para definir dichas clasificaciones de uso de suelo. En otras palabras, los resultados dependen de la carta de uso de suelos con la que se trabaje, y por ende, la comparación con otros estudios dependerá de los criterios que se utilizan para generar las categorías de uso de suelo.

Otro punto a considerar constituye la superficie de los usos/coberturas de suelo que se analicen. Al respecto se encontró que los usos y/o coberturas de suelos que posean una superficie demasiado pequeña (Silvicultura en Cordillera y Maipo) tendrán anomalías en los perfiles de perturbación que entorpecerán el análisis.

A partir de estos aspectos, se tiene que el método principal, sin una forma estandarizada, dificulta la comparación con otros estudios, lo que implica una mayor dificultad para formar generalidades que permitan ampliar el entendimiento de las dinámicas de cobertura y uso de suelo.

En lo que respecta al método de definición de escala temporal, no se puede decir que se haya obtenido un resultado que minimice los cambios vegetativos por procesos naturales, pues no se hizo ninguna cuantificación, ni análisis, ni comparación al respecto. No obstante, este método puede llegar a ser un tanto contraproducente al arrojar fechas que

están bastante alejadas del presente, y los resultados obtenidos pueden llegar a tener poca utilidad práctica en la toma de decisiones.

#### **7.4 Aportes teóricos y prácticos, e implicancias para la geografía**

El corpus teórico de la complejidad abre nuevas posibilidades para re-entender e interrelacionar patrones y procesos de un modo y con un lenguaje que si bien es difícil de entender en un principio, posee el potencial para facilitar y potenciar la comunicación inter-disciplinaria a fin de fortalecer el desarrollo del conocimiento y la generación de soluciones a las problemáticas más urgentes del ser humano contemporáneo. Sin embargo, su extensión está limitada a solo pocos académicos e investigadores, que si bien son de varias disciplinas, se encuentran principalmente en la ecología. No obstante, la geografía, como disciplina con un razonamiento holístico e integrador, podría nutrirse de un enriquecimiento importante si llegase a adoptar algunos de los conceptos de la ciencia de la complejidad y del estudio de los sistemas socioecológicos en su lenguaje y sus prácticas.

En lo que respecta al estudio de las dinámicas de uso y cobertura de suelo, la presente investigación otorga evidencia de la variación en el comportamiento de las coberturas de suelo en función de la escala espacial de observación, lo que podría ser un pequeño aporte al entendimiento de este campo de estudio. Esto, sumado con la hipótesis de que la cobertura vegetal está relacionada con la resiliencia espacial de los paisajes socioecológicos, y la evidencia encontrada sobre la falta de una cobertura de suelo que actúe como estabilizadora en los sistemas antrópicos en la Región Metropolitana de Santiago, podría contribuir al conocimiento que se tiene de los paisajes socioecológicos de la Región y que, en consecuencia, entregaría otras perspectivas para abordar el desarrollo sustentable de la ésta.

Finalmente, la posibilidad de cuantificar y analizar múltiples escalas espaciales, distintas a las definidas por la división político-administrativa o por variables físico-geográficas como cuencas, permite abordar los problemas geográficos y territoriales desde una perspectiva mucho más integradora al considerar escalas muy locales, o muy generales, utilizando métodos de percepción remota. Esto, combinado con los métodos cualitativos y cuantitativos de la geografía, podría abrir nuevas puertas a nuevos entendimientos del espacio geográfico.

## Capítulo 8: Bibliografía

- **Agresti, A.** (1996). *An Introduction to Categorical Data Analysis*, Wiley and Sons, New York, New York, USA.
- **Alcama, J., & Bennet, E;** (2003). *Ecosystems and Human Well-Being. A framework for assessment*. Island Press. Washington DC.
- **Allen, T. H., & Starr, T. B.** (1982). *Hierarchy: Perspectives for ecological complexity*. Chicago: The University of Chicago Press.
- **Alvear, F.** (2003) *El entorno socioeconómico y laboral de la Región Metropolitana*. Departamento de Estudios. Dirección del Trabajo.
- **Ambrosio Albalá, M.** (2007). *Los territorios rurales como sistemas complejos en transición: resiliencia y capacidad adaptativa*. En **M. Ambrosio Albalá**, *Elementos Institucionales en las zonas rurales: una propuesta metodológica para su identificación y valoración en comarcas de Andalucía y Nicaragua*. Universidad de Córdoba.
- **Ambrosio-Albalá, M., & Bastiaensen, J.** (2010). *The new territorial paradigm of rural development: Theoretical foundations from systems and institutional theories*. University of Antwerp.
- **Anderies, J. M., Janssen, M. A., & Ostrom, E.** (2004). *A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective*. *Ecology and Society* 9(1): 18.
- **Anderies, J. M., Walker, B. H., & Kinzig, A. P.** (2006). *Fifteen Weddings and a Funeral: Case Studies and Resilience-based Management*. *Ecology and Society* 11(1): 21.
- **Armijo G., & Caviede, H.** (1997) *El avance de la urbanización del campo en la región metropolitana de Chile y sus efectos espaciales*. *Anuales Universidad de Chile* No. 5 (1997): oct., serie 6.
- **Armijo. G.** (2000) *La Urbanización del campo metropolitano de Santiago: crisis y desaparición del hábitat rural*. *Revista de Urbanismo* n°3. Recuperado Julio, 12, 2012. <http://www.revistas.uchile.cl/index.php/RU/article/viewFile/11785/12148>
- **Azócar, G., Sanhueza, R., Aguayo, M., Romero, H., & Muñoz, M. D.** (2005). *Conflicts for control of Mapuche-Pehuenche land and natural resources in the Biobío highlands, Chile*. *Journal of Latin American Geography*, 57-76.
- **Berkes, F. & Folke, C.** (1998). *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press, New York.
- **Berkes, F., Folke, C., & Colding, J.** (2000). *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge University press, Cambridge, UK.
- **Boisier, S.** (1998). *Post-scriptum sobre desarrollo regional: Modelos reales y modelos mentales*. *EURE (Santiago)*, 24(72), 53-69. Recuperado Julio, 22, 2012. Sitio web: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0250-71611998007200003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71611998007200003&lng=es&tlng=es). 10.4067/S0250-71611998007200003.
- **Bustos, N.** (1998) *El ordenamiento y planificación territorial en Chile: elementos para su discusión*. *Revista de Geografía Norte Grande*, 25: 49-53
- **Cash, D. W., W. Adger, F. Berkes, P. Garden, L. Lebel, P. Olsson, L. Pritchard, and O. Young.** (2006). *Scale and cross-scale dynamics: governance and information in a multilevel world*. *Ecology and Society* 11(2): 8.

- **Cadenasso, M. L., Pickett, S. A., & Grove, J. M.** (2006). *Dimensions of ecosystem complexity: heterogeneity, connectivity and history*. *Ecological Complexity*, 3, 1-12.
- **Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M., & Abel, N.** (2001). *From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What?* *Ecosystems*, 765-781.
- **Chamberlain, K. T.** (2012). *Applying Natural System Metaphors to the Force Modernization Process*. The Land Warfare Papers. Association of the United States Army.
- **Chavez, P.S.** (1988). *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. *Remote Sensing of Environment* 24(3)
- **Chavez, P.S.** (1996). *Image-Based Atmospheric Corrections Revisited and Improved*. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*.
- **CIREN – ODEPA** (2004) *Catastro Frutícola, Principales Resultados*. Región Metropolitana.
- **Clark, W.** (2010) *Principles of Landscape Ecology*. *Nature Education Knowledge* 3(10):34
- **Climate Prediction Center. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).** (online). *Changes to the Oceanic Niño Index*. Recuperado Noviembre, 10, 2013. Sitio web: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)
- **Collier, J., & Hooker, C. A.** (1999). *Complexly organised dynamical systems*. *Open Systems and Information Dynamics*, 241-302.
- **CONAF – CONAMA** (2003) *Catastro y Usos de Suelo y Vegetación*. Región Metropolitana.
- **Cumming, G. S.** (2011). *Spatial Resilience in Social-Ecological Systems*. Cape Town: Springer.
- **Cumming, G. S., & Collier, J.** (2005). *Change and identity in Complex Systems*. *Ecology and Society*.
- **Cumming, G. S., Barnes, G., & Southworth, J.** (2008). *Environmental asymmetries*. En **J. Norberg, & G. S. Cumming**, *Complexity theory for a sustainable future* (15–45). New York: Columbia University Press.
- **Cumming, G.S., Cumming, D.H.M., & Redman, C.L.** (2006). *Scale mismatches in social-ecological systems: causes, consequences, and solutions*. *Ecology and Society* 11(1), 14.
- **Davis, W. M.** (1899). *The geographical cycle*. *Geograph J*.
- **De Mattos, C.** (1999). *Santiago de Chile, globalización y expansión metropolitana: lo que existía y sigue existiendo*.
- **Dolisca, F., McDaniel, J. M., Teeter, L. D., & Jolly, C. M.** (2007). *Land tenure, population pressure, and deforestation in Haiti: The case of Forêt des Pins Reserve*. *Journal of Forest Economics*, 277–289.
- **Ducci, M.A.** (2002) *Área urbana de Santiago 1991-2000: expansión de la industria y la vivienda*. *EURE* (Santiago), 28(85), 187-207. Recuperado Mayo, 24, 2013. Sitio web: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0250-71612002008500010&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612002008500010&lng=es&tlng=es). 10.4067/S0250-71612002008500010.
- **Dirección General de Aguas.** (2014) Registros de precipitación para los años 1992-2012. Información pública, accedido 2014.
- **Eastman, J. R.** (2012). *IDRISI Selva Manual*. Clark Labs.

- **Eastman, J.R.** (2009) *IDRISI Guide to GIS and Image Processing*. En IDRISI Selva. Worcester, MA: Clark University: [pág 170].
- **Ecological Society of America.** *Ecosystem services: A primer*. Documento online.
- **Escudero, C.** (2013). “*Análisis de la evolución de la infraestructura de transporte urbano entre 1992 –2012 y las condiciones de accesibilidad y conectividad en la comuna de Quilicura*”. Recuperado Mayo, 20, 2013. Sitio web: <http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/113862>
- **Etienne, R., & Osorio, M.** (1989). *Pompeya, la ciudad bajo las cenizas*. Madrid: Aguilar.
- **Evans, G. R.** (2008). *Transformation from “Carbon Valley” to a “Post-Carbon Society” in a Climate Change Hot Spot: the Coalfields of the Hunter Valley, New SouthWales, Australia*. Ecology and Society.
- **Fortin, M-J., B Boots, F. Csillag, & T.K. Rempel.** (2003). *On the role of spatial stochastic models in understanding landscape indices*. Oikos 102:203-212.
- **Fradkov, A. L., Miroshnik, I. V., & Nikiforov, V. O.** (1999). *Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- **García, R.** (1994). *Interdisciplinarietà y sistemas complejos*. En **E. Leff**, *Ciencias sociales y formación ambiental* (85-124). Barcelona: Editorial Gedisa.
- **Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (GORE RMS).** (2003) *Carta de uso de suelos para la Región Metropolitana de Santiago, año 2003*.
- **Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (GORE RMS).** 2009. *Atlas Regional 2009. Región Metropolitana de Santiago*.
- **Goslee, S.** (2011) *Analyzing Remote Sensing Data in R: The Landsat Package*. Journal of Statistical Software July 2011, Volume 43, Issue 4.
- **Gunderson L. H. & Holling C.S.** (2002). *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Washington, DC: Island Press.
- **Goldstone J.** (1991). *Revolution and rebellion in the early modern world*. Berkeley (CA): University of California Press.
- **Haan, J.** (2006). *How emergence arises*. Ecological Complexity, 293-301.
- **Hanski, I.** (1999). *Habitat connectivity, hábitat continuity, and metapopulations in dynamic landscapes*. Oikos 87: 209-219.
- **Harm Benson, M., & Garmestani, A. S.** (2010). *Embracing panarchy, building resilience and integrating adaptive management through a rebirth of the National Environmental Policy Act*. Journal of Environmental Management, 1420-1427.
- **Holland, J. H.** (1994). *Hidding order: How adaptation build complexity*. New York: Perseus Books.
- **Holling, C. S.** (1986). *Resilience of terrestrial ecosystems; local surprise and global change*. En **W. C. Clark, & R. E. Munn**, *Sustainable Development of the Biosphere* (292-317). Cambridge: Cambridge University Press.
- **Holling, C. S.** (2000). *Theories for sustainable futures*. Conservation Ecology.
- **Holling, C. S.** (2001). *Understanding the complexity of economic, ecologic, and social systems*. Ecosystems, 390-405.
- **Holmgren, M., & Scheffer, M.** (2001). *El Niño as a window of opportunity for the restoration of degraded arid ecosystems*. Ecosystems, 151–159.
- **Ifatimehin, O. O. & Ufuah, M.E.** (2006). *An Analysis of Urban Expansion and Loss of Vegetation Cover in Lokoja, Using GIS Techniques*. The Zaria Geographer, 28-36.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2003). *Censo 2002: Síntesis de resultados*.

- **Instituto Nacional de Estadísticas (INE)** (1997) *VI Censo Nacional Agropecuario y Forestal*.
- **Instituto Nacional de Estadísticas (INE)** (1998) *Estadísticas agropecuarias año agrícola 1997/1998*
- **Instituto Nacional de Estadísticas (INE)** (2004a) *Estadísticas agropecuarias año agrícola 2003/2004*
- **Instituto Nacional de Estadísticas (INE)** (2004b) *Catastro Vitícola Nacional. Año 2004*
- **Instituto Nacional de Estadísticas (INE)** (2007) *VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal*
- **Iturriaga, M.** (2003). *Ordenamiento Territorial en Chile: Instituciones, Instrumentos, Problemas y Propuestas*. Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales. Facultad de Arquitectura. Universidad Católica de Chile
- **Kasischke, E. S., Christiansen, N. L., & Stocks, B. J.** (1995). *Fire, global warming, and carbon balance of boreal forests*. *Ecological Applications*, 437–451.
- **Kaufman, Y. J., & Sendra, C.** (1988). *Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery*. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1357– 1381.
- **Kremen, C.** (2005). *Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology?* *Ecology Letters*. 8, 468–479.
- **Levin, S.** (1992). *The problem of pattern and scale in ecology*. *Ecology*, 1943–1967.
- **Levin, S.** (1999). *Fragile dominion*. Perseus Books.
- **Levin, S., & Lubchenco, J.** (2008). *Resilience, robustness, and marine ecosystem-based management*. *BioScience*, 1-6.
- **Levins, R.** (1969). *Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control*. *Bulletin of the Entomology Society of America* 71:237-240.
- **Li, B.-L.** (2002). *A Theoretical Framework of Ecological phase transitions for characterizing tree-grass dynamics*. *Acta Biotheoretica*, 141–154.
- **Li, H., and J. F. Reynolds.** (1994). *A simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps*. *Ecology* 75:2446-2455.
- **Loreau, M., Daufresne, T., Gonzalez, A., Gravel, D., Guichard, F., Leroux, S.J., Loeuille, N., Massol, F., & Mouquet, N.,** (2013) *Unifying sources and sinks in ecology and Earth sciences*. *Biol. Rev.* 88, 365–379.
- **Luebert, F. & Pliscoff, P.** (2006) *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- **Mahiny, A.S., & Turner, B.J.** (2007) *A Comparison of Four Common Atmospheric Correction Methods*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 73, No. 4, pp. 361–368
- **Mausel, P., Brondizio, E. & Moran, E.** (2000). *Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research*. *International Journal of Remote Sensing*.
- **McKinney, M.** (2002). *Urbanization, Biodiversity and Conservation*. *Bioscience*, 52: 883–890.
- **McKinney, M.** (2008). *Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals*. *Urban Ecosystems*, Volume 11, Issue 2, pp 161-176
- **Ministerio de Agricultura (MINAGRI).** (2000). *Una Política de Estado para la Agricultura Chilena. Período 2000-2010*.

- **Montañez, G., & Delgado, O.** (1998). *Espacio, territorio y región: conceptos básicos para un proyecto nacional*. Revista Cuadernos de Geografía, 120-134.
- **Morin, E.** (2005). *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona: Gedisa.
- **Norberg, J. & Cumming, G. S.** (2008). *Complexity theory for a sustainable future*. New York: Columbia University Press.
- **Noss, R.F.** 1987. *From plant communities to landscapes in conservation inventories: a look at the Nature Conservancy (USA)*. Biol. Conserv. 41, 11–37.
- **Odile, H.** (2001). *Conflictos territoriales y territorialidad negra. II Seminario internacional sobre territorio y cultura*. Universidad de Caldas, Manizales.
- **Odum, H. T.** (1995). *Environmental accounting: EMERGY and the environmental decision making*. Chichester: Wiley.
- **Ong'ayo, A. O.** (2008). *Political instability in Africa. Where the problem lies and alternative perspectives*. Afrika: een continent op drift. Wageningen.
- **Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO).** (2011). *El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo. ¿Cómo afecta la volatilidad de los precios internacionales a las economías nacionales y la seguridad alimentaria?* Roma.
- **Pauchard, A.; Aguayo, M.; Peña, E.; Urrutia, R.** (2006). *Multiple effects of urbanization on the biodiversity of developing countries: The case of a fast-growing metropolitan area (Concepción, Chile)*. Biological Conservation Volume 127, Issue 3, Pages 272–281.
- **Petrosillo, I., Zaccarelli, N., & Zurlini, G.** (2010). *Multi-scale vulnerability of natural capital in a panarchy of social-ecological landscapes*. Ecological Complexity, 7(3), 359-367.
- **Pickett, S. T., & P. S. White.** (1985). *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press, Orlando, Florida, USA.
- **Pickett, S. T., Collins, S. L., & Armesto, J. J.** (1987). *Models, mechanisms, and pathways of succession*. The Botanical Review, 335-371.
- **Ramalingam B., Jones, H. & Reba, T.** (2008). *Exploring the Science of Complexity: Ideas and Implications for Development and Humanitarian Efforts*. Overseas Development Institute.
- **Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., & Aguado, I.** (2003) *Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types*. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 41, no. 5.
- **Riitters, K., Wickham J., O'Neill, R., Jones, B., and Smith, B.** (2000) *Global-scale patterns of forest fragmentation*. Conservation Ecology 4(2): 3. Recuperado Abril, 12, 2013. Sitio web: <http://www.consecol.org/vol4/iss2/art3/>
- **Rodríguez, J.P., Beard, T.D., Jr., Agard, J., Bennett, E., Cork, S., Cumming, G., Deane, D., Dobson, A.P., Lodge, D.M., Mutale, M., Nelson, G.C., Peterson, G.D. & Ribeiro, T.** (2005): *Interactions among ecosystem services*. En: **Carpenter, S.R., Pingali, P.L., Bennett, E.M. & Zurek, M.B.** (Eds.); *Ecosystems and human well-being: scenarios (Volume 2). Findings of the Scenarios Working Group, Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, Washington, D.C., USA, pp. 431–448.
- **Roe, E.** (1998). *Taking complexity seriously: policy analysis, triangulation and sustainable development*. Boston (MA): Kluwer.
- **Sabatini, F.** (2000). *Reforma de los mercados de suelo en Santiago, Chile: efectos sobre los precios de la tierra y la segregación residencial*. EURE (Santiago), 26(77), 49-80. Recuperado 02 de agosto de 2012. Sitio web:

[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0250-71612000007700003&lng=es&tlng=es..](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612000007700003&lng=es&tlng=es..) 10.4067/S0250-71612000007700003.

- **Santos, M.** (1997). *Técnica, Espaço, Tempo: Globalização e Meio Técnico-Científico-Informacional*. São Paulo: Hucitec.
- **Scheffer, M.** (2009). *Critical transitions in nature and society*. Princeton: NJ: Princeton University.
- **Sepulveda C., García D.** (1997) *Cooperación público-privada como estrategia para la conservación de la biodiversidad en Chile*. Ambiente y Desarrollo Vol XIII – N° 2. pp. 59 – 68.
- **Simon, H. A.** (1962). *The Architecture of Complexity*. Proceedings of the American Philosophical Society, 467-482.
- **Simon, H. A.** (1974). *The organization of complex systems*. En **H. Hunt Pattee**, *Hierarchy theory: the challenge of complex systems*. (3-27). New York: Brazillier.
- **Simon, H. A.** (1976). *How complex are complex systems? PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 507-522.
- **Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA)**. Sin fecha. *Diagnóstico de los suelos en la Región Metropolitana*. Recuperado Mayo, 27, 2013. Sitio web: [http://www.sinia.cl/1292/articles-39511\\_pdf\\_suelo.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-39511_pdf_suelo.pdf)
- **Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P., Macomber, S.A.** (2001). *Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?* Remote Sensing of Environment.
- **Song, W.W. & Guan, D.S.** (2008) *Application of five atmospheric correction models for Landsat TM data in vegetation remote sensing*. Ying yong sheng tai xue bao.
- **Stacey, R.** (1996). *Managing the unknowable: Strategic boundaries between order and chaos in organisations*. San Francisco: Jossey-Bass.
- **Teillet, P.M.** (1986). *Image correction for radiometric effects in remote sensing*. International Journal of Remote Sensing
- **Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R. & Polasky, S.** (2002). *Agricultural Sustainability and intensive production practices*. Nature, 671-677.
- **Troll, C.** (1950). *Die geographische Landschaft und ihre Erforschung*. Studium Generale, 163-181.
- **Van Apeldoorn, D. F., Kasper, K., Sonneveld, M., & Veldkamp, T.** (2011). *Panarchy rules: rethinking resilience of agroecosystems, evidence from Dutch dairy-farming*. Ecology and Society 16(1): 39.
- **Weeks, B., Rodríguez, M. A., & Blakeslee J.H.** (2004). *Panarchy: Complexity and Regime Change in Human Societies*. Recuperado Junio, 12, 2012. Sitio web: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.85.9684>
- **Will, V.** (2010). *Psychological panarchy: steps to an ecology of thought*. General Systems Bulletin.
- **Wu, J., Wang, D., and Bauer, M.E.** (2005). *Image-based atmospheric correction of QuickBird imagery of Minnesota cropland*. Remote Sensing of Environment 99(3): 315-325.
- **Young, S. S., and R. Harris.** (2005). *Changing patterns of global-scale vegetation photosynthesis, 1982–1999*. International Journal of Remote Sensing 26(20):4537-63.
- **Zaccarelli, N.; Petrosillo, I.; Zurlini, G.; & Riitters, K.** (2008). *Source/Sink Patterns of Disturbance and Cross-Scale Mismatches in a Panarchy of Social-Ecological Landscape*. Ecology and Society 13(1): 26.



- **Zurlini, G., Riitters, K.H., Zaccarelli, N., Petrosillo, I., Jones, K.B., & Rossi, L.,** (2006) *Disturbance patterns in a social–ecological system at multiple scales*. *Ecol. Complex.* 3 (2), 119–128.

## Anexos

### Anexo 1. Tabla resumen de resultados.

Nivel jerárquico: Región Metropolitana de Santiago											
Superficie: 15.348,8 km <sup>2</sup>				CP	Pd: 0,104	Pdd: 0,667	Log RP	Pd: -	Pdd: -		
Coberturas de suelo	% de superficie	Rol fuente/sumidero			Resiliencia a escalas			Pd min	Pd max	Pdd min	Pdd max
		Pequeñas	Medias	Grandes	Pequeñas	Medias	Grandes				
Cultivos anuales	13.82%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.370	0.243	0.367	0.672
Cultivos permanentes	6.58%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.360	0.253	0.358	0.137
Superficies artificiales	9.73%	Fuente	Fuente	Fuente	Media	Media	Media	0.108	0.137	0.107	0.599
Silvicultura	1.92%	Fuente	Fuente	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.121	0.078	0.115	0.565
Áreas naturales	67.73%	Sumidero	Sumidero	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.024	0.058	0.023	0.565

#### Matriz de incongruencia.

Cobertura	C. Anual	C. Perm.	S. Art.	Silv.	A. Natural
C. Anual	■	Congruencia	Incongruencia	Congruencia	Incongruencia fuerte
C. Perm.	Congruencia	■	Incongruencia	Congruencia	Incongruencia fuerte
S. Art.	Incongruencia	Incongruencia	■	Incongruencia	Incongruencia
Silv.	Congruencia	Congruencia	Incongruencia	■	Incongruencia
A. Natural	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia	Incongruencia	■

Nivel jerárquico: Provincia de Chacabuco											
Superficie: 1.977,7 km <sup>2</sup>				CP	Pd: 0,078	Pdd: 0,671	Log RP	Pd: -0,325	Pdd: -0,017		
Coberturas de suelo	% de superficie	Rol fuente/sumidero			Resiliencia a escalas			Pd min	Pd max	Pdd min	Pdd max
		Pequeñas	Medias	Grandes	Pequeñas	Medias	Grandes				
Cultivos anuales	9.72%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.39	0.24	0.38	0.68
Cultivos permanentes	3.87%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.33	0.20	0.33	0.69
Superficies artificiales	5.48%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.18	0.19	0.18	0.64
Silvicultura	0.43%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.39	0.15	0.39	0.66
Áreas naturales	80.39%	Sumidero	Sumidero	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.02	0.04	0.02	0.45

Matriz de incongruencia.

Cobertura	C. Anual	C. Perm.	S. Art.	Silv.	A. Natural
C. Anual	■	Congruencia	Incongruencia	Congruencia	Incongruencia fuerte
C. Perm.	Congruencia	■	Incongruencia	Congruencia	Incongruencia fuerte
S. Art.	Incongruencia	Incongruencia	■	Incongruencia	Incongruencia
Silv.	Congruencia	Congruencia	Incongruencia	■	Incongruencia
A. Natural	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia	Incongruencia	■

Nivel jerárquico: Provincia de Cordillera											
Superficie: 5.182,2 km <sup>2</sup>				CP	Pd: 0,097	Pdd: 0,666	Log RP	Pd: -0,079	Pdd: -0,003		
Coberturas de suelo	% de superficie	Rol fuente/sumidero			Resiliencia a escalas			Pd min	Pd max	Pdd min	Pdd max
		Pequeñas	Medias	Grandes	Pequeñas	Medias	Grandes				
Cultivos anuales	11.71%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.44	0.26	0.44	0.67
Cultivos permanentes	6.33%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.22	0.21	0.22	0.64
Superficies artificiales	12.61%	Fuente	Fuente	Fuente	Media	Media	Media	0.14	0.18	0.14	0.67
Silvicultura	0.06%	Sumidero	Sumidero	Fuente	Alta	-	Baja	0.04	0.14	0.05	0.62
Áreas naturales	69.29%	Sumidero	Sumidero	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.02	0.04	0.02	0.33

Matriz de incongruencia.

Cobertura	C. Anual	C. Perm.	S. Art.	Silv.	A. Natural
C. Anual	■	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
C. Perm.	Incongruencia fuerte	■	Congruencia	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
S. Art.	Incongruencia fuerte	Congruencia	■	-	Incongruencia
Silv.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	-	■	Incongruencia
A. Natural	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia	Incongruencia	■

Nivel jerárquico: Provincia de Maipo											
Superficie: 1.150,7 km <sup>2</sup>				CP	Pd: 0,191	Pdd: 0,678	Log RP	Pd: 0,723	Pdd: 0,050		
Coberturas de suelo	% de superficie	Rol fuente/sumidero			Resiliencia a escalas			Pd min	Pd max	Pdd min	Pdd max
		Pequeñas	Medias	Grandes	Pequeñas	Medias	Grandes				
Cultivos anuales	20.64%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.41	0.29	0.41	0.68
Cultivos permanentes	23.03%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.36	0.30	0.36	0.69
Superficies artificiales	8.80%	Sumidero	Fuente	Fuente	Media	Media	Media	0.17	0.24	0.17	0.67
Silvicultura	0.09%	Sumidero	Sumidero	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.02	0.09	0.02	0.48
Áreas naturales	46.30%	Sumidero	Sumidero	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.14	0.19	0.13	0.64

Matriz de incongruencia.

Cobertura	C. Anual	C. Perm.	S. Art.	Silv.	A. Natural
C. Anual	■	Congruencia	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
C. Perm.	Congruencia	■	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
S. Art.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	■	Congruencia	Incongruencia
Silv.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Congruencia	■	Incongruencia
A. Natural	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia	Incongruencia	■

Nivel jerárquico: Provincia de Melipilla											
Superficie: 4.326,5 km <sup>2</sup>				CP	Pd: 0,098	Pdd: 0,660	Log RP	Pd: -0,071	Pdd: -0,028		
Coberturas de suelo	% de superficie	Rol fuente/sumidero			Resiliencia a escalas			Pd min	Pd max	Pdd min	Pdd max
		Pequeñas	Medias	Grandes	Pequeñas	Medias	Grandes				
Cultivos anuales	16.45%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.32	0.21	0.32	0.66
Cultivos permanentes	4.59%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.41	0.20	0.40	0.70
Superficies artificiales	2.01%	Sumidero	Fuente	Fuente	Media	Media	Media	0.10	0.13	0.11	0.61
Silvicultura	4.51%	Fuente	Sumidero	Sumidero	Baja	Alta	Alta	0.11	0.07	0.10	0.56
Áreas naturales	72.43%	Sumidero	Sumidero	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.03	0.07	0.02	0.49

Matriz de incongruencia.

Cobertura	C. Anual	C. Perm.	S. Art.	Silv.	A. Natural
C. Anual	■	Congruencia	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
C. Perm.	Congruencia	■	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
S. Art.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	■	Congruencia	Incongruencia
Silv.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Congruencia	■	Incongruencia
A. Natural	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia	Incongruencia	■

Nivel jerárquico: Provincia de Santiago											
Superficie: 2.109,7 km <sup>2</sup>				CP	Pd: 0,052	Pdd: 0,625	Log RP	Pd: -0,744	Pdd: -0,180		
Coberturas de suelo	% de superficie	Rol fuente/sumidero			Resiliencia a escalas			Pd min	Pd max	Pdd min	Pdd max
		Pequeñas	Medias	Grandes	Pequeñas	Medias	Grandes				
Cultivos anuales	4.28%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.46	0.25	0.43	0.69
Cultivos permanentes	0.65%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.33	0.17	0.31	0.67
Superficies artificiales	28.86%	Fuente	Fuente	Fuente	Media	Media	Media	0.07	0.09	0.06	0.56
Silvicultura	0.23%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.09	0.06	0.08	0.45
Áreas naturales	65.45%	Sumidero	Sumidero	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.02	0.04	0.02	0.37

Matriz de incongruencia.

Cobertura	C. Anual	C. Perm.	S. Art.	Silv.	A. Natural
C. Anual	■	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
C. Perm.	Incongruencia fuerte	■	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
S. Art.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	■	Congruencia	Incongruencia
Silv.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Congruencia	■	Incongruencia
A. Natural	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia	Incongruencia	■

Nivel jerárquico: Provincia de Talagante											
Superficie: 601,9 km2					CP	Pd: 0,264	Pdd: 0,672	Log RP	Pd: 1,123	Pdd: 0,026	
Coberturas de suelo	% de superficie	Rol fuente/sumidero			Resiliencia a escalas			Pd min	Pd max	Pdd min	Pdd max
		Pequeñas	Medias	Grandes	Pequeñas	Medias	Grandes				
Cultivos anuales	32.46%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.42	0.31	0.39	0.68
Cultivos permanentes	19.53%	Fuente	Fuente	Fuente	Baja	Baja	Baja	0.36	0.28	0.33	0.67
Superficies artificiales	10.80%	Sumidero	Sumidero	Fuente	Media	Media	Media	0.21	0.32	0.18	0.68
Silvicultura	0.32%	Sumidero	Fuente	Fuente	Alta	Alta	Alta	0.22	0.32	0.20	0.56
Áreas naturales	36.89%	Sumidero	Sumidero	Sumidero	Alta	Alta	Alta	0.10	0.19	0.09	0.66

Matriz de incongruencia.

Cobertura	C. Anual	C. Perm.	S. Art.	Silv.	A. Natural
C. Anual	■	Congruencia	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
C. Perm.	Congruencia	■	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte
S. Art.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	■	Congruencia	Incongruencia fuerte
Silv.	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Congruencia	■	Incongruencia fuerte
A. Natural	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	Incongruencia fuerte	■