



Universidad de Chile  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Escuela de Geografía

CAMBIOS EN LOS USOS Y COBERTURAS DE SUELO  
Y SUS EFECTOS SOBRE LA ESCORRENTÍA URBANA.  
VALPARAÍSO Y VIÑA DEL MAR, PERÍODO **1980-2005**.

Memoria para optar al Título de Geógrafo

**Claudio Andrés Moscoso Campusano**

**Profesor guía:** Dr. Hugo Romero A.

**Santiago, Noviembre de 2007**

## TABLA DE CONTENIDOS

	<i>Pág.</i>
<b>Resumen</b>	<b>5</b>
1.1 Introducción	6
1.2 Planteamiento del problema	7
1.3 Área de estudio	9
1.4 Objetivos	13
1.5 Hipótesis	13

## CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO

<b>2.1 Identificación y análisis de la participación hídrica de los usos de suelo sobre la modificación de la escorrentía superficial</b>	<b>14</b>
2.1.1 Identificación de los usos de suelo	14
2.1.2 Evolución de la superficie de los usos de suelo	15
2.1.3 Reconocimiento de las Áreas Totales Impermeabilizadas (ATIs)	16
2.1.4 Efectos de la urbanización sobre la escorrentía superficial.	17
2.1.4.1 Cálculo de Escorrentía superficial.	17
2.1.4.2 Estimación de la precipitación de tormenta en cada cuenca.	17
2.1.4.3 Cálculo del Almacenamiento Máximo Potencial.	18
2.1.4.4 Adaptación de usos de suelo y de tasas de impermeabilización a la propuesta del SCS.	19
2.1.4.5 Adaptación de las series y variaciones de suelo a Grupos Hidrológicos.	19
<b>2.2 Impacto diferencial de los usos de suelo según la pendiente y su posición topológica al interior de la cuenca sobre el coeficiente de escorrentía superficial y las zonas de recarga y descarga hídrica</b>	<b>20</b>
2.2.1 Identificación de pendientes en cada cuenca.	20
2.2.1.1 Consideración de la pendiente en el cálculo de la escorrentía superficial.	20
2.2.2 Determinación de las Áreas de Máxima y Media Potencialidad de Recarga y de las Áreas de Descarga Potencial.	21
<b>2.3 Impactos de la configuración urbana sobre las redes de drenaje.</b>	<b>22</b>
2.3.1 Inferencia de la red de drenaje.	22
2.3.2 Impacto de la urbanización sobre la red de drenaje.	22

## CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ASUNTO

<b>3.1 La ciudad, expansión urbana y medio ambiente.</b>	<b>24</b>
3.1.1 Relevancia de la ciudad.	24
<b>3.2 Medio Ambiente Urbano</b>	<b>25</b>
3.2.1 Efectos o implicancias del crecimiento urbano.	26
<b>3.3 Usos y coberturas del suelo y efectos medioambientales asociados.</b>	<b>27</b>
3.3.1 Cambios de usos y coberturas.	28
<b>3.4 Urbanización de cuencas.</b>	<b>29</b>
3.4.1 Urbanización y ciclo hidrológico.	29
3.4.1.1 Modificación de la geometría de la red de drenaje.	33

<b>3.5 El contexto del estudio en Chile.</b>	<b>34</b>
<b>3.6 Antecedentes.</b>	<b>34</b>
3.6.1 Expansión urbana de Valparaíso entre 1975 y el 2004.	34
3.6.2 Deslizamientos, inundaciones y modificaciones de las redes de drenaje natural en Valparaíso y Viña del Mar.	37

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS**

<b>4.1 PARTICIPACIÓN HÍDRICA DE LOS USOS DE SUELO SOBRE LA MODIFICACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DE LAS CUENCAS URBANIZADAS DE MIRAFLORES ALTO, SUBIDA DE YOLANDA Y AVENIDA FRANCIA.</b>	<b>38</b>
4.1.1 Evolución de las superficies urbanas en las tres cuencas.	38
4.1.2 Evolución de los usos y coberturas de suelo.	39
4.1.2.1 Usos y coberturas de suelo.	40
4.1.2.2 Cambios de usos y coberturas de suelo.	47
4.1.2.2.1 Cambios de usos y coberturas entre 1980 y 1994.	47
4.1.2.2.2 Cambios de usos y coberturas entre 1994 y 2005.	49
4.1.3 Evolución de las Áreas Totales Impermeables (ATIs).	51
4.1.3.1 Distribución espacial de las ATIs.	52
4.1.4 Impactos de los cambios de usos y coberturas de suelo sobre la escorrentía superficial.	58
4.1.4.1 Variación de la escorrentía.	58
4.1.4.2 Coeficientes de escorrentía según uso y cobertura de suelo.	59
4.1.4.3 Cambios en el coeficiente de escorrentía 1980-2005.	59
4.1.4.3.1 Cuenca de Miraflores Alto.	59
4.1.4.3.2 Cuenca de Subida de Yolanda.	64
4.1.4.3.3 Cuenca de Avda. Francia.	67
<b>4.2 PARTICIPACIÓN DE LAS PENDIENTES EN EL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DE LOS USOS DE SUELO URBANOS Y SU IMPACTO SOBRE EL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA GENERAL DE LA CUENCA; IMPORTANCIA DE LA POSICIÓN TOPOLÓGICA DE LOS USOS Y COBERTURAS DE SUELO RESPECTO DE LA ALTERACIÓN DE LAS ÁREAS DE RECARGA Y DESCARGA HÍDRICA</b>	<b>71</b>
4.2.1 Impacto de la urbanización según pendientes y su impacto sobre el coeficiente de escorrentía superficial.	71
4.2.2 Variación de la escorrentía según la pendiente en Miraflores Alto.	72
4.2.3 Variación de la escorrentía según la pendiente en la subida de Yolanda.	74
4.2.4 Variación de la escorrentía según la pendiente en la Avda. Francia.	77
4.3 Evolución de las áreas potenciales de recarga y descarga hídrica.	79
4.3.1 Situación en el período 1980-1994.	81
4.3.2 Situación en el período 1994-2005.	83
<b>4.3 IMPACTO DEL CRECIMIENTO URBANO SOBRE LA RED DE DRENAJE NATURAL</b>	<b>89</b>
4.3.1 Evolución de la red de drenaje en la cuenca de Miraflores Alto 1980-2005.	89
4.3.2 Evolución de la red de drenaje en la cuenca de Subida de Yolanda 1980-2005.	92
4.3.3 Evolución de la red de drenaje en la cuenca de Avda. Francia 1980-2005.	95

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN FINAL Y CONCLUSIONES

<b>5.1 DISCUSIÓN FINAL</b>	<b>98</b>
<b>5.2 CONCLUSIONES</b>	<b>101</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>105</b>
<b>Anexos.</b>	<b>112</b>

### ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.	12
Figura 2. Reconocimiento de usos y coberturas mediante grilla.	15
Figura 3. Módulo Land Change Modeler.	16
Figura 4. Reconocimiento de ATIs.	17
Figura 5. Interpolación de precipitaciones de tormenta, método Kriging.	18
Figura 6. Asociación de la información UCS con la información de pendientes.	21
Figura 7. Reconocimiento de las modificaciones de los drenes de drenaje natural.	23
Figura 8. Tendencia poblacional en África, Asia, Latinoamérica y El Caribe (LAC), Regiones Más Desarrolladas y en el Mundo (RMD).	24
Figura 9. Ecosistema Humano.	26
Figura 10: Vista sistémica de los cambios en el paisaje.	27
Figura 11: Relaciones diferenciales entre los distintos usos y coberturas del suelo con el medio ambiente.	28
Figura 12. Cambios en los flujos hidrológicos por efectos de la impermeabilización.	31
Figura 13. Relación entre la impermeabilidad de las cuencas y la calidad del cauce fluvial, y con el estado del ambiente en cuencas urbanas	32
Figura 14. Corrientes de agua pre-urbanización y post urbanización.	32
Figura 15. Modificación del cauce a partir de la urbanización.	33
Figura 16. Modificación geometría de la red de drenaje.	33
Figura 17. Evolución Límites urbanos en el Gran Valparaíso.	34
Figura 18. Expansión Urbana del Gran Valparaíso 1975-2004.	35
Figura 19. Superficie de los Límites urbanos en las tres cuencas, entre 1980-2005.	38
Figura 20. Evolución Límites urbanos en las tres cuencas.	39
Figura 21. Evolución usos urbanos y no urbanos 1980-2005.	40
Figura 22. Usos y coberturas de suelo, 1980-2005.	41
Figura 23. Usos y coberturas de suelo cuenca de Miraflores Alto 1980-2005.	44
Figura 24. Usos y coberturas de suelo cuenca de subida de Yolanda 1980-2005.	45
Figura 25. Usos y coberturas de suelo cuenca de Avda. Francia 1980-2005.	46
Figura 26. Superficie de crecimiento de los usos de suelo urbanos 1980-1994	47
Figura 27. Superficie de crecimiento de los usos de suelos urbanos 1994-2005.	50
Figura 28. Tasas de Impermeabilización según usos y coberturas de suelo.	52
Figura 29. Áreas Totales Impermeables 1980-1994.	52
Figura 30. ATIs Miraflores Alto 1980-2005.	55
Figura 31. ATIs subida de Yolanda 1980-2005.	56
Figura 32. ATIs Avda. Francia 1980-2005.	57
Figura 33. Correlación entre ATIs y CE en las tres cuencas estudiadas.	58
Figura 34. Coeficientes de escorrentía por cuenca.	58
Figura 35. Ponderación de la participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en Miraflores Alto 1980-1994.	61
Figura 36. Ponderación de la participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en Miraflores Alto 1994-2005.	62

Figura 37. Figura 40. Cambio en el CE cuenca de Miraflores Alto 1980-2005.	63
Figura 38. Ponderación de la participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en subida de Yolanda 1980-1994.	64
Figura 39. Ponderación de la participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en subida de Yolanda 1994-2005.	65
Figura 40. Cambio en el CE cuenca de subida de Yolanda 1980-2005.	66
Figura 41. Ponderación de la participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en Avda. Francia 1980-1994.	67
Figura 40. Cambio en el CE cuenca de Avda. Francia 1980-2005.	69
Figura 43. Ponderación de la participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en Avda. Francia 1994-2005.	70
Figura 44. Variación del coeficiente de escorrentía, según rango de pendiente.	72
Figura 45. Aumento del CE por pendiente, Cuenca de Miraflores Alto 1980-2005.	73
Figura 46. Aumento del CE por pendiente, Cuenca de Yolanda 1980-2005.	75
Figura 47. Aumento del CE por pendiente, Cuenca de Avda. Francia 1980-2005.	78
Figura 48. Evolución de la superficie de las zonas de recarga y descarga 1980-2005.	80
Figura 49. Cambios de las áreas de descarga y recarga 1980-1994.	81
Figura 50. Cambios de las áreas de descarga y recarga 1980-1994.	83
Figura 51. Áreas potenciales de Recarga y Descarga, Cuenca de Miraflores Alto 1980-2005.	86
Figura 52. Áreas potenciales de Recarga y Descarga, Cuenca de subida de Yolanda 1980-2005.	87
Figura 53. Áreas potenciales de Recarga y Descarga, Cuenca de Avda. Francia 1980-2005.	88
Figura 54. Densidad del drenaje natural y artificial, Miraflores Alto 1980-2005.	89
Figura 55. Modificación de la red de drenaje, cuenca de Miraflores Alto 1980-2005.	90
Figura 56. Densidad del drenaje natural y artificial, subida de Yolanda 1980-2005.	92
Figura 57. Modificación de la red de drenaje, cuenca de Yolanda 1980-2005.	93
Figura 58. Densidad del drenaje natural y artificial, Avda. Francia 1980-2005.	95
Figura 59. Modificación de la red de drenaje, cuenca de Avda. Francia 1980-2005.	97

### ÍNDICES DE TABLAS

Tabla 1. Características de los suelos.	10
Tabla 2. Características de las tres cuencas.	10
Tabla 3. Serie de Ortofotos 1:20.000 utilizadas en el estudio.	14
Tabla 4. Serie de Fotografías Aéreas utilizadas en el estudio.	14
Tabla 5. Rangos de variación del CE.	20
Tabla 6. CE según zonas de recarga y descarga hídrica.	21
Tabla 7. Población del Gran Valparaíso entre 1975 y 2004.	35
Tabla 8. Variación (Hás) del CE, Miraflores Alto 1980-2005.	59
Tabla 9. S, E y CE, según uso y cobertura de suelo.	60
Tabla 10. Variación (Hás) del CE, Yolanda 1980-2005.	64
Tabla 11. Variación (Hás) del CE, Avda. Francia 1980-2005	68

## Resumen

El Gran Valparaíso ha experimentado en los últimos treinta años un crecimiento importante de la superficie urbana. Este crecimiento implica una importante sustitución de usos y coberturas, como por ejemplo áreas verdes remanentes densas que son eliminadas por el emplazamiento de usos altamente impermeables como las áreas residenciales.

La implantación de usos altamente impermeables ha traído consigo una serie de anomalías al entorno natural generando un irreparable daño en las cuencas que se encuentran insertas en el Área Metropolitana de Valparaíso (AMV). Uno de los principales impactos que trae el proceso de urbanización es la modificación de la red de drenaje, la cual es abovedada, intervenida o seccionada y el aumento de los coeficientes de escorrentía, lo que sumado a la compleja realidad topográfica del sector de los cerros en Valparaíso y de la meseta del Gallo (Miraflores Alto) en Viña del Mar, se torna un impacto aún más cuantioso y complejo.

La configuración espacial de los usos y coberturas al interior de las cuencas de Miraflores Alto en Viña del Mar, de subida de Yolanda y Avda. Francia en Valparaíso, posee distintas características. En Miraflores Alto por ejemplo, se está en presencia de una urbanización que nace en la cabecera de la cuenca; en cambio, en las otras dos cuencas, la urbanización se origina desde el sector más bajo y progresa hacia el más alto.

Esta investigación tiene como objetivo general identificar, analizar y sistematizar los principales impactos de la urbanización sobre la escorrentía de las cuencas, considerando los usos de suelo que poseen mayor influencia sobre ésta. A su vez se evaluaron áreas de recarga y descarga de los acuíferos y la modificación de la red de drenaje.

La investigación se basó en las características hídricas de los usos y coberturas de suelo y en el análisis del reemplazo de coberturas naturales, que implica variaciones en las zonas de recarga y descarga, así como en los coeficientes de escorrentía y en la geometría de la red de drenaje de las cuencas. De esta manera se concluyó, en general, que el avance urbano en el área de estudio ha producido el avance de usos altamente impermeables y por ello un aumento de los coeficientes de escorrentía, una disminución de las áreas de máxima potencialidad de recarga y una modificación sensible de la red de drenaje.

Para la ejecución de este estudio, se emplearon fotografías aéreas y ortofotos con información de las series de suelo de las áreas de estudio. A partir de éstas se obtuvieron datos correspondientes a los usos y coberturas de suelo, las que luego fueron procesadas en sistemas de información geográfica para lograr información acerca de las tasas de impermeabilización, coeficientes de escorrentía y redes de drenaje de las cuencas.

## CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN

### 1.1 Introducción

El enorme crecimiento poblacional a escala nacional y mundial implica una serie de cambios en la estructura y composición de las ciudades. El crecimiento desmesurado de los núcleos urbanos es evidente en muchos países latinoamericanos (BORSDORF, 2000) y es también llamado “urban sprawl” (ROMERO & VÁSQUEZ, 2005), proceso de crecimiento de las ciudades que avanza principalmente por zonas naturales que prestan importantes servicios ambientales.

Esta memoria que es parte del proyecto Fondecyt N°1050423 “Efectos ambientales del crecimiento urbano de las Áreas Metropolitanas de Santiago, Valparaíso y Concepción” pone énfasis en el crecimiento de la mancha urbana de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar, seleccionado específicamente tres cuencas urbanizadas: Cuenca de Avda. Francia (Quebrada de Jaime), Cuenca de Yolanda (Quebrada de la Cabritería) en Valparaíso y Cuenca de Miraflores Alto (Quebrada de Miraflores Alto) en Viña del Mar.

Esta mancha urbana incluye una serie de usos de suelo que van modificando la naturaleza y configuración espacial de las cuencas fluviales, dando lugar a cuencas urbanizadas, es decir cuyos procesos y funciones difieren notablemente de los naturales, que existían antes de ser ocupadas. En este contexto se estudiaron las tasas de impermeabilización, coeficientes de escorrentía, capacidad de almacenamiento potencial de agua, entre otros aspectos asociados a los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la urbanización sobre el sistema hídrico y sus componentes, específicamente la escorrentía.

El periodo de estudio se extiende entre 1980 y 2005, y en cada cuenca de estudio se observarán los cambios ocurridos en los usos de suelo, en las Áreas Totales Impermeabilizadas (ATIs), los Coeficientes de Escorrentía, las zonas de recarga y descarga de los acuíferos y la alteración de los cauces por la artificialización antrópica. Estos cambios, evidentemente negativos para el medio ambiente y para las personas serán observados en detalle, basándose en estudios positivistas y estadísticos, los que incluyen metodologías empleadas en estudios ya realizados y algunas innovaciones.

Si bien es cierto, el estudio de la escorrentía no es nuevo, en Chile no es comúnmente aplicado a zonas urbanas y menos común aún es aplicarlo a zonas urbanas con pendiente, ya que generalmente se asume que las ciudades están insertas en un contexto de planicies, lo que está muy alejado de la realidad en la zona costera de la V Región de Chile. Por otro lado, las zonas de recarga y descarga han sido tratadas por algunos autores (ROMERO et al 2004) y son de suma importancia para el comportamiento hídrico de una cuenca, por lo que se estudiarán sus cambios en extensión y configuración espacial a lo largo de los años de estudio.

Esta memoria busca ser un aporte para desarrollar y fomentar un ordenamiento territorial que pueda complementar el desarrollo urbano y la protección del medioambiente, proponiendo acciones destinadas a contrarrestar los efectos adversos de la urbanización sobre componentes del ciclo hidrológico como la escorrentía y la salud ambiental de los cauces.

## 1.2 Planteamiento del Problema

La expansión espacial urbana es un proceso actual y vigente, que ocurre en la mayoría de las ciudades de Chile y de Latinoamérica. Este proceso trae consigo modificaciones dentro y en torno a los centros urbanos, provocando una mayor interacción entre el medio antrópico y el natural, lo que se refleja en que los límites de la ciudad y las áreas rurales sean cada vez más difusos (DEMATTEIS, 1998).

La expansión espacial de la ciudad provoca una serie de cambios en los usos y coberturas del suelo, donde prevalece el avance de las superficies artificiales sobre superficies naturales, provocando una serie de alteraciones en el medio ambiente: aumento de la temperatura superficial, degradación de hábitats, alteraciones en el ciclo hidrológico, por nombrar sólo algunas. Ello a su vez afecta al hombre, debido a que el medio ambiente urbano funciona como un sistema híbrido y heterogéneo (PICKETT, et al, 1997).

Valparaíso y Viña del Mar, ciudades pertenecientes al Gran Valparaíso, poseen características particulares tanto en su morfología como en su estructura urbana. Al estar asentadas sobre paisajes formados por cerros y quebradas, ambas ciudades han ido creciendo sobre laderas y superficies con pendientes pronunciadas, utilizando en forma intensiva cuencas asociadas a los cursos de agua en que están insertas.

Las intervenciones urbanas a nivel de cuenca provocan serias alteraciones en los componentes del ciclo hidrológico (evapotranspiración, precipitación, escorrentía e infiltración). En el caso de la escorrentía superficial, al aumentar las superficies impermeables como consecuencia de la urbanización, se inhiben condiciones naturales de infiltración y por ende se altera el funcionamiento hídrico de las cuencas, aumentando los volúmenes de agua y la rapidez con que descienden por laderas y cauces, especialmente cuando se registran precipitaciones abundantes (flujos de tormenta). La rapidez del escurrimiento impide el almacenaje del agua en el suelo y el desaparecimiento de los flujos de base o permanentes. A ello se suma el cambio de las zonas de recarga de los acuíferos por zonas de descarga (ROMERO, et al, 2005), lo que a su vez provoca inundaciones y anegamientos muy negativos para la población con menores precipitaciones y mayor frecuencia, (FERRANDO, 2003; HERMELIN, 2003).

La manera de evaluar el efecto de la urbanización sobre la hidrología de las subcuencas consiste en calcular las Áreas Totales de Impermeabilización (ATIs). Ello permite conocer los porcentajes de escorrentía por unidad de superficie asociados a los diversos usos y coberturas de los suelos, ponderando sus efectos según la importancia de las superficies que ocupan dentro de las cuencas. De esta forma, si bien una cuenca urbanizada puede reducir las tasas de impermeabilización en forma creciente, el balance final en términos de escurrimiento puede ser equilibrado manteniendo o mejorando la infiltración de las superficies restantes, ocupadas por vegetación o campos cultivados (ROMERO & VÁSQUEZ, 2005). Aquí radican las mejores posibilidades de emplear estos enfoques geográficos y ambientales en la gestión de las cuencas urbanizadas. No se trata de impedir la urbanización de cuencas-algo imposible de conseguir en Chile dada su topografía prevalectante- sino que aplicar esquemas de gestión territorial y ambiental que garanticen la salud de las mismas y la calidad de vida de sus habitantes.

De acuerdo a ROMERO y VÁSQUEZ (op.cit) si bien es posible establecer una relación significativa entre los porcentajes de áreas urbanizadas de las cuencas, las tasas de impermeabilización y el estado ambiental de los paisajes resultantes, no existe

linealidad en ello. Los reales efectos de la urbanización sobre la salud ambiental de las cuencas dependen del estado de avance y tipo de urbanización, así como del diseño de las áreas urbanizadas (usos del suelo, densidades y áreas verdes) y, especialmente, de la posición del área urbana aguas arriba o aguas abajo de la cuenca y de los usos y coberturas de suelos remanentes. Por otro lado, el reemplazo de superficies naturales por usos altamente impermeables tiene igualmente influencia sobre el clima y la calidad del aire (STONE, 2004).

Específicamente, los efectos de la urbanización sobre la escorrentía superficial de las aguas y sobre las zonas de recarga y descarga de los acuíferos dependen de un conjunto integrado de factores. Uno de ellos corresponde a la posición relativa de las ciudades o de las áreas urbanizadas dentro de la cuenca (ENGLISH, et al, 2000), debido a que las secciones altas, media y baja de ésta presentan características hidrológicas, vegetacionales y de pendiente (entre otros) que afectan de manera distinta el escurrimiento superficial y subsuperficial del agua.

Adicionalmente, el uso urbano de los territorios y de la red de transporte, que crece debido a los requerimientos de la ciudad (JANOSCHKA, 2002), interfiere o en ocasiones reemplaza los cursos naturales de agua afectando directamente la geometría de la red de drenaje (MAY, 1998) en las hoyas hidrográficas. Es decir, se superponen redes viales u otros espacios de características altamente impermeables en lugar de redes de drenaje natural, lo que altera seriamente el sistema hídrico en la cuenca, influyendo de manera significativa sobre el escurrimiento superficial y subsuperficial del agua, afectando la calidad del cauce (ARNOLD & GIBBONS, 1996) y de las aguas. Además se observa como las intersecciones naturales de las redes de drenaje que poseen formas curvas o suavizadas se artificializan y son reemplazadas por redes viales lo que significa el cambio a un trazado más regular donde estas intersecciones son más numerosas y rectas (STONE, 2004). El aumento de estas barreras implica una pérdida en la densidad de la red de drenaje natural y en consecuencia el aumento de la densidad del drenaje artificializado (MAY, 1998).

Es importante señalar que el incremento en la escorrentía superficial afecta tanto al sistema natural como al antrópico, ya que su aumento produce eventos de crecidas anormales (PAUL & MEYER, 2001); como consecuencia de la disminución de la infiltración se producen anomalías en la recarga de acuíferos, ya que las zonas de recarga se ven impermeabilizadas, perdiendo sus cualidades ambientales (STONE, 2004). Asociado a ello, se producen las inundaciones, que afectan especialmente a los sectores bajos de las cuencas, Ello denota la importancia de estudiar en forma integral los efectos diferenciados según la posición relativa de la ciudad y sus barrios al interior de las cuencas y de los usos de suelo asociados.

Finalmente se puede esgrimir que el mejor manejo de los recursos acuáticos o hídricos ayuda de manera eficiente a un desarrollo urbano sostenible entendiendo que el desarrollo de las ciudades genera nuevos ambientes hidrológicos alterando las relaciones hombre-medio. Considerando que la relación entre los patrones de uso de suelo y el funcionamiento ecológico no está bien comprendido (ALBERTI, 1996; PAULEIT & DUHME, 2000), es necesario realizar un esfuerzo para proporcionar informaciones científicas que ayuden a una mejor gestión planificadora del medio ambiente urbano tanto en su interior como con su entorno natural.

### 1.3 Área de estudio

Este estudio se localiza geográficamente en el Área Metropolitana de Valparaíso (AMV), la cual consta de cinco comunas: Valparaíso, Viña del Mar, Villa Alemana, Quilpué y Concón. Específicamente dos de las tres cuencas analizadas se encuentran en la comuna de Valparaíso (Cuenca de Avenida Francia y Cuenca de Yolanda); la tercera cuenca de estudio se ubica en Viña del Mar y corresponde a la Cuenca de Miraflores Alto.

Se han seleccionado estas tres cuencas por diferentes razones: La cuenca de Miraflores Alto (Quebrada Miraflores Alto) debido a que posee características endorreicas (es decir no tiene un exutorio en el mar) y la urbanización original comienza en el sector de la cabecera de la cuenca, presentando características de urbanización celular y posteriormente acrecional.

La Cuenca de Yolanda (Quebrada de la Cabritería en la sección inferior y de Rodelillo en la zona superior) tiene naturalmente su exutorio en el mar (exorreica) pero en la actualidad sostiene un estrecho tramo artificializado (que comienza entre el cerro Barón y el Cerro Placeres, aproximadamente) que reemplaza a la desembocadura y la urbanización comienza desde el sector bajo y se extiende hasta la cabecera siguiendo un patrón acrecional.

La Cuenca de Avenida Francia tiene como desembocadura el mar, pero posee un amplio tramo artificializado (700 metros apróx) que comienza entre el Cerro La Cruz y Cerro Monjas (límite de la quebrada de Jaime) y su urbanización comienza desde el plan de Valparaíso extendiéndose a través de las quebradas identificándose una tendencia acrecional en su desarrollo. Además esta cuenca fue seleccionada por su historial acerca de desbordes de la quebrada principal y de inundaciones y anegamientos (Figura 1).

Tanto Yolanda, como Avda. Francia corresponden a planicies de abrasión marina también denominadas como “cerros” en Valparaíso.

#### 1.3.1 Características generales del área de estudio

La serie de suelo que compromete el área de estudio corresponde a la Serie Lo Vásquez, que forma parte de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Ultic Haploxeralfs o Alfisol (CIREN-CORFO, 2001). Estos suelos son derivados de rocas graníticas provenientes de la cordillera de la Costa de la Región Central con características de moderada profundidad. Como lo muestra la tabla 1, esta serie de suelo presenta distintas características respecto de las condiciones de drenaje interno, permeabilidad y escurrimiento superficial, lo que a su vez está relacionado con los usos y coberturas existentes en el área de estudio, ya que como lo propone la Soil Conservation Service (SCS) cada uno de ellos presenta diferentes impactos según el Grupo Hidrológico donde se encuentran emplazados.

La tabla 1 muestra las características naturales de los suelos que se encuentran en el área de estudio. Se puede apreciar que poseen características de drenaje interno favorables para una infiltración adecuada (CIREN-CORFO, 1997), las cuales están asociadas a su textura, ya que se trata de suelos franco arcillo arenosos. Por otra parte, la permeabilidad es lenta y lenta a moderada. El grupo C se caracteriza por un buen drenaje y una permeabilidad lenta y el grupo B posee un buen drenaje, aunque su permeabilidad es lenta a moderada.

**Tabla 1. Características de los suelos**

Textura	Drenaje interno	Permeabilidad	Escurrimiento superficial	Grupo Hidrológico	Marga
Franco arcillo arenosa	Bueno	Lenta	Moderado a rápido	C	Arcillosa
Franco arcillo arenosa	Bueno	Lenta a moderada	Moderado a rápido	B	Arenosa

Fuente: elaboración propia en base a CIREN-CORFO (1997); FERNANDEZ, et al (1999); CHOW (1994)

Esencialmente el escurrimiento es moderado a rápido, lo que se debe tomar en cuenta, ya que la alteración del medio natural puede significar variaciones de esta característica.

Es importante precisar que la marga arcillosa da cuenta de un suelo con condiciones de permeabilidad relativamente peores que una marga arenosa, debido a su compacidad, la que impide una penetración más efectiva de agua.

El clima de la zona corresponde a Templado-cálido con lluvias invernales, estación seca prolongada (7 a 8 meses) y gran nubosidad<sup>1</sup>. Las características son su baja amplitud térmica y la nubosidad abundante; presenta entre 8 a 7 meses secos, concentrándose el 80% de las precipitaciones entre los meses de mayo a agosto con una media anual que supera los 350 mm.

Respecto a la población, ésta ha aumentado considerablemente en todo el AMV. Para el año 1975 el total llegaba a 546.662 habitantes, alcanzando a 819.837 en el 2004. Específicamente en la comuna de Valparaíso se ha pasado de 255.286 a 275.982 habitantes y en Viña del Mar de 188.811 a 286.931 (INE, 1992 y 2002). El aumento de población está muy relacionado al aumento de la superpie urbanizada, ya que ésta al igual que la población, experimenta un considerable aumento desde 1975 al 2004. El área construida presentaba una superficie total de 5859,36 hás en 1975, pasando a 14139,99 hás en el 2004, con una tasa de crecimiento de 435,82 hás. anuales. Esto implica una pérdida importante de superficie natural, la que es sustituida por usos artificiales. A su vez, las zonas naturales son impactadas por las distintas actividades humanas que se desarrollan en sus inmediaciones.

### 1.3.2 Características generales de las cuencas analizadas

**Tabla 2. Características de las cuencas analizadas**

Cuenca	Área (Hás)	Clasificación por pendiente	Grupo Hidrológico	Textura de la red de drenaje	Forma de la red de drenaje	Pendiente Media
Miraflores Alto	162,502	Muy Pequeña	B y C	Gruesa	Angulado	19.085/ 34.6%
Yolanda Avda.	574,9035	Muy Pequeña	B y C	Media	Pinado	26.842/ 28.025/
Francia	323,331	Muy Pequeña	B	Media	Pinado	53.2%

Fuente: elaboración propia en base a CHOW 1994; CIREN-CORFO 1997; AGUILO, 2000).

Según la tabla 2, se puede apreciar que la cuenca de mayor extensión es Yolanda, seguida por la de Avda. Francia y la más pequeña es Miraflores Alto. De acuerdo a su

<sup>1</sup> Dirección Meteorológica de Chile, Climas de la Quinta Región

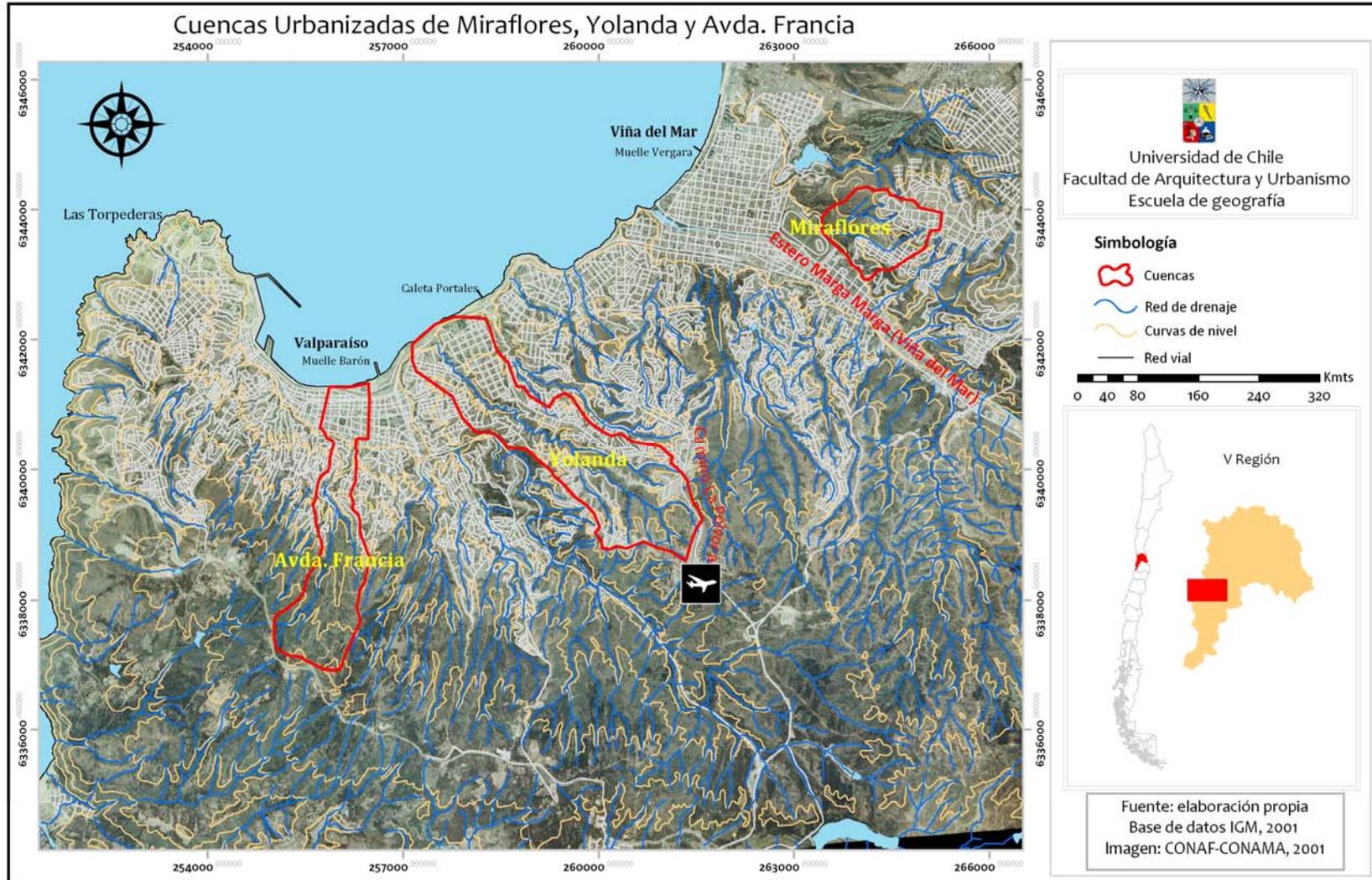
tamaño pueden ser clasificadas como Muy Pequeñas (CHOW, 1994), ya que ninguna supera las 2500 hectáreas (hás). Se observa que están insertas en la serie de suelo Lo Vásquez (Alfisol) (CIREN-CORFO, 1997). La mayor parte de los suelos fueron clasificados dentro del Grupo Hidrológico B, es decir, suelos poco profundos y depositados por el viento (CHOW, 1994); una menor superficie corresponde al Grupo C el que se caracteriza por tener un bajo contenido orgánico. En términos relativos, el Grupo B posee mejores condiciones para la infiltración que el Grupo C.

En cuanto a la red de drenaje se puede apreciar que la cuenca de Miraflores Alto es gruesa y su forma es angulada; respecto de las otras dos cuencas, es decir la de subida de Yolanda y la de Avda. Francia, poseen texturas medias y forma pinada.

Según lo anterior, en condiciones naturales, la cuenca de Miraflores Alto debería tener una escorrentía superficial menor que las cuencas de subida de Yolanda y Avda. Francia (AGUILÓ, 2001). Pero hay que enfatizar que esta situación se daría sólo en condiciones naturales, ya que los niveles de urbanización y de impermeabilidad que presenta cada cuenca, ciertamente inciden en la escorrentía real de cada una.

Finalmente, según las clases de pendientes (CHOW, 1994) la cuenca de Miraflores Alto y la de Yolanda se clasifican como Pendiente Fuerte y la de Avenida Francia se considera como Escarpada.

Figura 1. Área de estudio



## 1.4 OBJETIVOS

### Objetivo general:

Identificar y analizar los impactos ambientales producidos por la expansión urbana del Gran Valparaíso sobre la escorrentía de cuencas urbanizadas con el objeto de proporcionar antecedentes que contribuyan al diseño de acciones que aseguren la salud ambiental de los cauces, la seguridad y calidad de vida de las poblaciones locales.

### Objetivos específicos:

- Identificar y analizar la participación hídrica de los usos de suelo sobre la modificación de la escorrentía superficial de las cuencas de Avenida Francia. Yolanda y Miraflores Alto.
- Identificar los efectos ambientales diferenciales de la urbanización sobre la escorrentía superficial y sobre las áreas de recarga y descarga de las cuencas, considerando variables tales como las pendientes y la posición topológica ocupadas por cada uso de suelo en su interior.
- Analizar los impactos del diseño urbano sobre la configuración de la red de drenaje natural.

## 1.5 Hipótesis

A. *“La expansión urbana en el Gran Valparaíso, dependiendo de su estado, tipo y diseño, lleva consigo cambios diferenciales en los usos y coberturas de los suelos que han afectado adversamente los componentes del ciclo hidrológico, específicamente la escorrentía superficial de las aguas de las cuencas estudiadas”.*

B. *“La posición relativa de la urbanización y la existencia, tipo y superficie ocupada por usos de suelo al interior de las cuencas, incide de forma distintiva sobre la escorrentía urbana.”*

## CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO

El reconocimiento de cuencas se desarrolló sobre la base de la metodología de Aguirre et al (2004): en primer lugar se identificaron las redes hidrográficas, donde se utilizó la información proporcionada por el Instituto Geográfico Militar (IGM, 2001) a una escala 1:20.000; posteriormente se identificaron las divisorias de aguas utilizando las curvas cada 25 metros entregadas por IGM (2001). Para una mejor clasificación de las cuencas estudiadas se procedió a clasificarlas según la forma y textura de la red de drenaje a una escala 1:20.000 en la fotografía aérea (WAY, 1978 en AGUILÓ, et al, 2000).

### 2.1 Identificación y análisis del comportamiento hídrico de los usos de suelo sobre la modificación de la escorrentía superficial.

Es necesario precisar que para este objetivo se asume un área de estudio sin pendiente, considerando única y exclusivamente a los usos y coberturas de suelo como agentes modificadores del coeficiente de escorrentía superficial. Sin embargo, dada la importancia que asume los tipos de suelos sobre la escorrentía superficial de las aguas se consideraron las Series de suelo a partir de las siguientes Ortofotos de CONAF-CONAMA:

**Tabla 3. Serie de Ortofotos 1:20.000 utilizadas en el estudio.**

Ubicación	Año	Escala
Valparaíso	1997	1:20.000
Reñaca	1997	1:20.000
Viña del Mar	1997	1:20.000

Fuente: CIREN-CORFO, Estudio agrológico V Región 1997; Servicio Aéreo Fotogramétrico (SAF) Proyecto Chile 60.

Para la identificación de los usos y coberturas de suelo se utilizaron las siguientes fotografías aéreas:

**Tabla 4. Serie de Fotografías Aéreas utilizadas en el estudio.**

Proyecto	Año	Escala	Resolución	Color
<b>SAF 80</b>	<b>1980</b>	<b>1: 30.000</b>	<b>300 dpi</b>	<b>B/N</b>
<b>FONDEF</b>	<b>1994</b>	<b>1:20.000</b>	<b>300 dpi</b>	<b>B/N</b>
<b>SAF 2005</b>	<b>2005</b>	<b>1:20.000</b>	<b>300 dpi</b>	<b>C</b>

Fuente: SAF 1980, 1994, 2005

#### 2.1.1 Identificación de los usos y coberturas de suelo

Primeramente se definieron las tipologías de usos y coberturas de suelos que se emplearían en el estudio. Basándose en experiencias anteriores como ANDERSON (1976), PAULEIT (2005), y National Land Cover Dataset (NLCD) (2003), entre otros, se definieron tres niveles de análisis (Anexo 1) donde el tercero corresponde al mayor detalle de identificación.

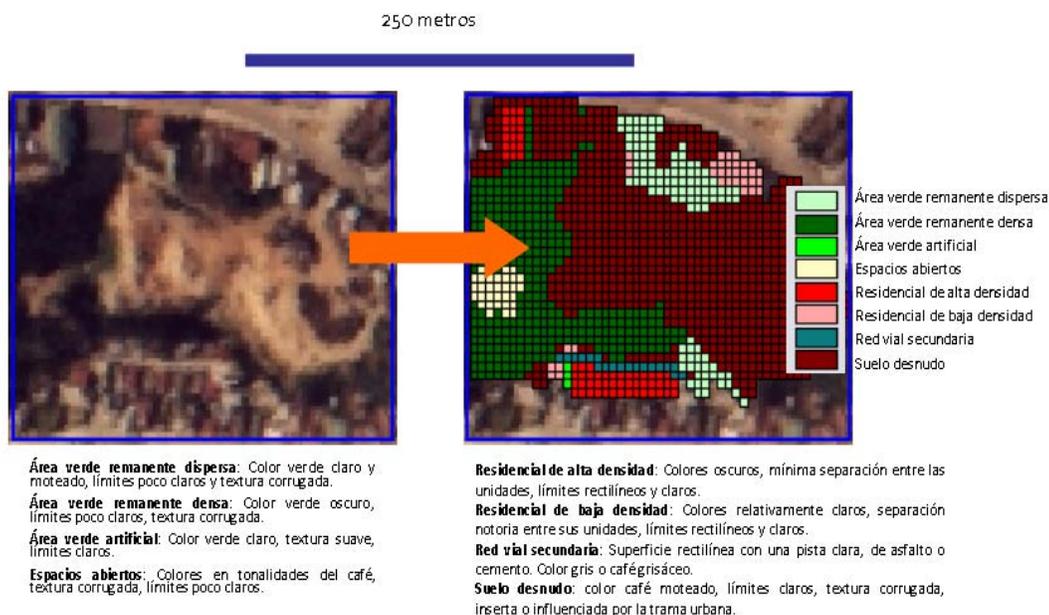
Esta tipología se elaboró sobre la base del nivel de resolución proporcionado por las fotografías aéreas (Tabla 4). Finalmente se determinó una escala de análisis general de 1:10.000 y una escala de análisis en detalle 1:7000 (CHUVIECO, 2001). También se contó con fotografías aéreas de apoyo, las que fueron elaboradas por CIREN-CORFO a escala 1:115.000 (a color) para el año 2001; otro material de apoyo fue la cartografía digital de IGM, 2001 la cual contaba con superficie urbana, superficie vegetal y red vial, entre otros.

Para el reconocimiento de los usos y coberturas de suelo se analizaron distintas características de las fotografías aéreas (CHUVIECO, 2001), lo que permitía distinguir las principales diferencias entre cada uso y cobertura de suelos. Entre éstas se encuentran: textura, color, tamaño relativo y forma.

El procesamiento de la información de los usos de suelo se llevó a cabo mediante la implementación de una grilla de 5x5 metros, metodología utilizada en MOSCOSO (2006), MOLINA (2006) y SMITH (2006), donde a cada píxel se le asignó un valor correspondiente al uso de suelo que representa (Figura 2). Esta grilla fue construida a partir de la extensión *fishnet del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis 9.2*.

Finalmente la información se sometió a procesamiento en Idrisi Andes y ArcGis 9.2 para su análisis espacial.

**Figura 2. Reconocimiento de usos y coberturas mediante grilla**



Fuente: elaboración propia, 2007

### 2.1.2 Evolución de la superficie de los usos de suelo

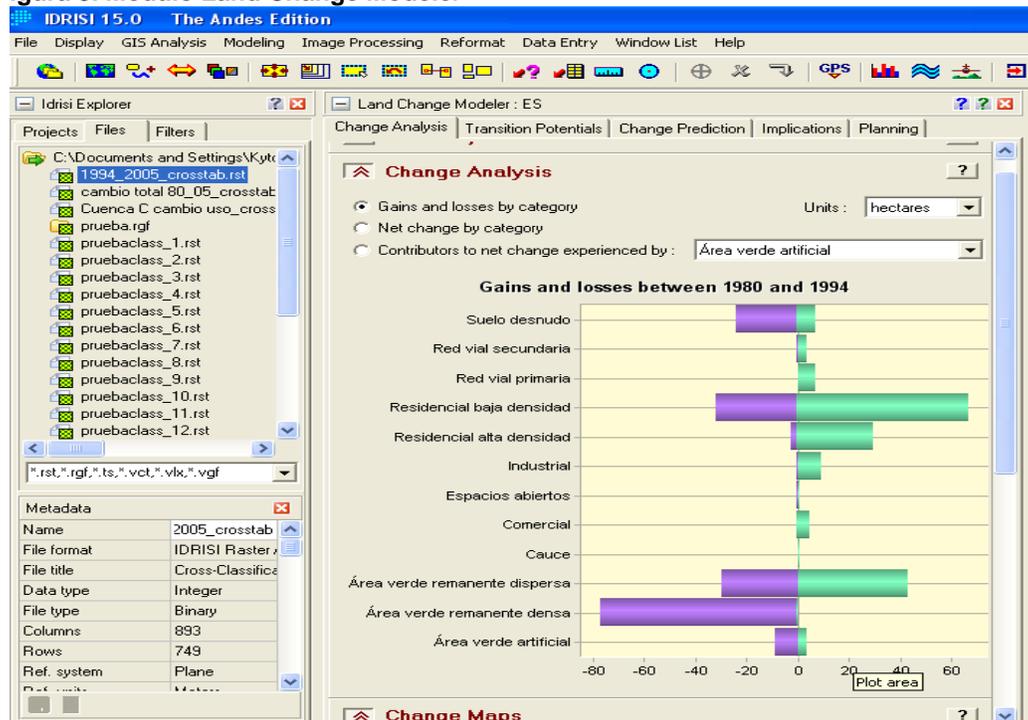
Con el fin de analizar los cambios de los usos de suelo más significativos en las áreas de estudio, se obtuvo información acerca de las superficies que fueron reemplazadas en el tiempo. Los usos del suelo seleccionados fueron los siguientes<sup>2</sup>:

- zonas residenciales de alta densidad;
- zonas residenciales de baja densidad;
- zonas comerciales y de préstamo de servicios;
- Industrial;
- suelo desnudo;
- red vial primaria y
- red vial secundaria.

<sup>2</sup> Se seleccionaron solo usos urbanos debido a que el objetivo general de esta memoria es constatar los efectos de la urbanización sobre la escorrentía superficial.

Para estos fines se utilizó el SIG Idrisi Andes y específicamente el módulo *Land Change Modeler* (Figura 3).

Figura 3. Módulo Land Change Modeler



Fuente: Idrisi Andes y elaboración propia, 2007

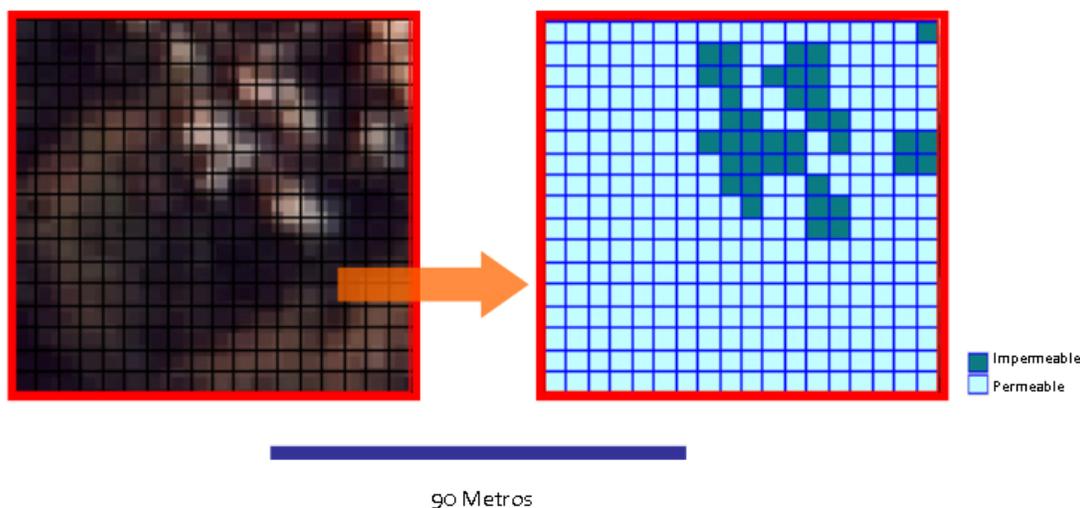
Este módulo permite cuantificar la ganancia o pérdida de superficie experimentada por cada uso o cobertura de suelo, obteniendo un balance entre ambas en el período de tiempo considerado.

### 2.1.3 Reconocimiento de las Áreas Totales Impermeabilizadas (ATIs)

Para el reconocimiento de ATIs se utilizó y adaptó el método de STANUIKYNAS y VAN ABS (2000) utilizado también en ROMERO et al (2003). En la grilla desplegada se identificaron los sectores permeables e impermeables (Figura 4) de cada cuenca. Posteriormente, mediante un cruce de variables (CROSSTAB) elaborado en Idrisi Andes, compuesto por la información de usos y coberturas de suelo junto con la de permeabilidad/impermeabilidad de la cuenca, se obtuvieron las Tasas de Impermeabilización (TI) para cada uso y cobertura de suelos. Lo anterior se realizó para las tres cuencas en los tres años de estudio, de tal forma que la TI final por cada uso resultó del promedio de las cifras anuales.

Para obtener las ATIs de las cuencas se adicionaron en forma ponderada las tasas de impermeabilización de cada uso y cobertura de suelo (ANEXO 2), luego, según ZANDBERGEN (2000) se clasificó el estado ambiental de cada cuenca a partir del porcentaje de ATIS que presentarían en cada año de estudio.

Figura 4. Reconocimiento de ATIs.



Fuente: elaboración propia, 2007

#### 2.1.4 Efectos de la urbanización sobre la escorrentía superficial.

Para determinar los efectos que causa la urbanización y los cambios de usos y coberturas de suelo sobre la escorrentía superficial, se empleó el método desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos, el cual ha sido utilizado en otras investigaciones (HENRÍQUEZ, 2005; MELESSE & SHIH, 2002) entre otros. Este método fue extraído y adaptado de CHOW (1994).

##### 2.1.4.1 Cálculo de Escorrentía superficial<sup>3</sup>

El cálculo de la escorrentía se establece a partir de la siguiente ecuación:

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

Donde: **Pe**: corresponde a la escorrentía de tormenta;

**P**: precipitación de tormenta;

**S**: almacenamiento máximo potencial (para el estudio, en milímetros)<sup>45</sup>.

##### 2.1.4.2 Estimación de la precipitación de tormenta en cada cuenca

Para la estimación espacial de la precipitación de tormenta en cada cuenca se utilizó uno de los métodos de interpolación propuesto por IZQUIERDO & MÁRQUEZ (2006). Este método denominado *Kriging forma parte del módulo 3D Analyst* del SIG ArcGIS 9.2.

<sup>3</sup> Finalmente el coeficiente de escorrentía se obtiene del cociente entre **P** y **Pe**.

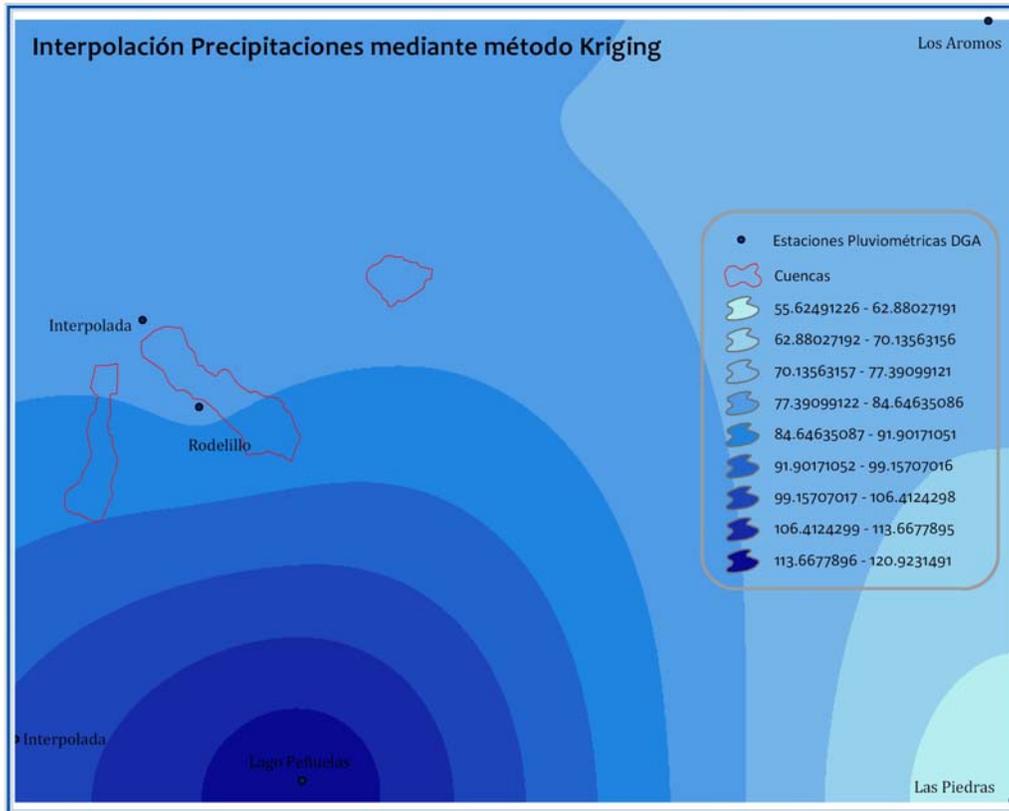
<sup>4</sup> Hay que tener en cuenta que si **S** es mayor a **P**, **Pe** correspondería al valor 0.

<sup>5</sup> En el trabajo original de CHOW (1994) la unidad de medida es la pulgada.

Para realizar este paso se necesitaron los datos de las precipitaciones de tormenta (Máxima en 24 horas) de las estaciones más cercanas a las cuencas estudiadas. Estos datos corresponden a estaciones<sup>6</sup> pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA). Se seleccionaron las precipitaciones de tormentas registradas en los cuatro meses que se caracterizan por ser los más lluviosos en el clima de Valparaíso y Viña del Mar (Mayo, Junio, Julio y Agosto)<sup>7</sup>.

Posteriormente estos datos fueron ingresados al SIG y las precipitaciones fueron interpoladas para la superficie ubicada entre las estaciones pluviométricas DGA (Figura 5), adicionando dos más para poder cubrir la totalidad del área.

Figura 5. Interpolación de precipitaciones de tormenta, método Kriging.



Fuente: elaboración propia, 2007

#### 2.1.4.3 Almacenamiento Máximo Potencial de Agua en Milímetros (mm)(S)

La fórmula para obtener el almacenamiento máximo potencial (S) es la siguiente:

$$S = \left[ \frac{25.400}{CN} \right] - 254$$

Donde: **CN** (Curve Number) representa el número de curva de escorrentía para cada uso y cobertura de suelo (Anexo 3). Este valor es adimensional y es el resultado de evaluaciones empíricas a diversas cuencas y cuyo rango comprende desde 0 a 100<sup>8</sup>.

<sup>6</sup> Los Aromos, Lago Peñuelas, Rodelillo, Las Piedras.

<sup>7</sup> Dirección Meteorológica de Chile, Climas de la Quinta Región.

<sup>8</sup> Cuerpos de agua poseen un CN igual a 100 y todos los demás usos y coberturas poseen CN inferiores a 100.

La suma ponderada de la CN de cada uso y cobertura de suelo existente en cada cuenca permite obtener la CN de la cuenca y de esta manera calcular su coeficiente de escorrentía en cualquier periodo de tiempo.

Es importante aclarar que la CN se ha calculado para tres condiciones de antecedencia de humedad, es decir del número de días de lluvias ocurridas con anterioridad que puede haber saturado el contenido de humedad del suelo<sup>9</sup> (AMC en inglés): Condiciones secas (AMCI), Condiciones de humedad normal (AMCII) y Condiciones húmedas (AMCIII). El AMC del área de estudio es AMC II.

#### **2.1.4.4 Adaptación de usos de suelo y de tasas de impermeabilización a la propuesta del Soil Conservation Service (SCS)**

En el estudio, los usos de suelos propuestos por el SCS fueron adaptados para poder utilizar la tipología seleccionada anteriormente. En esta adaptación fueron consideradas las tasas de impermeabilización de cada uso y cobertura de suelo.

La SCS propone considerar como urbanización de alta densidad a aquella que supere el 65% de áreas impermeables (CN=85). En el desarrollo de este trabajo se identificó una TI de 89% para este tipo de urbanización, por lo cual el valor CN con el que se trabajó corresponde a 92 (el que originalmente corresponde a los distritos comerciales) esto se realizó con el objetivo de adaptar el método a la realidad del área de estudio. Esta relación se utilizó en casos específicos (Red vial secundaria, áreas residenciales de alta y baja densidad), ya que, estos usos presentaban mayores diferencias respecto de lo que propone el método de la SCS. Para los otros casos, los porcentajes de impermeabilización eran bastante similares al trabajo de SCS (Anexo 3).

#### **2.1.4.5 Adaptación de las series y variaciones de suelo a Grupos Hidrológicos.**

Para trabajar con la metodología propuesta, fue necesario adaptar la serie de suelo del área de estudio, es decir, la serie Lo Vásquez, y sus respectivas variaciones, a las características de edáficas y de drenaje de los grupos hidrológicos (Tabla 1). Lo anterior tuvo como fin la asignación de los grupos hidrológicos que correspondieran al área de estudio y así poder contar con esta información, la que es fundamental en el desarrollo de la metodología.

La condición del drenaje para todas las variaciones de la serie de suelo existentes en las tres cuencas corresponde a "bueno" (CIREN, 1997) y poseen una textura de marga arenosa y arcillosa. Según estas características los grupos hidrológicos que corresponden a serie de suelo Lo Vásquez son el Grupo B y el Grupo C.

Luego de obtenidos los grupos hidrológicos, se unieron a la información de usos de suelo mediante el módulo *Union* en ArcGis 9.2.

Finalmente los datos fueron agrupados en tablas georeferenciadas en SIG (ArcGis 9.2) con las cuales se realizaron mapas de Coeficiente de Escorrentía. Para una síntesis de la información y otorgarle un carácter espacial más consistente se crearon rangos en función del aumento, mantención e incremento del coeficiente. Estos rangos fueron creados según HENRÍQUEZ (2005) y son los siguientes (Tabla 5):

---

<sup>9</sup> 5 días antes de la precipitación de tormenta.

**Tabla 5. Rangos de variación del CE**

-1 a 0	Disminución del Coeficiente de Escorrentía
0	Sin Cambio del Coeficiente de Escorrentía
0 a 1	Aumento del Coeficiente de Escorrentía

Fuente: elaboración propia, en base a Henríquez (2005)

A partir de esta clasificación es posible identificar las zonas de cambio o mantención de la escorrentía, y del almacenamiento máximo potencial de agua.

Por último, para identificar la participación de cada uso de suelo urbano en el cambio del Coeficiente de Escorrentía por periodo de estudio, se ponderó su representatividad espacial y su tasa de escurrimiento superficial.

## **2.2 Impacto diferencial de los usos de suelo según la pendiente y su posición topológica al interior de la cuenca sobre el coeficiente de escorrentía superficial y las zonas de recarga y descarga hídrica.**

En este paso se incluyó la variable pendiente en el cálculo de la escorrentía superficial para cinco usos representativos del proceso de urbanización, vale decir: Zonas residenciales de alta y baja densidad, zonas comerciales o de préstamo de bienes y servicios, zonas industriales y sitios eriazos (suelo desnudo).

### **2.2.1 Identificación de pendientes en cada cuenca.**

Para la identificación de las pendientes en cada cuenca se emplearon las curvas de nivel cada 25 metros (IGM) y el software ArcGis 9.2. A partir de estas curvas se procedió a construir un modelo digital de terreno (DEM<sup>10</sup> según sus siglas en inglés) el cual entrega variada información topográfica, incluyendo las pendientes y la pendiente media. Posteriormente se asoció la información de usos y coberturas de suelo con las pendientes (Figura 6).

#### **2.2.1.1 Consideración de la pendiente en el cálculo de la escorrentía superficial.**

Se clasificaron las pendientes en cuatro rangos, según las características topográficas de cada cuenca. Cada rango de pendiente significaba un incremento distinto del Número de Curva de cada uso de suelo considerado. Esto se resolvió a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{89^\circ}{PX} = \frac{100}{Z}$$

Donde: 89° corresponde a la pendiente máxima,

PX = El promedio de pendiente de cada rango;

Z = El valor ponderado del rango de pendiente.

---

<sup>10</sup> Digital Earth Model.

Finalmente con este valor ponderado se obtiene el aumento del valor CN según pendiente de acuerdo a la siguiente fórmula:

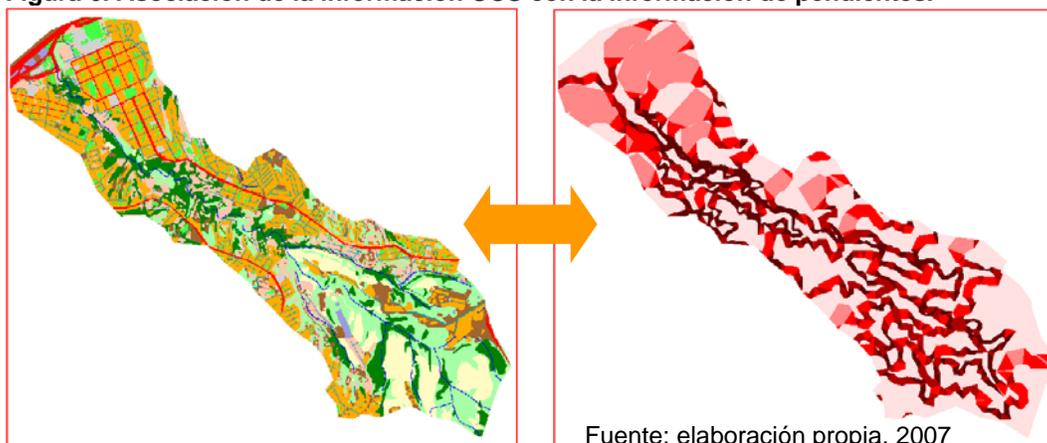
$$\frac{A}{X} = \frac{100}{Z}$$

Donde: A corresponde a la diferencia entre el máximo valor de CN establecido por el SCS (100) y el CN de cada uso de suelo;

Z = el valor ponderado del rango de pendiente;

X = es el aumento del valor de CN según pendiente.

**Figura 6. Asociación de la información UCS con la información de pendientes.**



A partir de lo anteriormente señalado se elaboró la cartografía que representa las zonas que relacionan los coeficientes de escorrentía con la pendiente.

### 2.2.2 Determinación de las Áreas de Máxima y Media Potencialidad de Recarga y de las Áreas de Descarga Potencial.

Considerando que las zonas de recarga corresponden a sectores dónde se favorece la infiltración, se procedió a identificar dichos sectores, clasificando las áreas según los coeficientes de escorrentía de cada uso y cobertura de suelo. Además se consideraron factores como la pendiente, cobertura vegetal y tasas de impermeabilización (ZANDBERGEN; TÖTH, 1963; SOPHOCLEUS, 2002; SCANLON, et al 2002; DELGADO & ANGELES, 2004). La clasificación obtenida a partir de estos rangos es una adaptación de la clasificación utilizada en DELGADO & ANGELES (op.cit) apoyándose en TÖTH (op.cit) debido a que en el presente estudio se trabaja con cuencas pequeñas<sup>11</sup>. La siguiente es la clasificación utilizada para este caso (Tabla 6):

**Tabla 6. CE según zonas de recarga y descarga hídrica**

Clasificación	CE
Áreas de Máxima Potencialidad de Recarga	0-0.21
Áreas de Media Potencialidad de Recarga	0.22-0.54
Áreas de Descarga Potencial	0.55-1

Fuente: elaboración propia, 2007

<sup>11</sup> DELGADO Y ANGELES trabajan en cuencas de superficies regionales.

Es preciso aclarar que dentro de esta clasificación y en el cálculo de los rangos de Coeficiente de Escorrentía se incluyeron variables como la pendiente y se tomaron en cuenta, además, las características de impermeabilidad de cada uso y cobertura.

Finalmente, a partir de esta clasificación se procedió a generar una cartografía concerniente a los cambios sufridos por estas áreas en el periodo de estudio. Esto se llevó a cabo apoyándose en el software Idrisi Andes, específicamente con el módulo *Land Change Modeler* (Figura 3).

### **2.2.3 Reconocimiento de los impactos de la configuración urbana sobre las redes de drenaje.**

Inicialmente, con objetivos descriptivos se reconocieron las jerarquías de la red de drenaje para lo que se empleó el método de STHRALER en AGUILÓ, (op.cit). Consiste básicamente en asignar un valor ponderado según su importancia a cada dren perteneciente a la red total. El mayor valor corresponde a la jerarquía superior, es decir, al cauce principal.

#### **2.2.3.1 Inferencia de la red de drenaje**

Considerando que la red de drenaje disponible tiene un carácter general se procedió a darle una mayor exactitud, infiriendo los drenes a partir de las curvas de nivel. El método empleado corresponde al de AGUIRRE, et al (op.cit) y se realizó en el SIG ArcGis 9.2 y fue corroborado en Idrisi Andes. Esta metodología se empleó para poder observar el comportamiento de la geometría de la red de drenaje a lo largo del periodo de estudio.

A partir de esto, se hizo el cálculo de la longitud lineal y de la densidad de la red de drenaje natural, para lo cual se emplea la siguiente fórmula:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A}$$

Donde: L es la Longitud del drenaje;  
A: es la superficie de la cuenca

Esta ecuación se define simplemente como “el cociente entre la longitud total de las corrientes de la cuenca y la superficie de ésta” (AGUILÓ, op.cit) y tiene como objetivo poder constatar las características de la red de drenaje que fueron trabajadas en esta investigación.

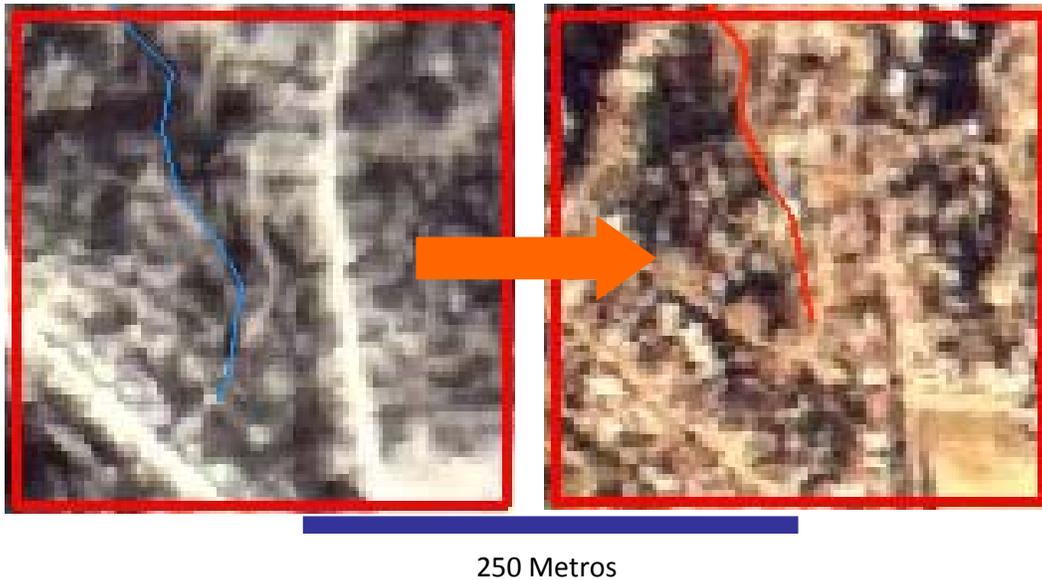
#### **2.2.3.2 Impacto de la urbanización sobre la red de drenaje**

Basándose en los estudios de MAY (1998 y 2001) y de STONE (op.cit) se procedió a analizar las barreras antrópicas que se le imponen a la red de drenaje natural. Estas corresponden básicamente a cruces de calles, calles propiamente tales, suelo desnudo, zonas residenciales o entubaciones de cauces. Es así como para el reconocimiento de estas barreras o “canales artificializados” se superpuso la red de drenaje inferida sobre las fotografías aéreas de cada año analizado (Tabla 4) y mediante el editor de ArcGis 9.2 se fue modificando esta red según las estructuras urbanas que se superponían sobre los drenes naturales, actuando como barreras horizontales y verticales<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> Las barreras horizontales corresponden a las que impiden la infiltración y las verticales son las que impiden la escorrentía superficial.

**Figura 7. Reconocimiento de las modificaciones de los drenes de drenaje natural**



Fuente: elaboración propia, 2007

La figura 7 muestra como los drenes naturales van cambiando su forma y/o su extensión a lo largo de los años.

Para lograr un análisis más certero y efectivo, se compararon las densidades del drenaje natural y del artificializado (MAY, 1998) con el claro objetivo de verificar las alteraciones sufridas por la red de drenaje debido a los impactos de la urbanización.

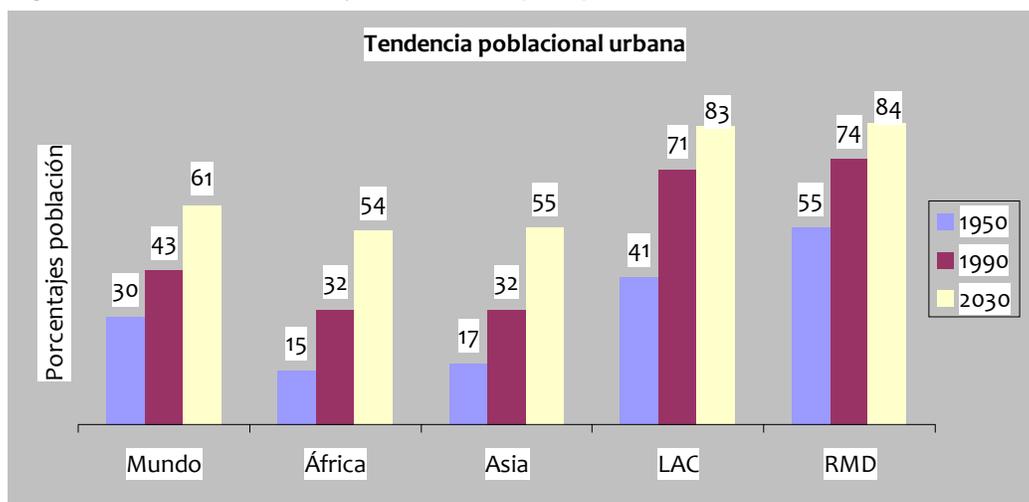
## CAPÍTULO III: ESTADO DEL ASUNTO

### 3.1 La ciudad, expansión urbana y medio ambiente

#### 3.1.1 Relevancia ambiental de la ciudad

La ciudad, como nicho ecológico de la humanidad (ROMERO, et al, 2005) es el soporte fundamental de la población en todo el mundo y su hábitat de preferencia. La mayor parte de la población se concentra en zonas urbanas y las proyecciones indican que este fenómeno claramente tiende al aumento en el futuro (Figura 8).

**Figura 8. Tendencia poblacional en África, Asia, Latinoamérica y El Caribe (LAC), Regiones Más Desarrolladas y en el Mundo (RMD)**



Fuente: Naciones Unidas, 2000.

Este aumento poblacional está asociado al aumento de la superficie construida (AZÓCAR, et al, 2003) por lo que se entiende que la expansión urbana es un fenómeno que seguirá reproduciéndose en el futuro. En Chile el 87% de la población vive en entidades urbanas (ROMERO, et al, 2005) y las superficies ocupadas por usos urbanos de los suelos se ubican por sobre superficies naturales, las que aportan servicios ambientales, los que a su vez son parte de la salud del medio ambiente (ROMERO & VÁSQUEZ, 2005). Los efectos, que se entienden como negativos, producidos por la urbanización de los ecosistemas, serán absorbidos, en parte, por la misma población que se asienta en las ciudades.

Las ciudades en América Latina han sufrido procesos de notable crecimiento espacial horizontal (JANOSCHKA, 2002; BORSDORF, 2000; entre otros), lo cual se ha debido a políticas de libre mercado que se han implementado las últimas décadas, por las cuales el suelo se transa como un bien más; otros factores del crecimiento de la ciudad han sido el aumento de la población, las necesidades crecientes de espacio por parte de las actividades y necesidades humanas (trabajo, salud, entre otros) (BORSDORF, op.cit; BÄHR & MERTINS, 1998; TIMMS, 1996), para todo lo cual la ciudad debe ser el sustento o el hábitat del ser humano (ARGUEDOS, 1998).

La expansión espacial de las ciudades es un proceso que no tiene límites físicos claros e incluso se puede definir como ilimitada, y afecta a las metrópolis, ciudades grandes, intermedias y pequeñas en todo el país (ROMERO, et al, 2005). Dicha expansión responde a factores que son parte de componentes naturales y del espacio

cultural (GONZALEZ, 1994). Cada uno de estos factores y componentes asigna un sello distintivo al crecimiento de cada ciudad.

El crecimiento de la ciudad, comienza a ampliar sus relaciones y conexiones con otras ciudades (PUJADAS & FONT, 1998), aumentando el flujo de energía, materia e información, por lo que se van creando concentraciones o aglomeraciones importantes, desde el punto de vista urbano.

Este crecimiento puede tener distintas formas y tendencias como la “mancha de aceite”, que principalmente indica la agregación de superficies urbanizadas de manera adyacente al medio construido preexistente, que también se puede denominar como “acreción por adherencia”. Esta tendencia original ha dado pie a patrones más complejos de crecimiento espacial de las ciudades (ROMERO, et al, 2005), tales como “salto de rana”, que esencialmente corresponde a suburbanizaciones y núcleos urbanos aislados y vallados (ROMERO, et al, 2005). Igualmente se ha observado un crecimiento tentacular, que responde principalmente al estímulo originado por la creación de vías de transporte, ya que, la urbanización se introduce paralela y adyacente a los ejes viales (ROMERO, et al, op.cit).

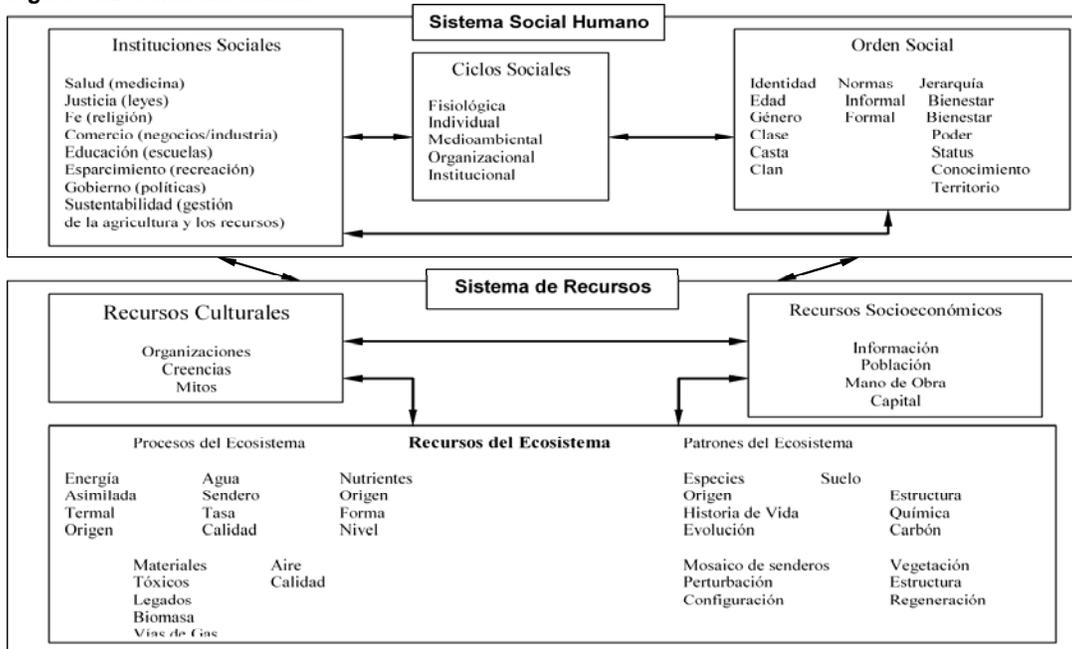
Los procesos de expansión espacial de las ciudades, sin importar su forma, causan daños irreversibles al medio ambiente natural. Esta es la razón por la cual el crecimiento descontrolado de las ciudades se asocia a la insustentabilidad ambiental. Las áreas urbanas implican pérdidas de importantes suelos agrícolas o el desaparecimiento de áreas naturales que prestan valiosos servicios ambientales. Las mayores y crecientes distancias entre los hogares y los lugares de trabajo y centros de servicios aumentan crecientemente las distancias y los tiempos de recorrido y con ello, la producción de contaminantes atmosféricos provocados por el combustible que se requiere para sostener complejos sistemas de transporte. El paisaje se cubre con cemento, cambiando completamente los flujos de energía y materia, aumentando progresivamente la escorrentía superficial al mismo tiempo que se reduce la permeabilidad de los suelos y con ello, la posibilidad de almacenar agua para enfrentar las estaciones y años secos.

### **3.2 Medio Ambiente Urbano**

El medio ambiente urbano se define como el lugar donde se llevan a cabo las relaciones entre el medio físico (agua, aire, suelo), el medio construido (edificaciones, plazas, parques), los elementos biológicos y la sociedad (población) (ARIAS, et al, 2006). En el medio ambiente urbano se presentan relaciones de situación y de acción, de localización respectiva y reciprocidad entre cada elemento que lo compone (ARIAS, et al, 2006). En otras palabras, el medio ambiente urbano, es el espacio donde el hombre se relaciona con su entorno construido, con la naturaleza asociada y donde cada elemento componente posee relaciones de interdependencia, lo que significa que se trata de un sistema complejo, heterogéneo e híbrido (PICKET, 1997).

En la figura 9 se expresa la heterogeneidad del ecosistema, tomando en cuenta elementos del espacio natural y del espacio social, dando a entender, claramente, que es un sistema híbrido (hombre-naturaleza) y de interrelaciones entre sus componentes (PICKETT, 1997). Es claro que el sistema social humano, mediante sus instituciones, ciclos y órdenes influye y está influido por los recursos del ecosistema. En definitiva, la ciudad como ecosistema humano implica un sistema complejo donde interactúan tanto agentes antrópicos como naturales.

Figura 9. Ecosistema Humano



Fuente: PICKETT, et al, 1997

### 3.2.1 Efectos o implicancias del crecimiento urbano

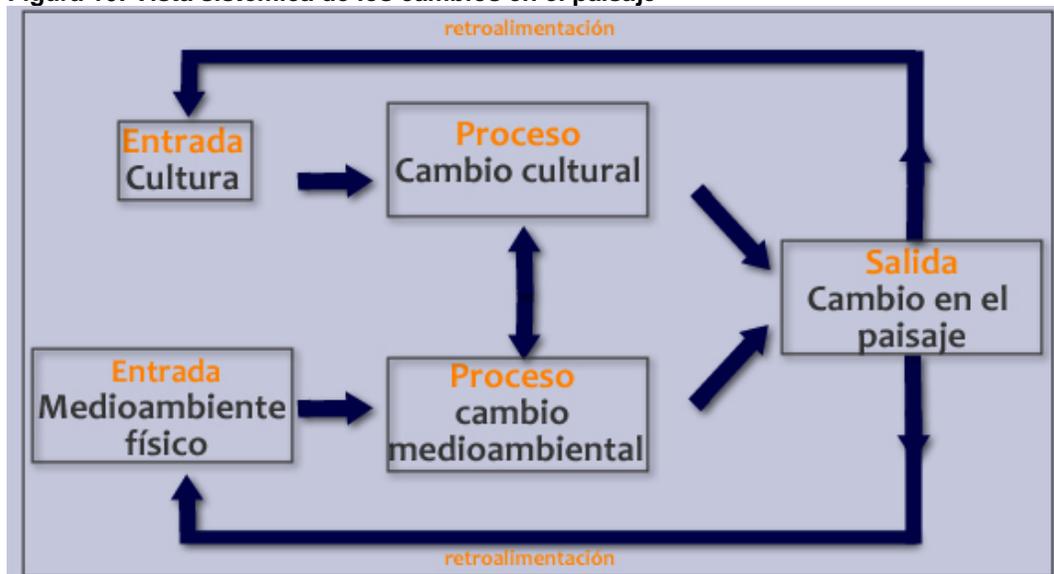
Es evidente que la urbanización provoca cambios ambientales en las superficies por las cuales avanza: alteración del ciclo hidrológico, biológico y vegetacional, entre otros, donde casos puntuales como el aumento de las superficies impermeables al interior de una cuenca son manifestaciones de la alteración del medio natural.

Claramente el aumento poblacional, está ligado estrechamente al incremento de la superficie urbana. Esto indica una acentuación en la presión por el uso del suelo y por ende una degradación en el medio natural (JAQUE, 1994), debido a que son eliminados suelos con características únicas e importantes para la salud ambiental (ROMERO, et al, 2005).

El desarrollo de las ciudades implica la artificialización de los suelos en desmedro de espacios vegetacionales, lo que provoca anomalías en el sistema natural, (PICKETT, et al, 1997) que afectan al hombre y a la naturaleza. Esto se debe esencialmente a las "conexiones mecanicistas entre lo humano y lo natural" (PICKETT, et al, op.cit) ya que la riqueza existente en la diversidad de las interrelaciones entre los componentes naturales y antrópicos le dan una complejidad importante al ecosistema, lo que finalmente se traduce en una degradación de éste.

En este sentido, se puede entender como un sistema a estas relaciones entre lo natural y lo artificial (WOOD & HANDLEY, 2001), es decir, existe un traspaso de energía entre los distintos componentes del medio ambiente. Tanto los procesos culturales (sociales) y ambientales derivan en los cambios en el paisaje (Figura 10).

**Figura 10: Vista sistémica de los cambios en el paisaje**



Fuente: DAWSON, 1983 en WOOD & HANDLEY, 2001

Basándose en la figura 10, es posible establecer que las “respuestas del medio natural aluden a estímulos antrópicos” (GONZALEZ, 1994) o culturales y a procesos propios del medioambiente físico, esto quiere decir que, a medida que avanza la urbanización, siguiendo cualquier patrón, se producirán impactos crecientes sobre la naturaleza.

En este contexto, en el medio ambiente urbano se presentan una serie de relaciones que están enfocadas al soporte y al desarrollo del espacio social, de esta manera se entiende que las características de la sociedad se reflejan en las particularidades del medio en que se encuentra, es decir, una sociedad violenta se expresa en una ciudad que no respeta el medio ambiente ni el espacio natural (ROMERO et al, 2005).

La urbanización paulatina y progresiva del suelo se asocia a conflictos en el “hábitat contemporáneo” (FERNÁNDEZ, 2003), es decir, existen efectos medio ambientales producidos por el avance indiscriminado y desreglado de la superficie construida. A su vez esto genera nuevas combinaciones de “stresses, perturbaciones, estructuras y funciones de los sistemas ecológicos” (PICKETT, et al, 1997).

### 3.3 Usos y coberturas del suelo y efectos medioambientales asociados

Uso de suelo se entiende por “el destino asignado por el hombre a cada unidad de territorio” (ROMERO & VÁSQUEZ, 2005), es decir, la función humana que se da al espacio (PAULEIT, 2005); en tanto la cobertura de suelo se refiere a “las unidades vegetales que cubren la superficie terrestre” (ROMERO & VÁSQUEZ, 2005).

La expansión urbana implica una serie de cambios de usos y coberturas de suelo (PAULEIT, 2005; WHITFORD, 2001) que implica que cubiertas permeables son sustituidas por usos altamente impermeables. Estos cambios evidentemente traen consecuencias ambientales, debido a que cada uso y cobertura particular posee características propias que inciden de manera diferenciada en el medio ambiente (Figura 11) (ROMERO & VÁSQUEZ, 2005).

Ejemplo de lo anterior, es la ponderación diferenciada que tiene cada uso y cobertura del suelo respecto de su tasa específica de impermeabilización (ROMERO & VÁSQUEZ, 2005) lo que sumado expresa el área total impermeabilizada (ATI) de una

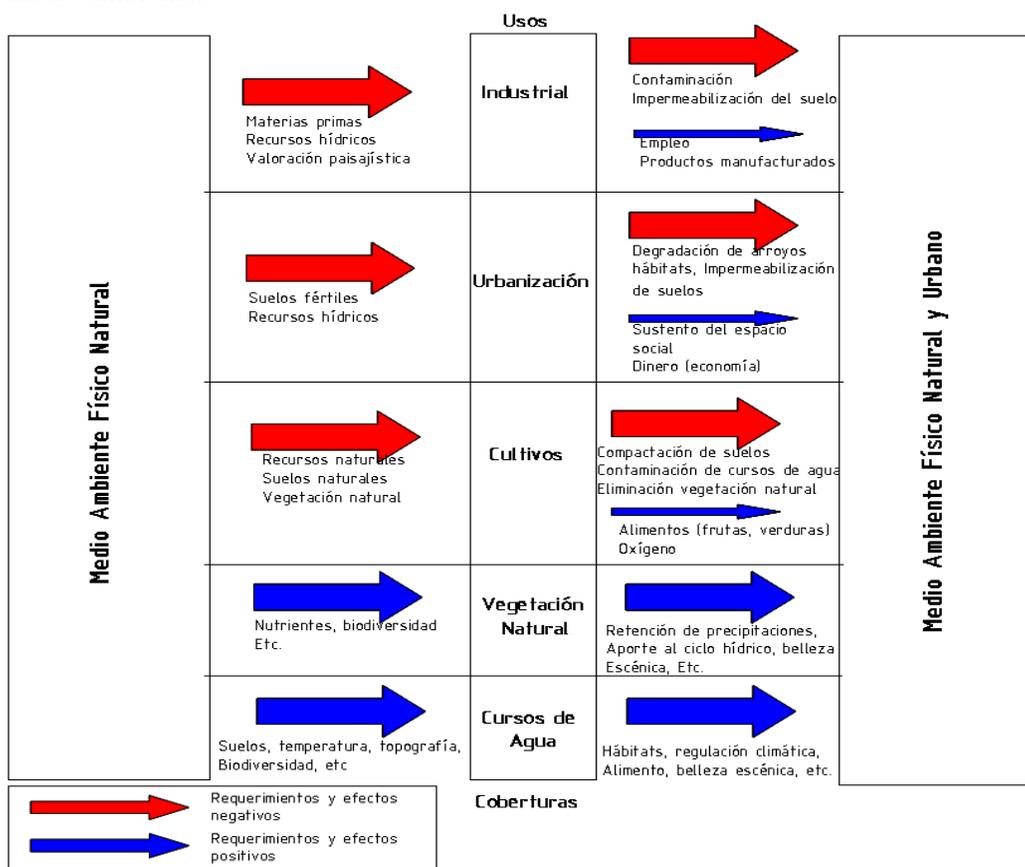
cuenca. Las ATIs también son un excelente indicador de la salud ambiental de la cuenca (STONE, 2004).

### 3.3.1 Cambios de usos y coberturas

Es claro que en la medida en que avanza la urbanización ciertos tipos de usos del suelo van reemplazando a otros usos y/o a coberturas naturales. Como ya se mencionó, cada uso/cobertura del suelo presenta diferentes características y por ende diversos efectos sobre el medio ambiente (Figura 11).

El reemplazo de coberturas de vegetación por usos urbanos o industriales es un proceso común (PETERMANN, 2006), debido a que la ciudad al expandirse ocupa espacios naturales, ya sea como extensión urbana o como intrusiones con fines extractivos como las industrias, y también como las actividades de transporte (Aeropuertos, aeródromos).

**Figura 11: Relaciones diferenciales entre los distintos usos y coberturas del suelo con el medio ambiente.**



Fuente: elaboración propia, en base a ROMERO & VÁSQUEZ, 2005; MAY, 1998; PAULEIT, et al, 2005.

El avance de la planta urbana y por consiguiente el cambio entre usos y coberturas de suelo, provoca cambios nocivos en el medio ambiente (WHITFORD, et al, 2001). En este contexto, usos urbanos o urbanizaciones precarias como caseríos, villorrios, u entidades más desarrolladas afectan de manera distinta a coberturas naturales como los bosques caducifolios, provocando incendios forestales o degradación (QUINTANILLA, 1998). Los distintos tipos de urbanización, como las de alta o baja

densidad, por mencionar un ejemplo, presentan diferentes efectos sobre el medio ambiente (Figura 11<sup>13</sup>).

La heterogeneidad espacial es un rasgo importante, dentro del contexto del cambio de usos y coberturas del suelo analizado desde el punto de vista de la Ecología de Paisajes, ya que influye en “los procesos y estructuras de los ecosistemas a todas las escalas. Crea o cierra oportunidades a los organismos y controla la diversidad biológica” (PICKET, et al, 1997), facilitando o perturbando los flujos de energía o materia.

También es clave mencionar que “los cambios en los usos de suelo y de las actividades urbanas son procesos continuos y dinámicos” (RUIZ, 2005), que tienden a aumentar, debido a factores económicos, demográficos y culturales (PAULEIT, 2005).

### 3.4 Urbanización de cuencas

Se debe entender que la urbanización no es un fenómeno que afecta solamente a paisajes planos, llanuras o valles. Las condiciones topográficas, en muchas ocasiones, son entes reguladores de la urbanización y la adaptación de la morfología de la ciudad hacia estas condiciones topográficas otorga un sello distintivo al emplazamiento urbano (CASTRO & BRIGNARDELLO, 1998). Los efectos del avance urbano sobre una cuenca presenta efectos sobre distintos subsistemas del ecosistema general, es decir, sobre la hidrología, la geomorfología, la vegetación, la temperatura, la química, y la biología (PAUL & MEYER, 2001).

Específicamente, diversos autores han identificado efectos producidos por la urbanización de cuencas, algunos de estos efectos son:

- Alteración del ciclo hidrológico (WAGNER & ANDERSON, 2004; BOWLES, 2002; ROMERO & VÁSQUEZ, 2005; PAUL & MEYER, 2001)
- Alteraciones en los balances de energía y en los microclimas (ROMERO & VÁSQUEZ, 2005).
- Degradación de la biota acuática (MAY, et al, 1998)
- Degradación de los arroyos (MARCHBANKS, 2000; BARNES, et al, 2001; SLEAVIN & CIVCO, 2000)
- Efectos sobre los habitats terrestres (BARNES, et al, 2001)
- Cambios estéticos en el paisaje (MAY, et al, 1998)

El aumento de la superficie construida por sobre una cuenca implica importantes cambios sobre las condiciones naturales y sobre el ciclo hidrológico asociado a esta (FERNANDEZ, 2003).

#### 3.4.1 Urbanización y ciclo hidrológico

“El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida” (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS); 2001). Estos fenómenos ocurren en condiciones naturales, con una cuenca inalterada, por lo tanto se entiende que la expansión urbana interfiere con el ciclo

---

<sup>13</sup> La figura 11 muestra las relaciones entre los distintos usos y coberturas con el medio ambiente. La intensidad de estas relaciones se denota con el ancho de cada flecha, al igual que la dirección en que están orientadas.

hidrológico, en sus distintas fases. A su vez, la urbanización de distintos sectores de una cuenca implica diferentes efectos sobre el sistema natural e hidrológico:

*Urbanización de la parte alta de una cuenca:* implica la deforestación, y por ende una menor retención de agua por parte de las plantas (BOWLES, 2002), ésto a su vez produce una mayor saturación de los suelos y por ende su compactación y aumento del coeficiente de escorrentía<sup>14</sup> (ROMERO, 2004; DIETZ & CLAUSEN, 2007), efectos que se potencializan al presentarse pendientes abruptas. Este aumento de la escorrentía desencadena procesos erosivos, los que se denotan en la alteración de la morfología, composición química y biológica de los cursos de agua, efectos que se ven plasmados aguas abajo de la cuenca (PAUL & MEYER, 2001).

*Urbanización de la parte media de una cuenca:* implica los mismos procesos anteriormente señalados, pero por poseer una menor pendiente, éstos son más suaves y producen una menor alteración al ciclo hidrológico (JAQUE, 1994) y al sistema natural en general, generando, por ende, menores efectos aguas abajo de la cuenca.

*Urbanización de la parte baja de una cuenca:* según diversos autores, como Fernández (2003), la construcción de superficies en zonas bajas de una cuenca implica menores efectos sobre el ciclo hidrológico, ya que, no se altera en gran medida los elementos anteriormente mencionados.

Si se analizan los tres sectores urbanizados, se entiende la generación de un efecto mayor y sinérgico sobre el ciclo hidrológico, ya que se verían afectados todos los componentes naturales y sociales del medio ambiente (Figura 11). También se debe tener en consideración que la respuesta ante eventos hídricos de una cuenca es más compleja a medida en que el hombre interfiere en ella, es decir, según la configuración y usos de suelo que imponga (CHOW, 1994).

Junto con lo anterior es evidente que la infiltración<sup>15</sup> es distinta en los diferentes sectores de la cuenca (DELGADO & ÁNGELES, 2004) y la urbanización indiscriminada y desinformada (STONE, 2004) provoca cambios en zonas altamente sensibles desde el punto de vista ambiental (DELGADO & ANGELES, op.cit; SOPHOCLEUS, 2002; SCANLON, et al, 2002) como lo son las zonas de recarga (favorece la infiltración) y descarga hídrica (favorece el escurrimiento superficial).

Algunos autores (ROMERO, et al, 2005) plantean que la mayor parte de los efectos negativos sobre el medio ambiente son los producidos por la alteración al ciclo hidrológico. A continuación se exhibirán las principales consecuencias sobre el **ciclo hidrológico**, provocadas por el avance de la ciudad:

*Disminución de la permeabilidad de los suelos:* las coberturas naturales de bosques, matorrales u otro tipo de vegetación tiene propiedades tales que permiten la infiltración ideal del agua en los suelos (PAUL & MEYER, 2001). Su eliminación producto de la urbanización implica pasar de "cifras muy bajas de impermeabilización" a cifras muy altas (ROMERO, et al, 2005; ROMERO & VÁSQUEZ, 2005; PAULEIT, et al, 2004, FERNANDEZ, 2003; entre otros). La disminución de la permeabilidad se asocia directamente a un aumento de la escorrentía<sup>16</sup>, tanto superficial como subterránea (ROMERO, et al, 2004), ya que la superficie de los suelos se compacta o se

---

<sup>14</sup> El coeficiente de escorrentía es la relación entre el agua lluvia que infiltra y la que se desliza en forma laminar (CHOW, 1994).

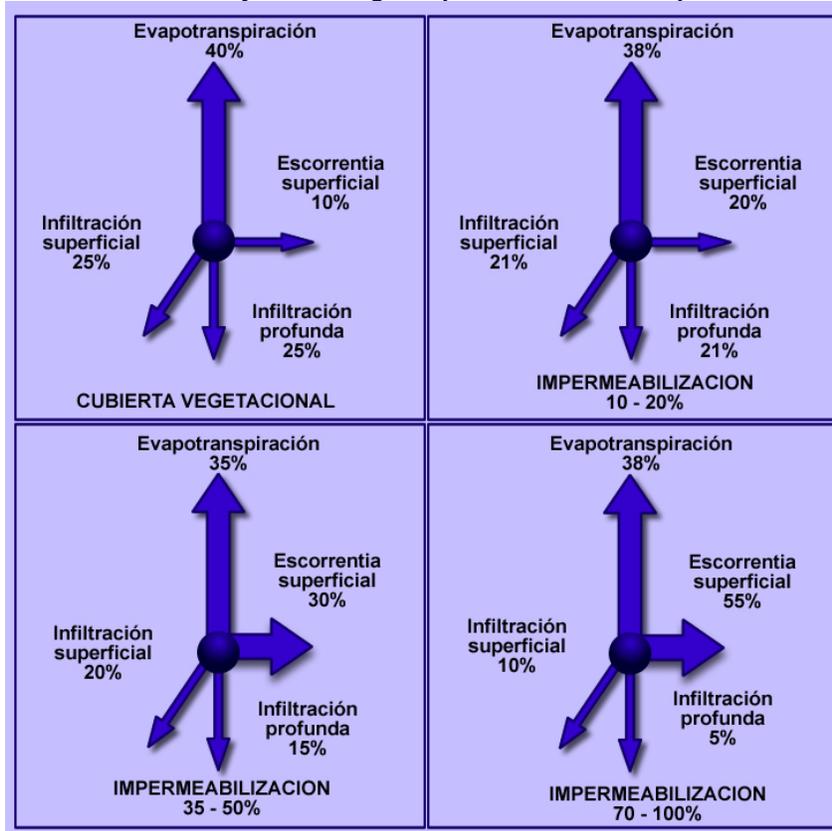
<sup>15</sup> Esta depende del tipo de suelo y del tipo de uso de suelo (HUNDECHA & BÁROSSY, 2004).

<sup>16</sup> La escorrentía corresponde a la fracción de las precipitaciones que nutre los flujos de agua. (Romero, et al, 2003).

artificializa, lo que produce inundaciones, anegamientos y otros desastres urbanos, agrícolas o de otra índole, asociados a los procesos naturales (FERRANDO, 2003; AUDEFOY, 2003). Según ARNOLD & GIBBONS (1996), la impermeabilización de los suelos provoca alteraciones en todo el ciclo hidrológico, y se puede observar cuantitativamente en la disminución de la evapotranspiración de un 40% hasta un 30% o de un aumento de la escorrentía desde un 10% en condiciones naturales, hasta un 55% en condiciones artificiales (Figura 12).

La impermeabilización de las cuencas incide en la calidad del cauce fluvial (SLEAVIN & CIVCO, 2000; ROMERO & VÁSQUEZ, 2005), de tal manera que un mayor porcentaje de ATI implica una mayor degradación del cauce fluvial (Figura 13). De aquí también se desprende la idea anteriormente planteada acerca de que las ATIs de una cuenca son un indicador importante de su salud ambiental, ya que influyen sobre una serie de componentes del medio ambiente, no sólo hídricos, sino que también termales, biológicos y químicos.

**Figura 12. Cambios en los flujos hidrológicos por efectos de la impermeabilización**



Fuente: ARNOLD & GIBBONS, 1996 en ROMERO & VÁSQUEZ, 2005.

La figura 12 exhibe los cambios en los flujos hidrológicos producto de la impermeabilización del suelo.

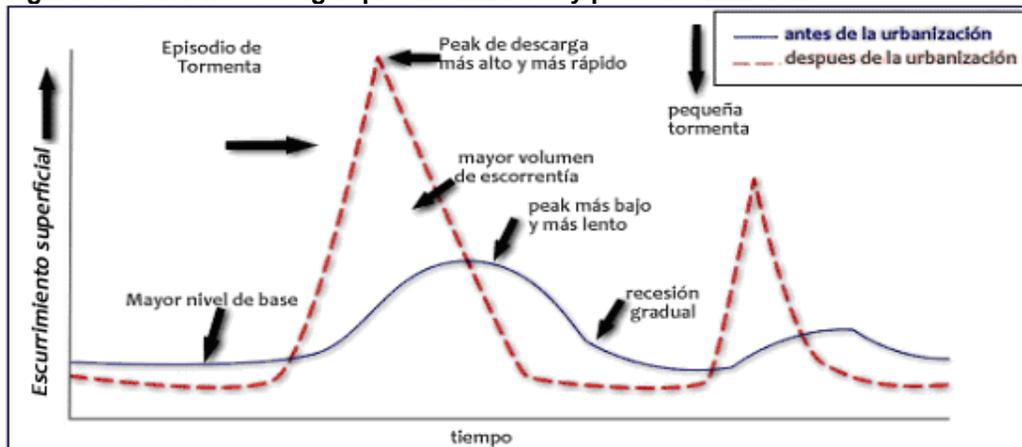
**Figura 13. Relación entre la impermeabilidad de las cuencas y la calidad del cauce fluvial, y con el estado del ambiente en cuencas urbanas**



Fuente: ZANDBERGEN, et al 2000, en ROMERO & VÁSQUEZ, 2005.

La impermeabilización y específicamente las ATI son un indicador importante “para medir el impacto negativo de los cambios de uso de suelo sobre los sistemas acuáticos (hídricos)” (ENGLISH, et al, 2000), como se puede apreciar en la figura 13. Se entiende que a una mayor superficie de ATIs se produce una mayor degradación del sistema natural y por ende del sistema ambiental y social.

**Figura 14. Corrientes de agua pre-urbanización y post urbanización.**



Fuente: English, et al, 2000.

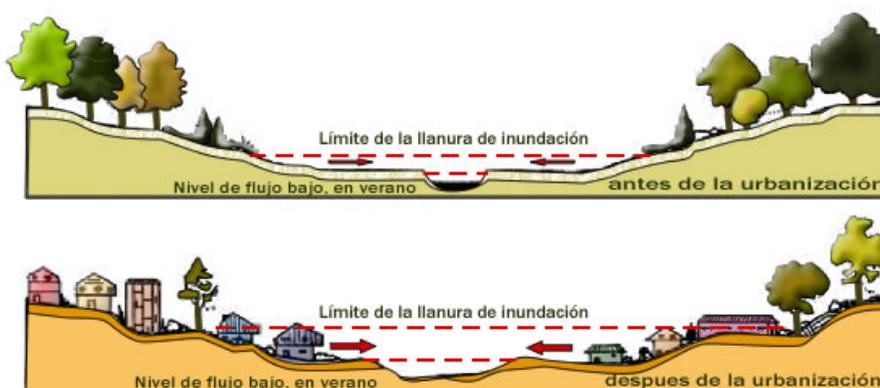
Otros efectos sobre el ciclo hidrológico son los producidos sobre las corrientes y flujos de agua y sedimentos. Según autores como PAUL & MEYER (2001) la urbanización produce una modificación de la morfología de los drenes y del lecho fluvial, como resultado de la alteración en la cantidad y composición de los sedimentos; junto a lo anterior se puede establecer que frente a eventos naturales como las precipitaciones de tormentas o precipitaciones de larga duración, las superficies pre urbanización presentan tasas de corrientes de agua moderadas, lo que se vuelve extremo en condiciones post urbanización (Figura 14). Así por ejemplo la escorrentía es mayor una vez ocurrida la urbanización y los peaks de descarga son más rápidos respecto al momento de mayor precipitación. En condiciones naturales la recesión (regreso a las condiciones normales antes de un evento natural como precipitaciones) es gradual, lo que en una cuenca urbanizada no se aprecia, siendo incluso abrupta (ENGLISH, 2000).

### 3.4.1.1 Modificación de la geometría de la red de drenaje

La urbanización muchas veces modifica tanto la geometría del drenaje como las características del lecho de los drenes naturales, que son sustituidas por vías pavimentadas. Claro es el ejemplo de la quebrada de Macul, en Santiago, donde se superpone la avenida Departamental (MUÑOZ, 1990) o la quebrada de Peñalolén convertida en avenida José Arrieta y la quebrada de lo Hermida que fue transformada en avenida Grecia (MARIANGEL, 1990). Es así como a medida que los usos de suelo impermeables se acercan al lecho, se modifican los niveles de las crecidas, ya que, la vegetación es eliminada y el agua que llega por el proceso de escorrentía es mayor, provocando un aumento en el límite de la llanura de inundación (Figura 15).

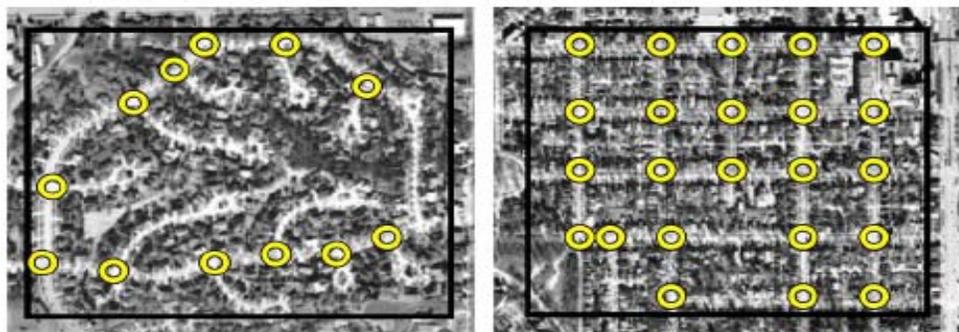
Por otro lado, la inserción de la trama urbana, modifica indiscutiblemente la geometría de las redes de drenaje (STONE, 2004) debido a que se transforman las formas naturales de los drenes, generándose formas rectas e incluso acortándose o eliminándose (Figura 16). Esto se ve reflejado en los tiempos de respuesta para una tormenta (HENRIQUEZ, 2005) donde los peaks de descarga son mayores en las áreas artificializadas (Figura 14).

**Figura 15. Modificación del cauce a partir de la urbanización.**



Fuente: ENGLISH, 2000

**Figura 16. Modificación geometría de la red de drenaje (círculos denotan la intersección de las calles)**



**Red dendrítica**  
12 intersecciones en  $\frac{1}{4}$  Km.<sup>2</sup>

**Red de rejilla**  
23 intersecciones en  $\frac{1}{4}$  Km.<sup>2</sup>

Fuente: STONE, 2004

### 3.5 El contexto del estudio en Chile.

Estudios de la alteración del ciclo hidrológico a partir del avance de la urbanización no son muy comunes y sólo algunos autores como Romero et. al (2003b) los han realizado en ciudades intermedias como Quillota, Temuco y Chillán y también en el piedemonte de Santiago (Romero et al, 2003a). Estos estudios han demostrado que el estado de avance de los procesos de urbanización está ligados a la impermeabilización de las cuencas y por ende en los efectos del crecimiento de la ciudad sobre el ciclo hidrológico (HENRIQUEZ, 2005). Junto con esto, HENRIQUEZ (op.cit) indica que el emplazamiento de áreas verdes nuevas o la reforestación implican la mitigación de los efectos de la urbanización sobre el ciclo hidrológico.

Por otro lado, en los estudios ya citados se señala que “no existe una relación lineal entre las tasas de urbanización, las ATIs y las tasas de escorrentía superficial” (Romero y Vásquez, op.cit; HENRIQUEZ, op.cit) ya que los coeficientes de escorrentía están relacionados con otros factores como los tipos, patrones y diseño de urbanización, las características del drenaje de los suelos urbanizados (grupos hidrológicos) y de gran importancia son los usos y coberturas de suelo empleados en la extensión de los límites urbanos.

Finalmente, es necesario explicar que en Chile no se han considerado dentro de la planificación de las ciudades los efectos de la expansión urbana sobre los componentes hídricos (HENRIQUEZ, op.cit).

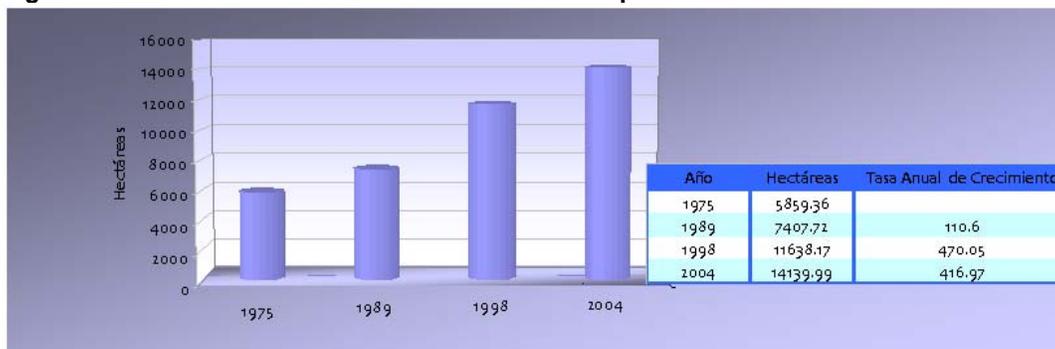
### 3.6 Antecedentes

#### 3.6.1 Expansión urbana de Valparaíso entre 1975 y el 2004.

Los límites urbanos del Gran Valparaíso han aumentado su superficie considerablemente desde 1975 al 2004. La superficie urbana del 2004, ha duplicado la existente en 1975 a través de diferentes tasas de crecimiento en los períodos observados (Figura 17). Esta expansión territorial ha estado ligada al aumento poblacional experimentado por el Gran Valparaíso (AZÓCAR, et al, 2003).

El Gran Valparaíso, se presentaba como una entidad urbana relativamente compacta en 1975. Valparaíso, Viña del Mar y Concón, eran entidades urbanas separadas cercanas a la costa; Quilpué y Villa Alemana que se ubican al oriente, eran unidades compactas separadas del resto de las comunas (Figura 18). Solamente algunos sectores, como Placilla, se encontraban alejados de la mancha urbana, formando unidades celulares, bien diferenciadas.

**Figura 17. Evolución Límites urbanos en el Gran Valparaíso.**

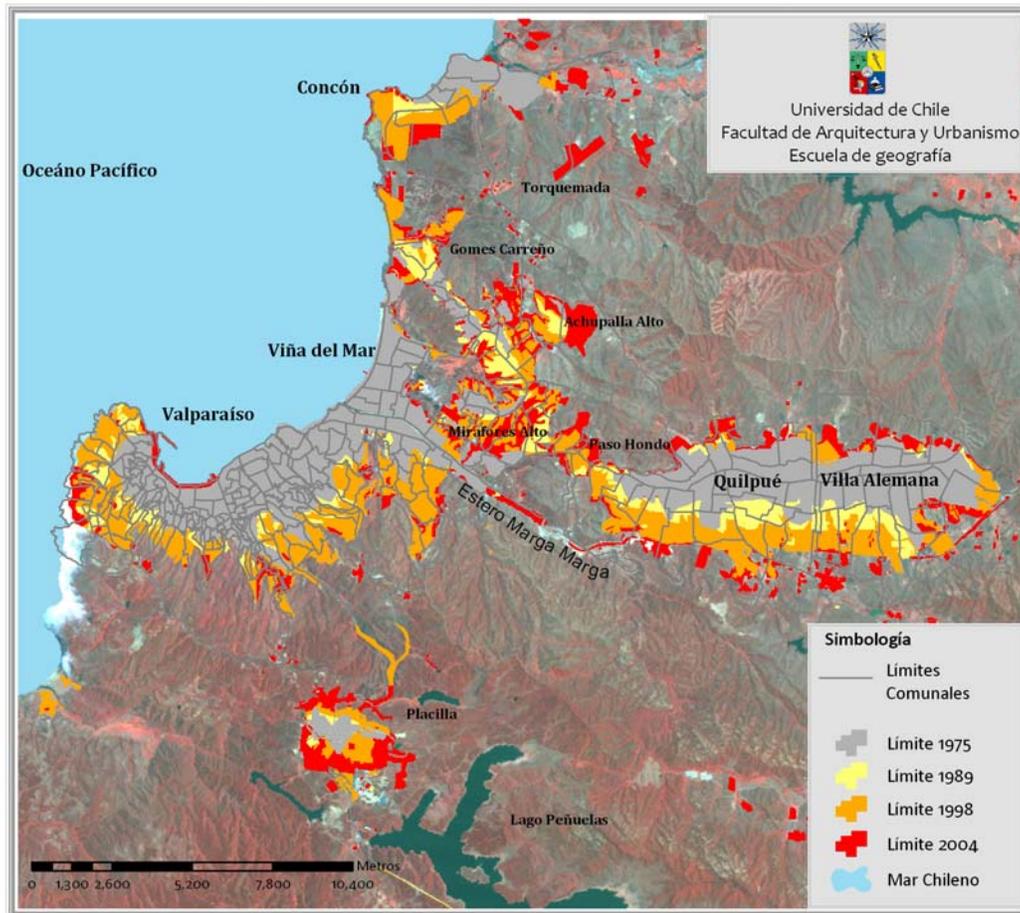


Fuente: elaboración propia, Informe de práctica profesional, 2006.

El aumento de la superficie de las entidades urbanas sobre las laderas y lechos de quebradas se observa claramente en Valparaíso, (MOSCOSO, 2006) (Anexo 4),

constituyendo un proceso antiguo, que si bien no tiene su génesis en 1975, se acentuó los años recientes; Viña del Mar, en un principio exhibe una urbanización de los sectores planos, cercanos al estero Marga Marga y también muestra un leve avance por la superficie de las quebradas cercanas a este sector de planicies; Concón, Villa Alemana y Quilpué, se presentan, básicamente, en sectores llanos, cercanos a ríos como el Aconcagua (Concón) o la extensión del estero Marga Marga hacia el oriente (Villa Alemana y Quilpué).

**Figura 18. Expansión Urbana del Gran Valparaíso 1975-2004**



Fuente: elaboración propia, Informe de práctica profesional, 2006<sup>17</sup>

**Tabla 7. Población del Gran Valparaíso entre 1975 y 2004.**

Comuna	POBLACIÓN			
	1975	1989	1998	2004
Valparaíso	255286	289951	293084	275982
Viña del Mar	188811	305303	335512	286931
Villa Alemana	37614	71165	84055	95623
Quilpué	56579	108289	118857	128578
Concón	8372	13754	18872	32273

Fuente: elaboración propia, Informe de práctica profesional, 2006

En 1975 la superficie urbana era compacta debido a las políticas urbanas imperantes, que proponían la densificación de los espacios al interior del límite urbano. Cabe

<sup>17</sup> Para observar el avance urbano sobre el relieve del Gran Valparaíso ver anexo 4.

destacar que a comienzo de los noventa, en todo Chile se materializa un fenómeno de especulación económica sobre el “bien” suelo (BORSODORF, 2002; ORTIZ, 2002; HIDALGO, 2005), lo que se ve expresado en un importante número de proyectos inmobiliarios (CASTRO & BRIGNARDELLO, 1998) que modificarán la morfología urbana, social, cultural y ambiental del Gran Valparaíso.

Entre 1975 y 1989 la superficie de expansión urbana correspondió a 1548,36 hás, con una tasa de crecimiento anual de 110,6 hás. Considerando que es el intervalo de tiempo más extenso, su aumento es el menos considerable, respecto al de los demás periodos (1989-1998 y 1998-2004). Los límites se siguen extendiendo a través de las quebradas, ocupando terrenos con alto valor ambiental (matorrales densos, bosques de palma chilena, etc.).

Entre 1989 y 1998 se desarrolla un fenómeno de crecimiento espacial relativamente importante. Su extensión es de nueve años y se da una expansión urbana total de 4230,45 hás, la mayor registrada en los tres periodos de estudio, con una tasa de crecimiento anual de 470,05 hás. Esta notable expansión se debe a la especulación existente, ya que a comienzos de los noventa el fenómeno inmobiliario comienza a ser un factor importante de la extensión de los límites urbanos (CASTRO & BRIGNARDELLO, 1998). Debido al agotamiento de las tierras con aptitud urbana y a los altos costos de la urbanización de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar, la expansión urbana, se dirige especialmente hacia las comunas de Quilpue, Villa Alemana y Concón (Figura 18).

Sin embargo, en Valparaíso, la urbanización de los cerros sigue siendo un patrón recurrente. En este periodo es donde mejor se aprecia la amplificación de los límites urbanos hacia los sectores de quebradas y la intensificación de las áreas construidas.

En Viña del Mar, concretamente en el sector comprendido entre Miraflores y Gómez Carreño se aprecia un sector complejo, conglomerado de unidades vegetacionales naturales remanentes y urbanización sobre las quebradas.

Finalmente el período comprendido entre 1998 y 2004, el cual se extiende por una menor extensión de tiempo (seis años), sorprende al evidenciar una expansión urbana considerable (2501, 82 hás), con una tasa anual de 416,97 hás, semejante a la del periodo anterior.

Una particularidad muy importante, es que a pesar de que la población presenta una evidente disminución en las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar (Tabla 7), la superficie de la ciudad igualmente se expande, lo que está relacionado con la existencia y ejecución de proyectos inmobiliarios de baja densidad y con la emigración de población desde estas comunas hacia otras pertenecientes al AMV (CASTRO & BRIGNARDELLO, 1998).

En todos los períodos se observa un notable avance de la urbanización por sobre las quebradas de Valparaíso y Viña del Mar, donde la vegetación natural comienza a desaparecer siendo reemplazada por usos residenciales. Específicamente en Valparaíso el crecimiento se concentra en las partes más altas de sus quebradas y sobre masas de vegetación natural.

En Viña del Mar, el sector de Gómez Carreño y Miraflores presentan también una notable expansión hacia las quebradas, eliminando importante masa vegetal.

### **3.6.2 Deslizamientos, inundaciones y modificaciones de las redes de drenaje natural en Valparaíso y Viña del Mar**

Los deslizamientos de sedimentos son comunes en quebradas y en sectores de pendientes pronunciadas como es el caso de la Avenida Francia en Valparaíso y de Miraflores en Viña del Mar. Este fenómeno se potencia cuándo se urbanizan las laderas y en periodos de tormenta cuando los materiales del suelo se saturan, desestabilizan y pierden cohesión, dando lugar a fenómenos catastróficos para el hombre como los ocurridos en la quebrada de Jaime el 3 de junio del 2002 (RAULD & FERNANDEZ, 2002) donde un deslizamiento de tierras terminó con la vida de dos personas cuya casa se encontraba ubicada en una pendiente de 45°. Estos fenómenos son comunes en quebradas que son pequeñas y por ende muy activas en periodos invernales (ALVAREZ, 2001). Sin ir más lejos, en julio del 2006 se produjeron desbordes del cauce de la quebrada de Jaime, con efectos sobre la red vial y en las edificaciones, donde incluso fueron arrastrados automóviles ubicados en la cercanía de la entubación de este cauce.

En muchos casos, en Valparaíso y Viña del Mar existen abovedamientos subterráneos de los cauces naturales, los cuales son una clara modificación de la geometría de la red de drenaje. El estudio de ALVAREZ (2001) describió una serie de cauces que han sido artificializados a medida que se incorporan a la trama urbana lo que se traduce muchas veces en la rectificación del tramo final respecto de su "situación de origen" (ALVAREZ, op.cit). En el caso puntual de la quebrada de Jaime su entubación se prolonga por 786.90 metros en la zona urbana de Valparaíso, siendo sometida a situaciones innaturales que solo generan incertidumbre acerca de lo que pueda ocurrir ante fenómenos de tormenta y de lluvias intensas.

La comprensión y estudio de las quebradas en Valparaíso y Viña del Mar no es nueva, pero en los últimos años con estudios como los anteriormente nombrados y con iniciativas como "conCIENCIA en la Quebrada"<sup>18</sup> se intenta avanzar en la prevención de situaciones lamentables para el hombre y para el medio ambiente.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

---

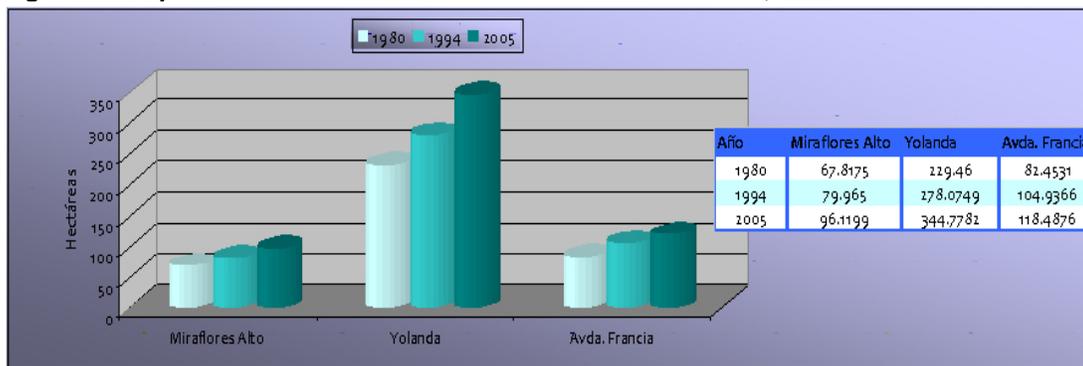
<sup>18</sup> Proyecto CONICYT asignado a la Universidad Arcis, Valparaíso.

#### 4.1 PARTICIPACIÓN HÍDRICA DE LOS USOS DE SUELO SOBRE LA MODIFICACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DE LAS CUENCAS URBANIZADAS DE MIRAFLORES ALTO, SUBIDA DE YOLANDA Y AVENIDA FRANCIA.

##### 4.1.1 Evolución de las superficies urbanas en las tres cuencas

En las tres cuencas estudiadas se observan fenómenos representativos de lo que ocurre en todo el Gran Valparaíso, es decir, un crecimiento de la mancha urbana constante y desordenado, donde las quebradas son intensamente urbanizadas (Anexo 5 y 6). Las superficies urbanas aumentan con el paso del tiempo (Figura 19) y todo indica que lo seguirán haciendo en el futuro.

**Figura 19. Superficie de los Límites urbanos en las tres cuencas, entre 1980-2005.**



Fuente: elaboración propia, 2007.

El crecimiento urbano en las tres cuencas es sostenido a lo largo de los veinticinco años observados, presentando tasas de crecimiento anual de 1,13 hás. en Miraflores Alto, 4,6 hás. Yolanda y de 1,44 hás. en Avda. Francia. Es importante destacar que las cuencas presentan un aumento de la superficie de la mancha urbana promedio de 30% entre 1980 y el 2005. Este crecimiento es desordenado en toda la extensión de las cuencas (Figura 20).

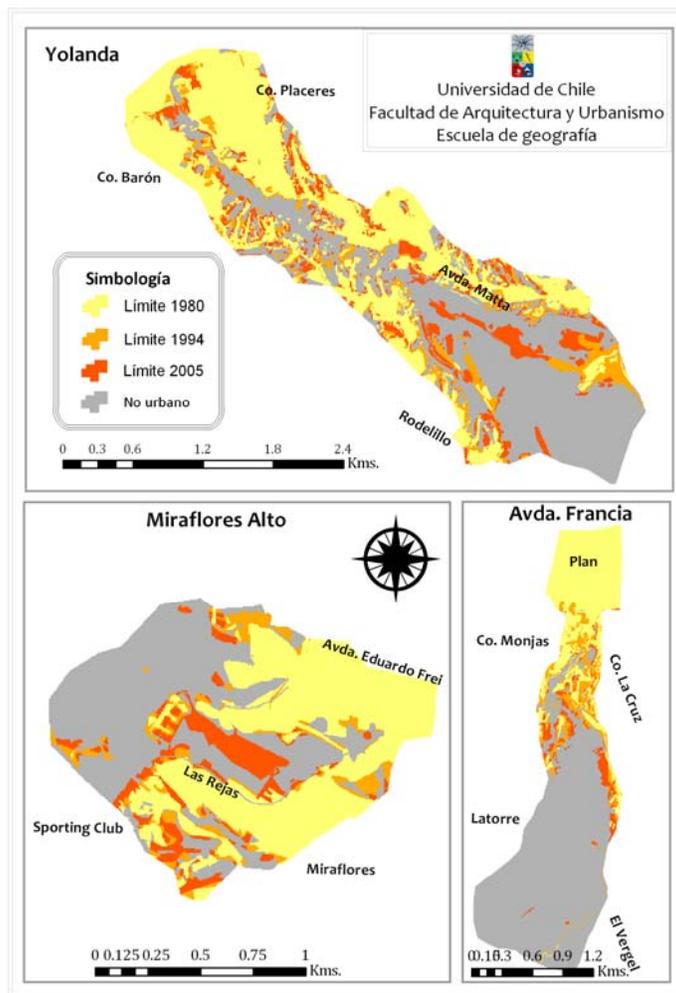
La cuenca de Yolanda presenta una tasa de crecimiento mayor, lo que se ve expresado en la ocupación cada vez más extensiva de sus laderas desde la parte inferior en la quebrada de la Cabritería hasta el paulatino uso de la quebrada de Rodelillo en el sector de la cabecera (Anexo 5).

En Miraflores el crecimiento constante se localiza preferentemente en la cabecera de la cuenca, donde un conjunto de mesetas de altura facilitaron una urbanización realizada desde los años de 1970. (Anexo 5).

Avda. Francia posee una tasa de crecimiento constante que se desarrolla claramente a través de las laderas de la quebrada de Jaime, con usos residenciales (Anexo 7).

Es preciso mencionar que las cuencas son de superficies pequeñas, por lo que crecimientos anuales de sólo algunas hectáreas son significativos considerando su extensión.

Figura 20. Evolución Límites urbanos en las tres cuencas<sup>19</sup>



Fuente: elaboración propia, 2007

#### 4.1.2 Evolución de los usos y coberturas de suelo

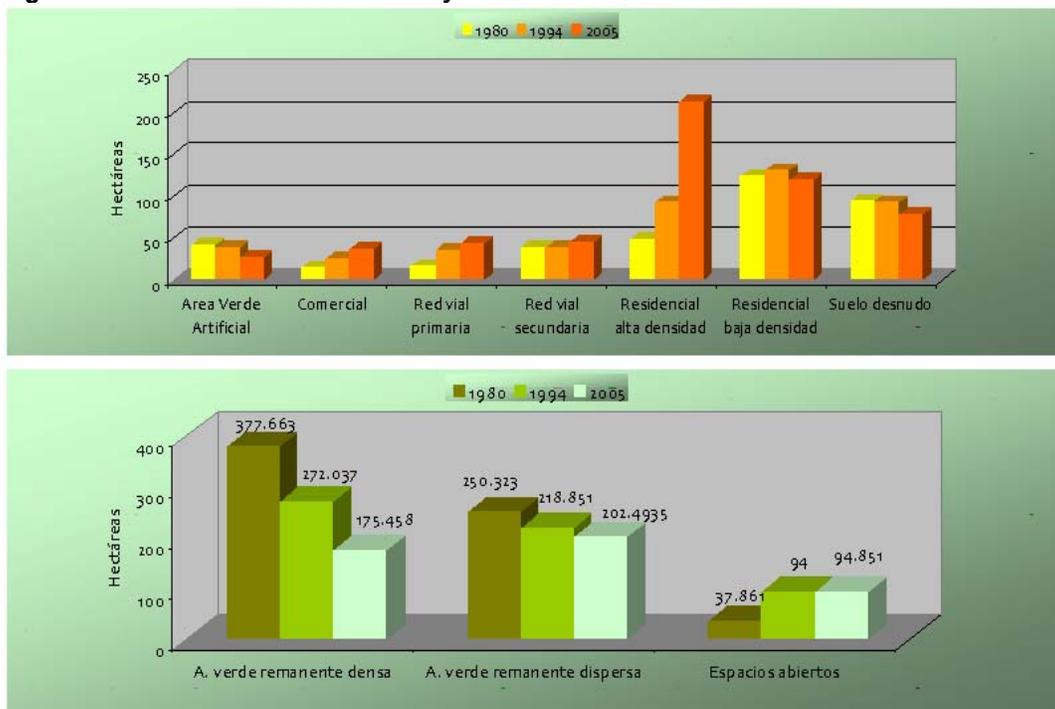
En las tres cuencas estudiadas ocurren fenómenos particularmente marcados y reiterativos entre 1980 y el 2005. Estos fenómenos están ligados al aumento de las superficies urbanas y la disminución de las superficies naturales (figura 21).

La disminución de las superficies ocupadas por uso residencial de baja densidad, registrada entre 1994 y el 2005, se debe a la densificación experimentada por las áreas residenciales, como lo demuestra lo ocurrido en Yolanda. Por otro lado, los espacios abiertos demuestran un aumento notable, que se debe relacionar con el proceso de especulación que genera permanentemente nuevos terrenos para ser urbanizados.

En la figura 21 es posible observar que la variación de las coberturas naturales también se debe, en gran medida, a los cambios entre las mismas coberturas naturales, pero definitivamente esto está relacionado con el aumento de las ATIs en las cuencas, ya que, como se señaló anteriormente, del aumento de las superficies impermeables se obtiene como resultado el deterioro sistemático del sistema natural.

<sup>19</sup> Para una mejor referencia respecto del relieve, ver anexo 5

Figura 21<sup>20</sup>. Evolución usos urbanos y no urbanos 1980-2005



Fuente: elaboración propia, 2007

#### 4.1.2.1 Usos y coberturas de suelo

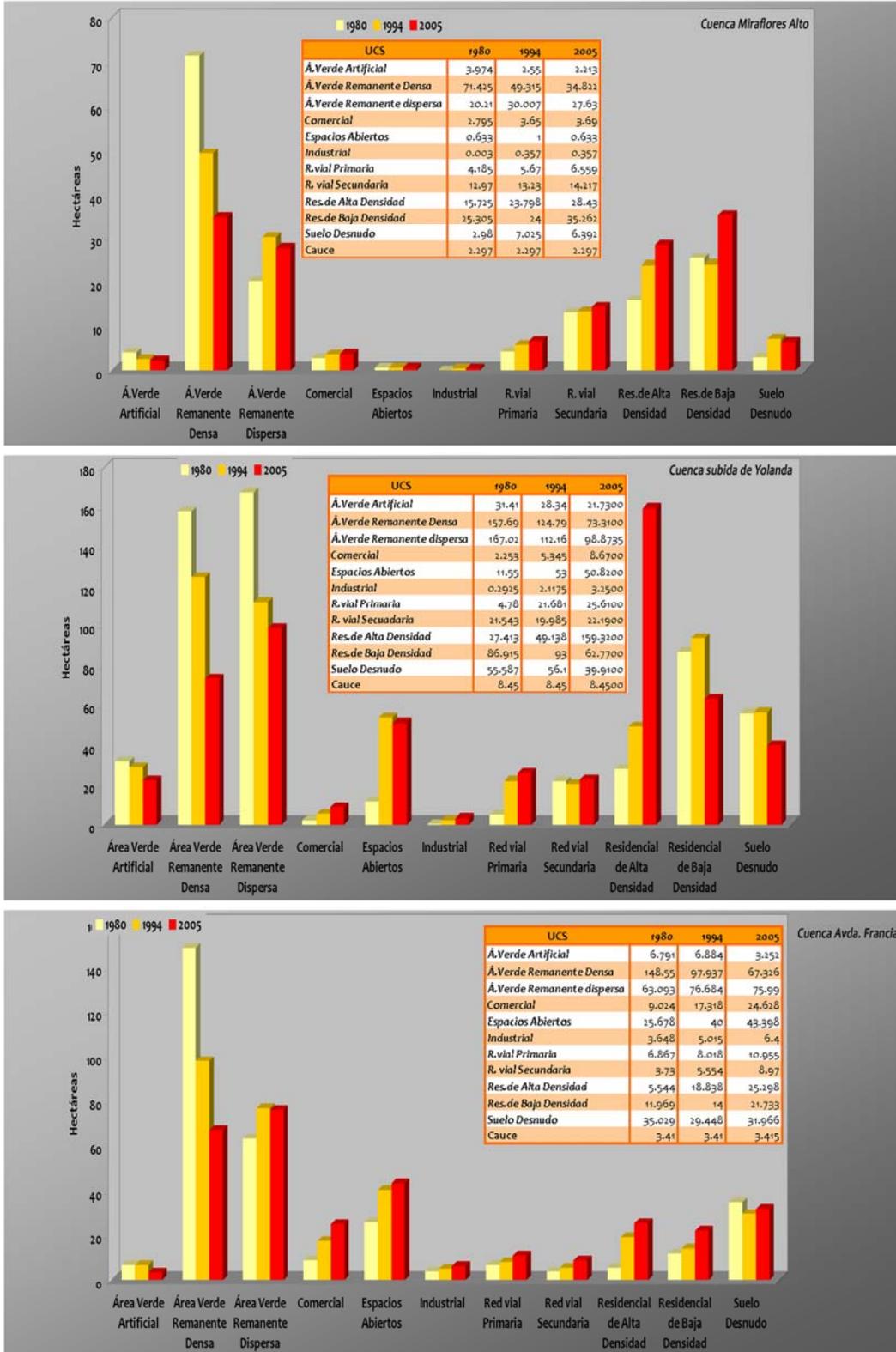
La ocupación y distribución de los usos y coberturas de suelo es diferencial en cada cuenca (Figuras 23, 24 y 25), destacándose dos patrones claros: Por una parte, la cuenca de Miraflores Alto, presentaba el año 1980 una cabecera importantemente urbanizada; en la cuenca de subida de Yolanda y de Avda. Francia, en cambio, el proceso de urbanización inicial se encuentra en los sectores del exutorio y sección media.

Existe un patrón singular en las tres cuencas, respecto a la evolución de las áreas de vegetación natural. Si bien es cierto, en las cuencas de Avda. Francia y de Miraflores Alto, existe una tendencia al aumento de cobertura de vegetación dispersa, entre los años 1980 y 1994, se debe a que existe un importante proceso de degradación de superficies naturales de mayor biomasa. Ello hace que las áreas vegetadas cambien de clasificación, y terminen transformándose tanto en áreas verdes remanentes dispersas o espacios abiertos de escasa o nula vegetación.

En la cuenca de subida de Yolanda, se presenta una importante y constante pérdida de superficie de coberturas naturales, tanto de vegetación densa como dispersa y un notable aumento, en cambio de las superficies de espacios abiertos. En el caso específico de las superficies de áreas verdes remanentes densas, éstas sufren una baja de un 46% entre 1980 y el 2005. Importante es, de igual forma, el descenso de las superficies de vegetación dispersa, donde en el 2005 existe sólo un 59% de lo que existía en el año 1980.

<sup>20</sup> La figura incluye las superficies de usos y coberturas de las tres cuencas estudiadas.

Figura 22. Usos y coberturas de suelo, 1980-2005



Fuente: elaboración propia, 2007

La baja en las superficies ocupadas por áreas verdes remanentes densas, es importante en las tres cuencas, alcanzando en Avda. Francia a un 55%, en la cuenca de Miraflores Alto a un 52% y como ya se mencionó, en subida de Yolanda, la disminución llega a un 54%.

La extensión de coberturas de espacios abiertos, presenta una gran dinámica, debido a que reemplazan zonas naturales más densas y también son reemplazadas por usos residenciales. Es así como en subida de Yolanda los espacios abiertos presentan un gran aumento desde 1980 a 1994, pasando de 11 a 53 há. Esta superficie disminuye para el año 2005, alcanzando las 50 há. Principalmente esta cobertura se encuentra en la cabecera de la cuenca, donde se ve claramente impactada por usos urbanos que van insertándose al interior (Anexo 8)

En el caso de Avda. Francia, los espacios abiertos también experimentan un gran aumento, pasando de 25 a 40 há, entre 1980 al 2005, lo que se observa en el sector de la cabecera, especialmente en El Vergel.

Por otra parte, la extensión que comprende los usos urbanos presenta un franco y sostenido aumento en todas las cuencas. El uso residencial de baja densidad se manifiesta más diverso, y sólo en la cuenca de Avda. Francia, presenta un aumento constante; en la cuenca de Yolanda existe una caída del 33% en su superficie en el año 2005 y en Miraflores Alto la reducción que alcanzó al 4% se registró en 1994.

La superficie que comprende el uso residencial de alta densidad, presenta un aumento constante en todas las cuencas, siendo mayor en la subida de Yolanda, donde acerca al 500% (132 há. aprox.) el año 2005. En Avda. Francia el aumento es superior al 300%, pero sólo corresponde a 20 há. de crecimiento efectivo entre 1980 y el 2005; por otro lado en Miraflores Alto el aumento es del 180% lo que implica alrededor de 13 há. desde 1980 hasta el año 2005.

Es importante constatar, que en todas las cuencas, se produce un importante proceso de avance urbano, sobre todo de usos residenciales, por sobre las laderas de las quebradas, acercándose en gran medida a los talwegs de cada cuenca (Anexo 8).

Tanto en la cuenca de Miraflores Alto como en la de Yolanda, se presenta una importante extensión de usos residenciales de baja y alta densidad (Anexo 9) en forma de blocks de departamentos. En Miraflores Alto, destaca, para el año 2005, la presencia de un condominio residencial de baja densidad (aunque con una impermeabilidad cercana al 100%, debido a que presenta estacionamientos y pequeñas vías de transporte interna) que se ubica en la sección media de la cuenca entre los drenes principales. Esto incide de manera negativa en el desarrollo natural de los procesos hídricos de este sistema

En cuanto a la superficie de uso comercial, la cual consta de comercio propiamente tal y de infraestructura de colegios y otros tipos de bienes y servicios, presenta un aumento constante en todas las cuencas, aunque su superficie total no representa más del 2% en las cuencas de Miraflores Alto y de Yolanda. Donde si es significativa la presencia, en términos espaciales, es en la cuenca de Avda. Francia (Anexo 10), donde llega a representar en el año 2005 el 8% de la cuenca.

El uso industrial, encontrado, se remite básicamente a pequeñas zonas de acopio en subida de Yolanda y Miraflores. En Avda. Francia, la infraestructura industrial corresponde a sectores de acopio y funcionamiento del puerto. En Miraflores Alto, casi no existen variaciones entre 1980 y el 2005 y en Avda. Yolanda, se observa un aumento considerable en el sector de la cabecera de la cuenca, cercano al sector de

Rodelillo, donde se instalaron copas de agua. Este uso no llega a significar más que el 2% de la superficie en cada cuenca.

Es considerable el aumento de las redes viales, ya que, tanto la red vial primaria y secundaria se desarrollan entre 1980 y el 2005, principalmente junto con la consolidación de las zonas residenciales de alta y baja densidad (Figuras 23, 24 y 25). En Miraflores la red vial primaria para el año 1980 contaba con 4 hás. aproximadamente, llegando a las 6.5 hás en el 2005; en Avda. Francia pasa de 4 a 10 hás. entre 1980 y el 2005; en Yolanda, de 4 a 25 hás. El crecimiento de la red primaria se observa principalmente hacia la cabecera de la cuenca, exceptuando a Avda. Francia, donde la red vial primaria se remite sólo al sector del plan.

La relevancia que tiene el aumento de la red vial primaria es trascendental, si se considera que este tipo de uso posee un alto grado de impermeabilización (99.2%) y que como se observa en la figura 23, se extiende por todo el sector de la cabecera de la cuenca, como ocurre en la quebrada den Yolanda. Las principales vías, en esta cuenca, son las de Avda. Matta y Rodelillo.

En cuanto a la red vial secundaria, se extiende principalmente por las zonas urbanas de alta y baja densidad. Presenta un aumento claro, a excepción de Yolanda, donde en el año 1994, se registró una baja respecto de 1980 que correspondió al 8%, debido principalmente, a que como se explicará con posterioridad, la red vial secundaria se transforma en red vial primaria.

Respecto de las áreas verdes artificiales, se aprecia una disminución constante en las tres cuencas. En subida de Yolanda, por ejemplo, la disminución corresponde al 30%, entre 1980 y el 2005; en Miraflores Alto, la pérdida corresponde al 44% y en Avda. Francia al 48%.

Como se mencionó anteriormente, los usos urbanos van ganando importancia aceleradamente en todas las cuencas, a medida en que pasan los años, y van ocupando sectores cada vez más sensibles de las cuencas, como lo son las quebradas, e incluso en el lecho fluvial, que debería ser reservado a los cauces (Anexo 8 y 11) como es el caso Yolanda.

Figura 23. Usos y Coberturas de suelo, Cuenca de Miraflores Alto 1980-2005

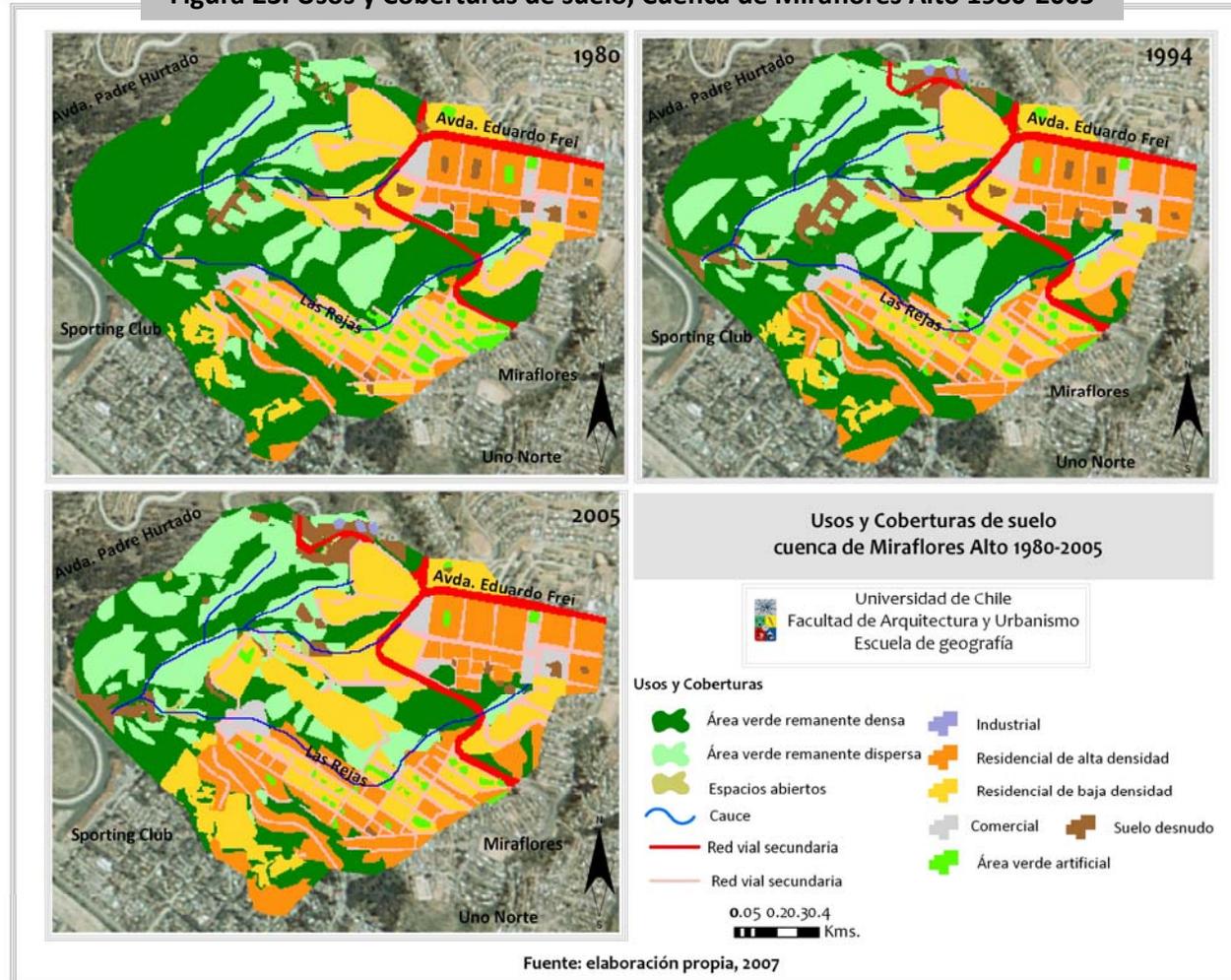


Figura 24. Usos y Coberturas de suelo, Cuenca de subida Yolanda 1980-2005

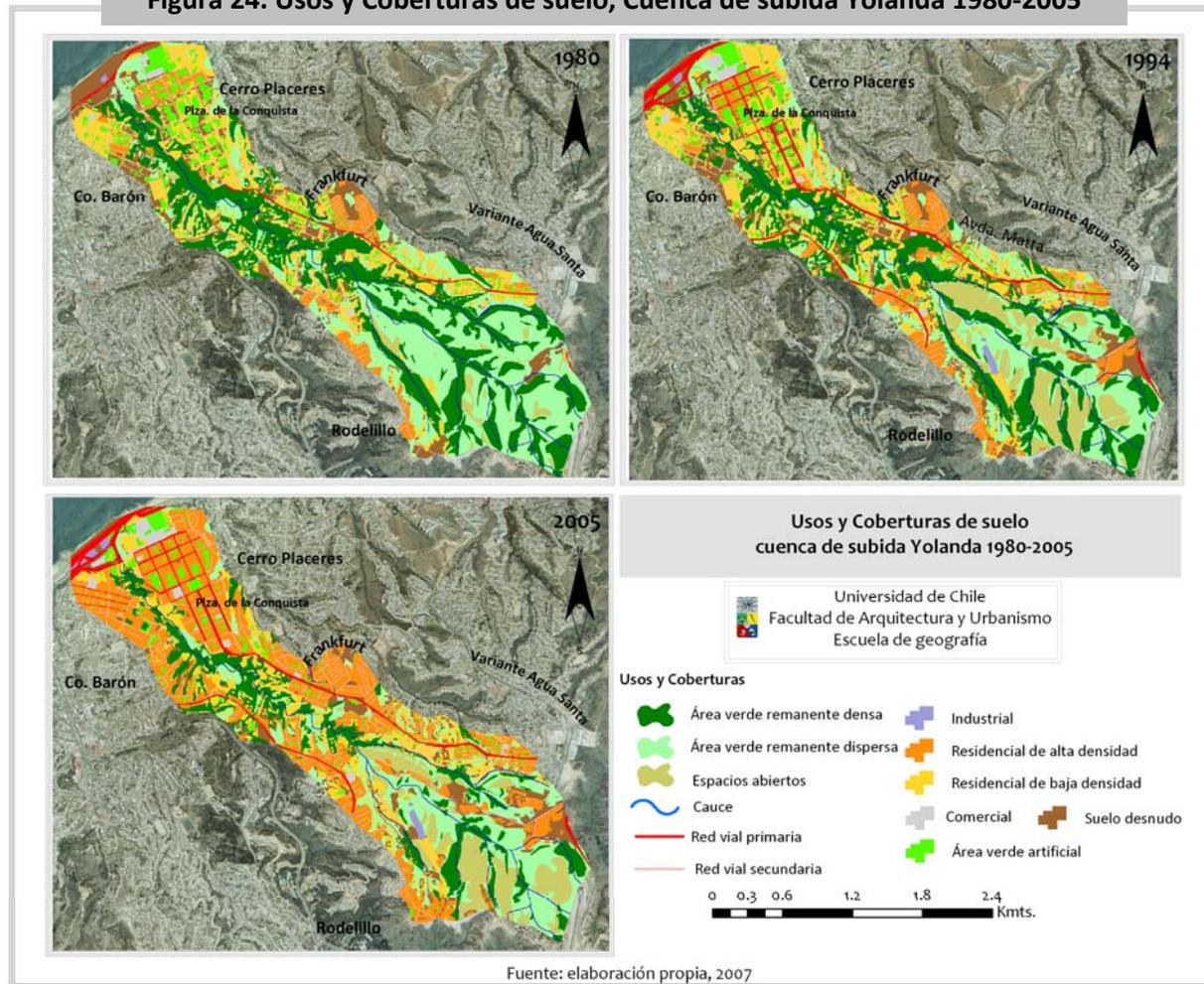
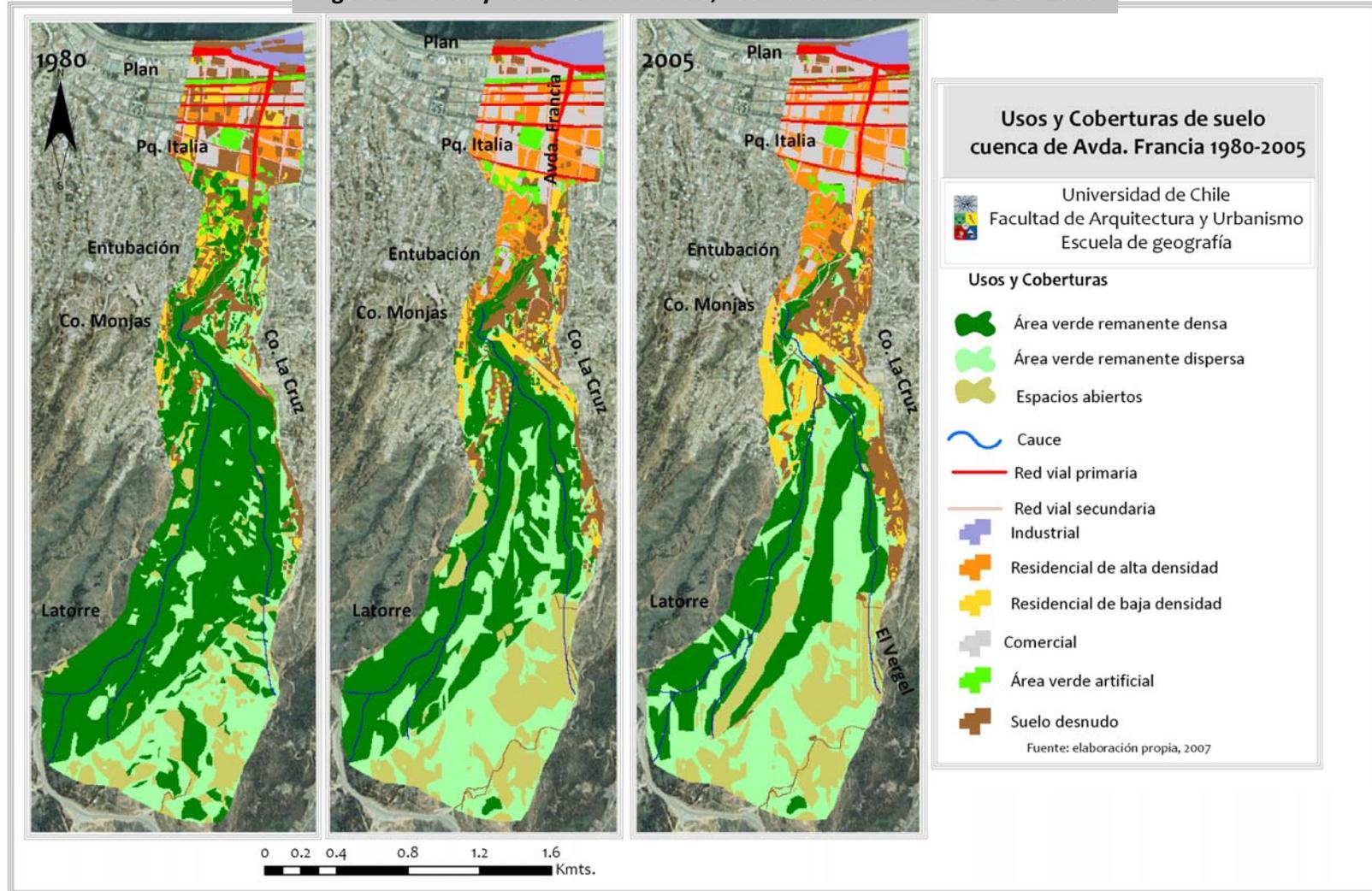


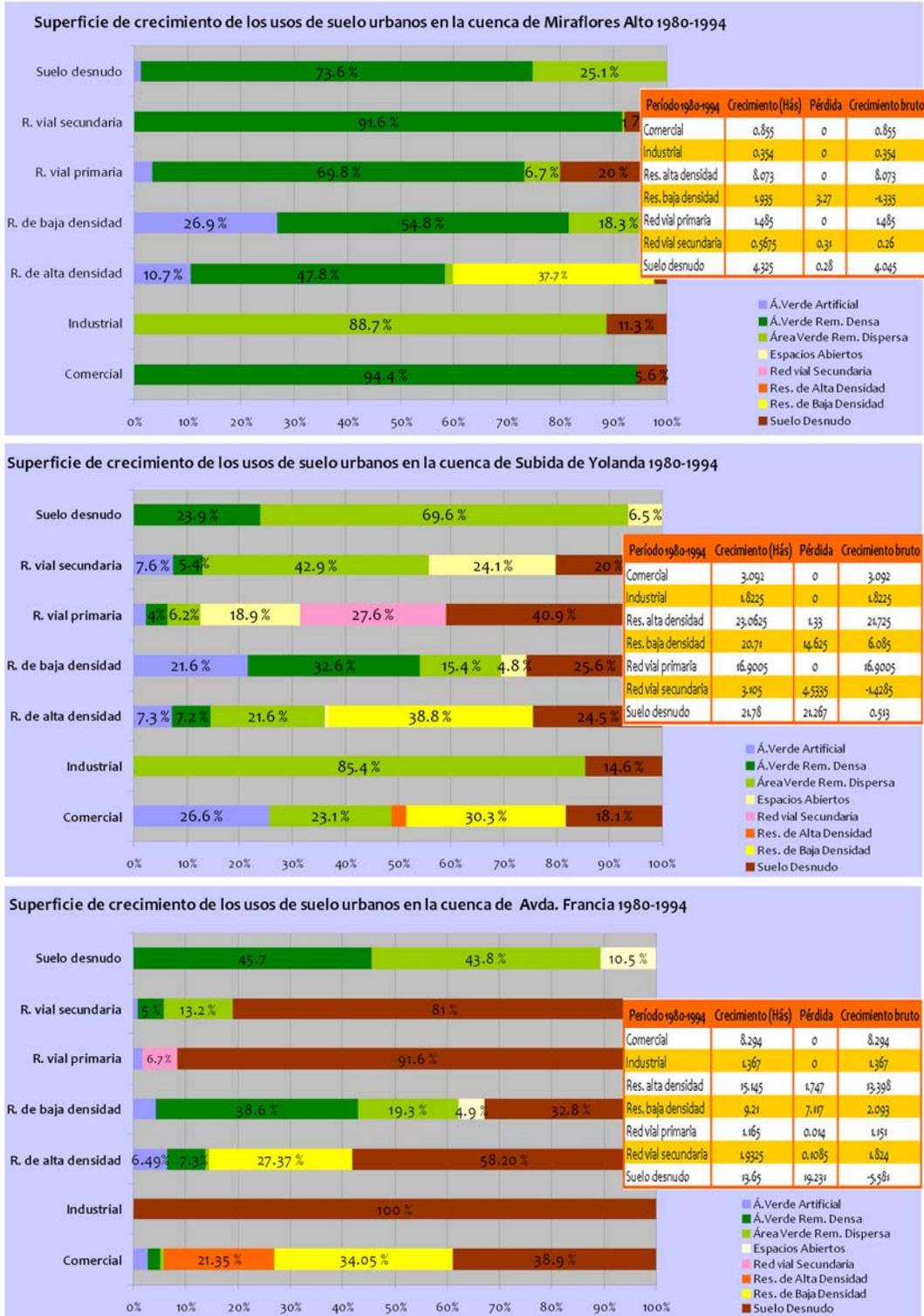
Figura 25. Usos y Coberturas de suelo, cuenca de Avda. Francia 1980-2005



#### 4.1.2.2 Cambios de usos y coberturas de suelo

##### 4.1.2.2.1 Cambios de usos y coberturas entre 1980 y 1994

Figura 26. Superficie de crecimiento de los usos de suelo urbanos 1980-1994



Fuente: elaboración propia, 2005

Las superficies de usos y coberturas de suelo, en las tres cuencas, sufren cambios y reemplazos. En este contexto, existe una superficie de crecimiento, la cual se descompone en diferentes usos y coberturas (Figuras 26 y 27).

Principalmente la tendencia es que los usos urbanos, especialmente los residenciales, reemplacen coberturas naturales o de suelo desnudo. Por ejemplo, entre 1980 y 1994, en Miraflores Alto, la superficie de crecimiento de la red vial secundaria se compone en un 91,6% de área verde remanente densa (de un total de 0,6 hás). Sin embargo presenta 0,31 hás. que han sido transformadas esencialmente, en red vial primaria; en el caso de Yolanda, la superficie de crecimiento de la red vial primaria corresponde a 16 hás. aproximadamente, donde se observa una clara transformación de la red vial secundaria, ya que, un 27.6% corresponde a este uso. El 40.9% corresponde a suelo desnudo y un 18.9% a espacios abiertos, lo que no es menor, si se considera que la red vial primaria es el uso de suelo que presenta mayores condiciones de impermeabilidad; en el caso de Avda. Francia, el avance de las redes viales tanto primaria como secundaria se presenta esencialmente sobre suelos desnudos. Es importante destacar, que la superficie de crecimiento en ambos casos no supera las 2 hás.

Es importante destacar que las redes viales, en las tres cuencas están emplazadas por sobre cauces naturales. Tal es el caso de la quebrada de Jaime, que posee un importante tramo de entubación (Figura 26). En Miraflores Alto, el dren que se encuentra en el sur, inserto en la trama urbana (Figura 23) y en Yolanda la quebrada de la Cabritería se encuentran totalmente artificializados en el sector del exutorio, entre el cerro Barón y el cerro Placeres (Figura 24).

En cuanto a las zonas residenciales de alta densidad, ostentan una superficie de crecimiento de 8,073 hás. las que están formadas por un 10.7% tomada de áreas verdes artificiales, un 37.7% de zonas residenciales de baja densidad y un 47.8% de áreas verdes remanentes densas. Esta tendencia a ocupar las quebradas mediante la intensificación del uso de suelo de áreas anteriormente cubiertas por residencias de baja densidad ocurre principalmente en las quebradas donde hay un menor grado de ordenamiento territorial, como es el caso de la quebrada de Yolanda y Avda. Francia (Figuras 24 y 25, Anexo 8).

En el periodo entre 1980 y 1994, en Miraflores Alto, la superficie residencial de baja densidad experimenta una reducción respecto del total, pero presenta una superficie de crecimiento, que corresponde a la urbanización de sectores más bajos de la cuenca, cercanos a la calle Uno Norte (Figura 23). En el resto de las cuencas, existe un crecimiento bruto positivo, destacando en Yolanda, el hecho que las principales coberturas reemplazadas sean las de área verde remanente densa y dispersa que significan un 32.6% y un 15.4%, respectivamente, de las 20. hás de crecimiento. El resto se descompone en suelo desnudo, áreas verdes artificiales y espacios abiertos. Las coberturas reemplazadas, no hacen más que constatar que el uso residencial de baja densidad, posee un notable avance por las laderas de la quebrada (Anexo 8).

Los usos industrial y comercial, de una representación territorial minoritaria, en la cuenca de Miraflores Alto, han sido emplazados sobre coberturas, principalmente naturales (vegetación densa y dispersa) y sobre suelos desnudos o sectores eriazos; en Yolanda, al edificarse copas de agua, se produjo un avance de un 85.4% sobre superficies de áreas verdes remanentes dispersas, es decir 1,5 hás de uso industrial eliminaron parte de esta cobertura natural; en Avenida Francia, se produce un avance de la zona Industrial sobre únicamente suelos desnudos.

En cuanto al uso comercial, avanza por superficies más variadas en Yolanda y Avda. Francia. De las 3 hás. de crecimiento, en Yolanda un 30.3% corresponde a zonas residenciales de baja densidad, y consiste esencialmente, en el establecimiento de colegios sobre viviendas precarias tipo campamento. Por otro lado, existe un avance importante sobre áreas verdes artificiales y áreas verdes remanentes dispersas, específicamente en el sector de la Universidad Federico Santa María, es decir, entre el cerro Barón y el cerro Placeres. Especial es el caso de Avda. Francia, ya que en el sector del Plan, se presenta un importante avance del uso comercial por sobre otros usos urbanos, como residencial de alta densidad (21.3%), residencial de baja densidad (34%) y suelo desnudo (38.9%). Esto se explica, básicamente, porque es un sector donde se ha producido un aumento del comercio, por lo que edificios completos residenciales han pasado a ser galpones de ventas o galerías comerciales.

Los suelos desnudos, en las tres cuencas, avanzan por sobre superficies naturales, es decir, existe un fuerte deterioro de la base de recursos naturales que involucra la pérdida de superficies ocupadas anteriormente por coberturas de áreas verdes remanentes densas y dispersas y de espacios abiertos de escasa o nula vegetación.

#### **4.1.2.2 Cambios de usos y coberturas entre 1994 y 2005**

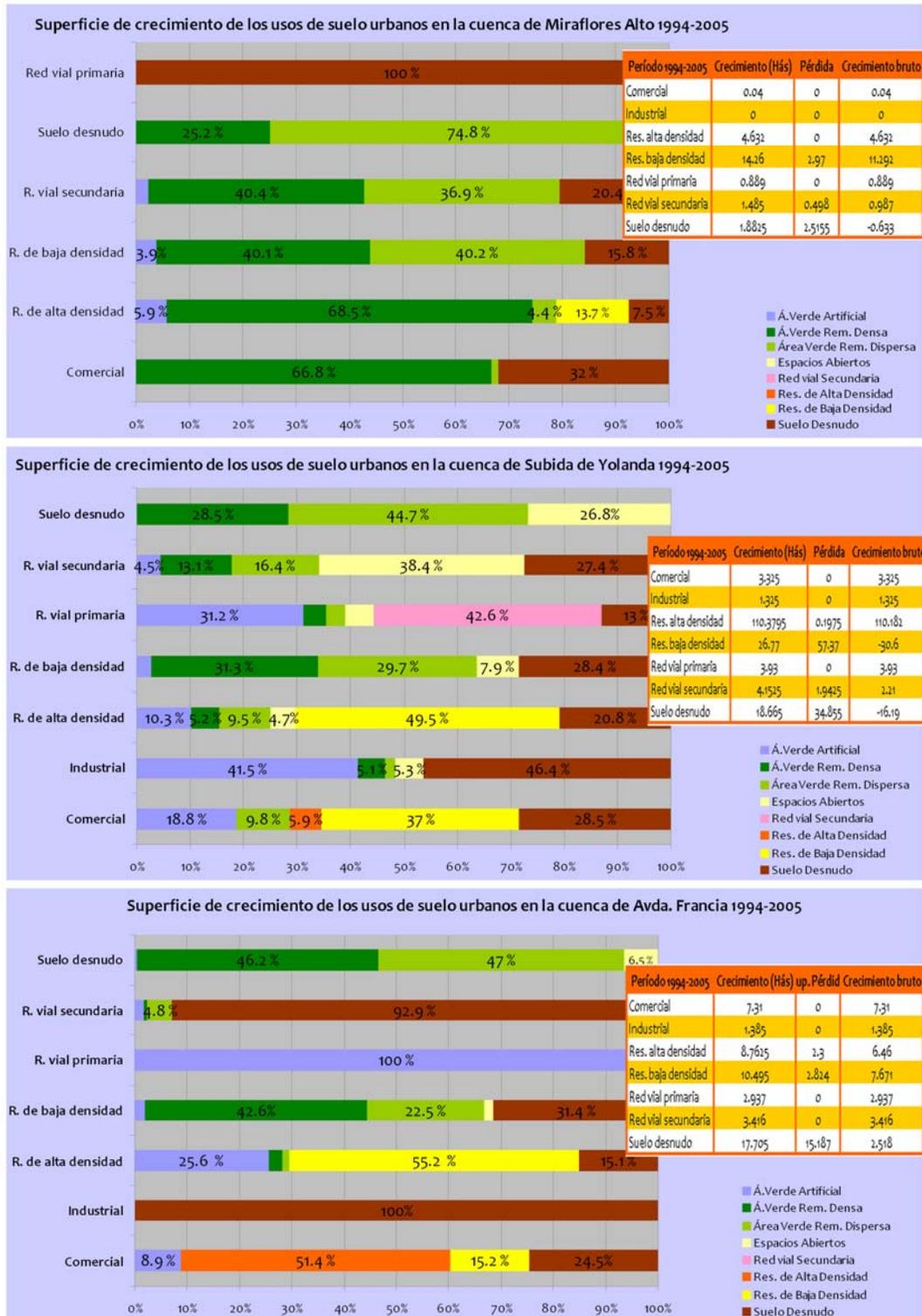
En Miraflores la red vial primaria posee un avance completo por sobre el suelo desnudo y en Avda. Francia el 100% del crecimiento corresponde a áreas verdes artificiales, sin embargo, en Yolanda la situación cambia tornándose más compleja. En la subida de Yolanda, la red vial primaria corresponde primordialmente a antiguas calles, es decir a la red vial secundaria (42.6%) y un 31.2% eran antiguas áreas verdes artificiales.

Las zonas residenciales de baja densidad presentan un importante avance por sobre coberturas naturales, es así como en Miraflores Alto, un 80.3% de las 14 hás. de expansión corresponden a coberturas naturales densas y dispersas, en Yolanda un 61% y en Avda. Francia un 65%. Esto nuevamente explica una notable expansión residencial por sobre las quebradas de las cuencas (anexo 8 y 11).

El uso residencial de alta densidad, en Miraflores, se expande substancialmente por coberturas naturales, destacando que el 68.5% corresponde a áreas verdes remanentes densas. Un resto no menor (13.7%) corresponde a la densificación de usos residenciales de baja densidad; por otro lado en las cuencas de subida de Yolanda y Avda. Francia, la superficie de crecimiento del uso residencial de alta densidad se emplaza significativamente por sobre superficies residenciales de baja densidad, es decir, aparte de una ocupación intensiva de los sectores naturales y quebradas de la cuenca, se aprecia una densificación de los usos residenciales (Figuras 24 y 25). Es importante, también, que los otros usos reemplazados son el de suelo desnudo y áreas verdes artificiales y tampoco es menor la eliminación sistemática de sectores naturales los que alcanzan en Yolanda al 20% y en Avda. Francia al 5%.

Los suelos desnudos aumentan su superficie, lo que refleja el deterioro sufrido por las cuencas, ya que su avance se da íntegramente sobre coberturas vegetadas naturales de suelo, especialmente áreas verdes remanentes dispersas. Si bien es cierto, en algunos periodos presenta un crecimiento bruto negativo, que elimina superficies de suelos desnudos en ciertos sectores, esencialmente residenciales, se crean en otros lugares, como los ya mencionados.

**Figura 27. Superficie de crecimiento de los usos de suelos urbanos 1994-2005**



Fuente: elaboración propia, 2007

El uso comercial, en la cuenca de Miraflores Alto, presenta una superficie de crecimiento que se concentra en las áreas de vegetación remanente densa (66.8%) y de suelo desnudo (32%), aunque hay que indicar que el crecimiento bruto no alcanza una hectárea. En cambio en subida de Yolanda y Avda. Francia, esta superficie de

crecimiento es más compleja a y representa una mayor parte de cada cuenca: en Yolanda, de las 3,325 há. de crecimiento un 18.8% corresponde a áreas verdes artificiales, un 9.8% a áreas verdes remanentes dispersas y un 28.5% de suelos desnudos. Es importante mencionar el caso de las zonas residenciales de alta y baja densidad que son transformadas en zonas comerciales, ya que un 5.9% del aumento de superficie comercial corresponde a alta densidad urbana y un 37% a baja densidad urbana. En el caso de Avda. Francia, el fenómeno es similar, aunque con algunos matices interesantes de comentar: si bien es cierto existe un avance de un 24.5% sobre suelos desnudos y de un 8.9% sobre áreas verdes artificiales, se da una evolución significativa de zonas residenciales a sectores comerciales donde más del 50% del avance comercial es representado por alta densidad urbana y un 15% por baja densidad urbana, lo que se debe, como ya se explicó, a que el sector del plan, comienza a tomar funciones administrativas y de entrega de bienes y servicios (Figura 27).

En cuanto al sector industrial, en Miraflores no hay ningún cambio, es decir, la superficie industrial se mantiene constante sin sufrir pérdidas ni ganancias territoriales. En Avda. Francia, el 100% del crecimiento de este uso, es decir, 1,39 há. corresponden a suelo desnudo. Diferente es la situación en la cuenca de subida de Yolanda, ya que de las 1,32 há. ocupadas por los usos industriales, un 41.5% corresponde a áreas verdes artificiales, un 46.45% a suelo desnudo y alrededor de un 13% a coberturas naturales. Esto es una evidencia que el avance industrial se restringe básicamente al sector cercano a la desembocadura de las cuencas, presentándose menormente en las quebradas (Figura 23, 24 y 25, anexo 8).

La red vial secundaria, avanza por sobre coberturas naturales y usos como el suelo desnudo y las áreas verdes artificiales. En Miraflores la superficie de crecimiento corresponde casi en un 80% a áreas verdes remanentes, en tanto en Yolanda un 29% corresponde a estas áreas verdes y un porcentaje importante significan las áreas abiertas (38.4%) y sectores eriazos (27.4%). Finalmente en Avda. Francia esta red vial, se emplaza mayoritariamente sobre suelo desnudo (92.9%) y un resto menor sobre áreas verdes remanentes dispersas (4.8%) (Figura 27).

Un punto común entre 1980 y 1994, es que a la degradación de sectores naturales como áreas verdes remanentes o espacios abiertos, de sectores urbanos y áreas verdes artificiales, se une una secuencia donde se pasa de suelos desnudos, a urbanizaciones con áreas residenciales, industriales o comerciales.

#### **4.1.3 Evolución de las Áreas Totales Impermeables (ATIs).**

Las ATIs en todas las cuencas sufren un aumento entre 1980 y el 2005 debido esencialmente al aumento de la urbanización (Figura 28). En la figura 29, se puede apreciar que el aumento de las superficies impermeables en las tres cuencas es evidente, duplicándose prácticamente, exceptuando en Miraflores Alto, donde las ATIs en 1980 ya eran significativas.

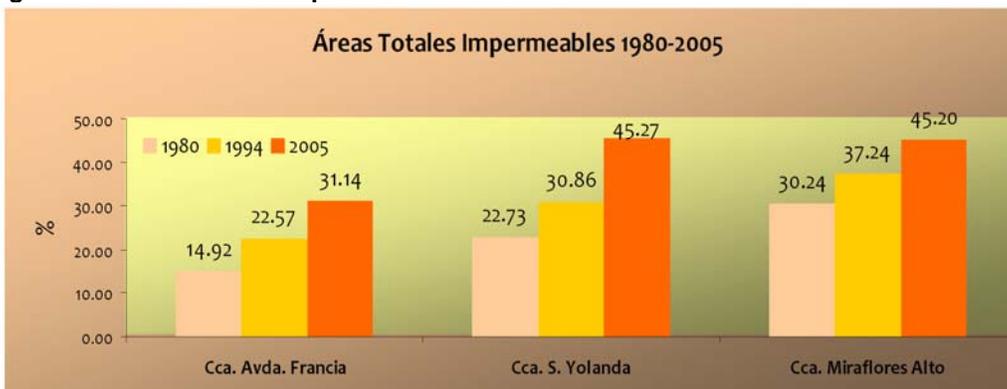
Es evidente, según la figura 28 y 29, que el aumento de las áreas totales impermeables ha sido progresivo y constante, existiendo un fuerte crecimiento de superficies con altas tasas de impermeabilización, como lo son las zonas comerciales (81.1%), las zonas residenciales de alta densidad (89.2%), red vial primaria (99.2%), entre otras, las que reemplazan a superficies de mayor permeabilidad como lo son las coberturas naturales.

**Figura 28. Tasas de Impermeabilización según usos y coberturas de suelo**



Fuente: elaboración propia, 2007

**Figura 29. Áreas Totales Impermeables 1980-1994**



Fuente: elaboración propia, 2007

A partir de la figura 29, también se puede conocer la variación de los estados de salud ambiental de las cuencas. Avda. Francia que en 1980 se encontraba en el estado *Impactado*, en 1994 se mantenía en el mismo rango, pero con un aumento substancial de las ATIs, y en el 2005 logra el estado de *Degradado*.

Por otro lado, la cuenca de subida Yolanda, en primera instancia exhibía un estado de *Impactado*, luego en 1994 poseía un estado de *Degradado* y el año 2005 llegó al peor estado de salud ambiental, es decir, *Inhóspito*.

En Miraflores Alto, en cambio, la cuenca para el año 1980 poseía un estado *Degradado*, manteniéndose en el mismo en 1994 y pasando a *Inhóspito* en el 2005. El proceso de deterioro ambiental de las cuencas, repercute en todos los componente insertos en ellas, tanto en el plano natural como antrópico

#### 4.1.3.1 Distribución espacial de las ATIs

En el caso de Miraflores Alto, los sectores correspondientes a la clasificación de inhóspito, es decir, entre 45.1 y 99.2% de impermeabilización se presentan en los sectores de la cabecera de la cuenca en 1980.

Es importante identificar que en toda la extensión de la cuenca se encuentran sectores con alto porcentaje de impermeabilidad mezclados con áreas con bajas tasas de impermeabilidad (naturales), que se deben a la presencia importante y reguladora de coberturas de bosque en el área de estudio. Sin embargo, el avance de las superficies impermeables es evidente, ya que como se observa en la figura 30, los sectores de mayor impermeabilización ocupan un 45% de la cuenca en el año 2005. Si bien es cierto que la impermeabilización para el último año del análisis corresponde a un 59%, parte de esta superficie cuenta con usos de permeabilidades altas, como áreas verdes artificiales o suelos desnudos, lo que amortigua de cierta forma el aumento de las zonas impermeables y los efectos que traen consigo.

El avance de las ATIs se presenta generalmente a partir de sus límites anteriores, registrando muy pocas variaciones en forma de fragmentos al interior de la cuenca. Los más notorios se producen en el año 1980 y 1994, cuando sectores naturales ubicados al centro de la cuenca pasan a degradados y luego a inhóspitos.

Finalmente se puede apreciar como la mancha de los sectores con calidad ambiental de Inhóspito se va homogeneizando a través de los años, formando cada vez una estructura más compacta. Al respecto, hay que darle un énfasis especial a las superficies boscosas, cada vez más intervenidas e impermeabilizadas, a lo largo del periodo de estudio.

El caso de la cuenca de la subida de Yolanda es distinto. La presencia de las áreas ambientales de peor calidad en el año 1980 se remitía básicamente a los sectores urbanos propiamente tales, vale decir, a las redes viales primarias, secundarias y a los sectores residenciales que se encontraban anexos, quedando la cabecera de la cuenca relativamente despejada. Es por esta razón que la mayor parte de ésta se clasifica como natural, identificándose de todas formas algunos sectores en la calidad de impactados (Figura 31).

El avance de la mancha de superficies impermeables con calidad de inhóspitas se mantiene sostenido y al igual que en la cuenca de Miraflores Alto, tiende a hacerse compacta y homogénea. El estado de transición corresponde al año 1994, donde la cabecera de la cuenca se encuentre fragmentada entre sectores naturales, impactados y degradados, incluso presentando sectores inhóspitos. En 1994, específicamente en el sector del exutorio, se denota el comienzo de la compactación de las zonas inhóspitas estrechándose por el cauce, para ya en el año 2005 dejar una mínima superficie de sectores naturales.

La sección media de la cuenca, se presenta en todos los años como una mixtura entre sectores naturales, impactados, degradados e inhóspitos (Anexo 11), pero con una clara tendencia al avance de los sectores de menor calidad ambiental (Figura 31).

Es evidente que los sectores catalogados como impactados, en la cabecera de la cuenca, son sectores que pierden biomasa, producto de los efectos acumulativos de la urbanización sobre la cuenca. Lo anterior se observa esencialmente entre 1994 y el 2005, donde se fragmenta la cabecera de la cuenca evidenciando el paso de sectores naturales homogéneos a sectores semi naturales heterogéneos.

En la cuenca de Avda. Francia, se observa un proceso similar al de la subida de Yolanda, ya que, se presenta una cabecera libre de sectores inhóspitos para el año 1980, lo que se extiende hasta el año 2005, debido a la importante superficie de espacios completamente naturales que se encuentran en esta cuenca, ubicados precisamente en los sectores más altos (Figura 32).

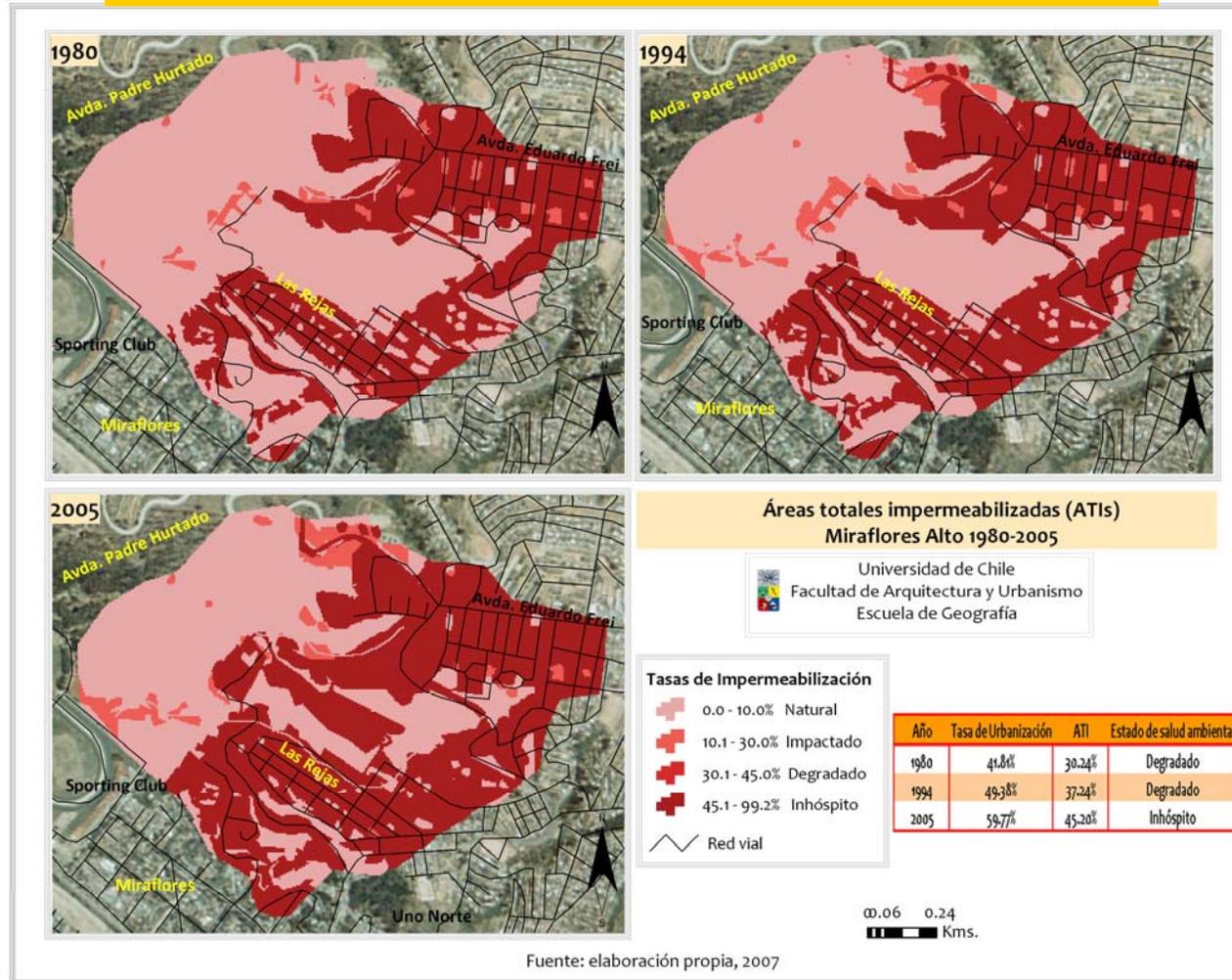
Los sectores de peor calidad ambiental se presentan, ciertamente, en el plan o sector plano de la cuenca, ya que aquí se ubica la mayor superficie construida, incluida la entubación de la quebrada de Jaime. Estos sectores influyen negativamente en el exutorio (Anexo 12), debido a que se observa claramente como va pasando de superficies naturales a degradadas e inhóspitas, y al igual que en las anteriores cuencas, de un estado heterogéneo a una superficie compacta de ATIs en el peor estado ambiental.

El retroceso en cuanto a la calidad ambiental se observa a lo largo de los años, sobre todo en las quebradas, siendo peor entre 1994 y 2005, donde las coberturas naturales de la sección media se van estrechando cada vez más.

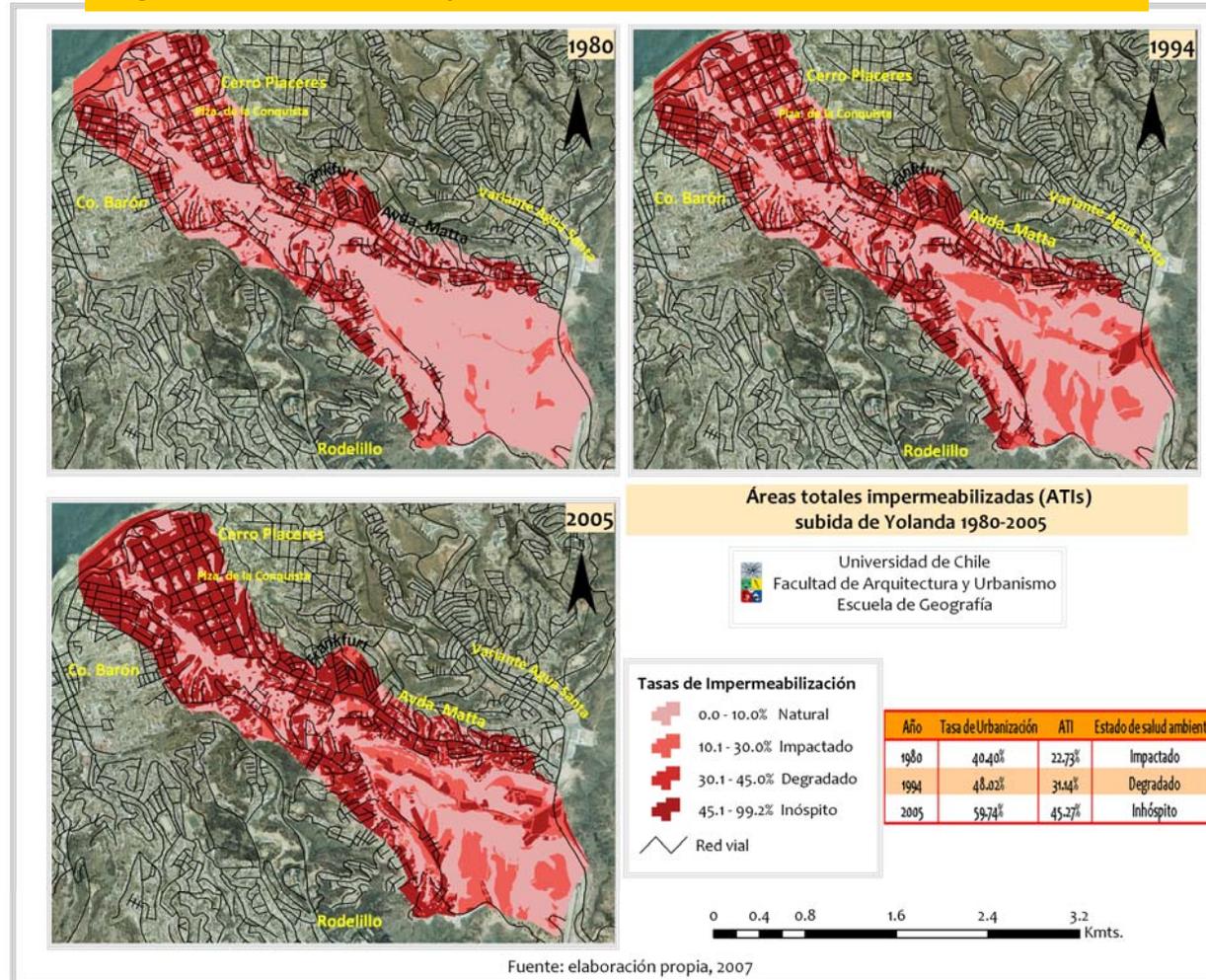
Si bien es cierto la cuenca de Avda. Francia posee un importante estado de impermeabilización hacia los sectores netamente urbanos, las ATIs se mantienen de cierta forma controladas por la importante presencia de biomasa en la cabecera de la cuenca, lo que no impide, ciertamente, que los mayores efectos hídricos se expresen precisamente en las zonas donde existe una mayor degradación de la cuenca, es decir en la sección media y en el exutorio.

Las tres cuencas, en sus distintas condiciones ambientales respecto de las ATIs, presentan un patrón general que tiende a la compactación de la mancha de superficies con calidades nefastas para la salud ambiental de las cuencas, y no se observa en ningún caso algún intento para la amortiguación o mitigación de la degradación experimentada.

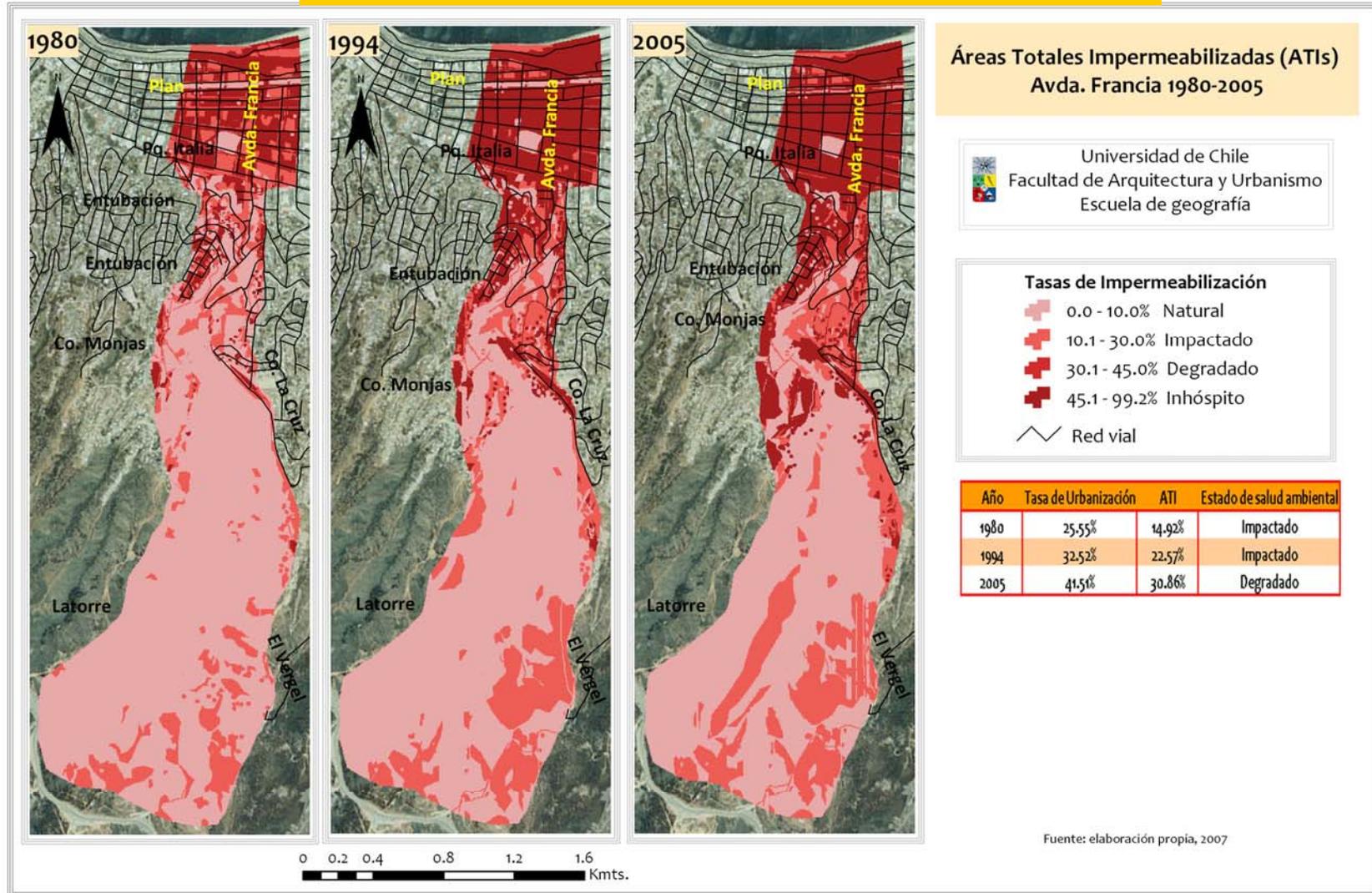
**Figura 30. Áreas Totales Impermeabilizadas, Cuenca de Miraflores Alto 1980-2005**



**Figura 31. Áreas Totales Impermeabilizadas, Cuenca subida de Yolanda 1980-2005**



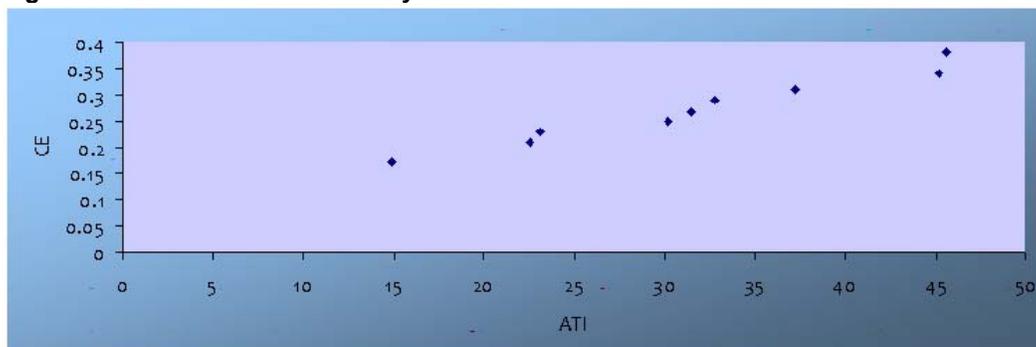
**Figura 32. Áreas Totales Impermeabilizadas, Cuenca de Avda. Francia 1980-2005**



#### 4.1.4 Impactos de los cambios de usos y coberturas de suelo sobre la escorrentía superficial

Es posible establecer una relación clara entre las ATIs de cada cuenca y los coeficientes de escorrentía. Es así como se determinó que a medida en que las ATIs aumentan, los coeficientes de escorrentía también lo hacen, aunque al considerar el grupo hidrológico en el cual se inserta el área de estudio puede que estas relaciones no sean evidentemente proporcionales; no obstante, siempre mientras mayor fue el porcentaje de ATIs encontradas en cada cuenca, mayor fue el Coeficiente de Escorrentía (Figura 33).

Figura 33. Correlación entre ATIs y CE en las tres cuencas estudiadas

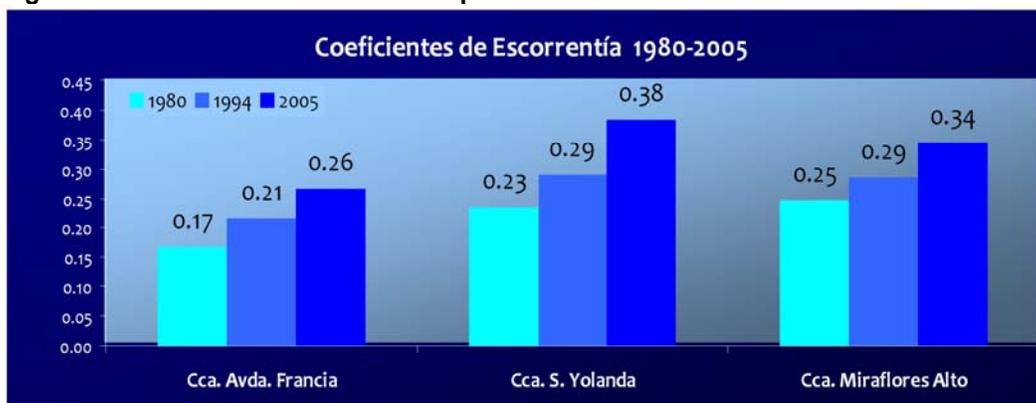


Fuente: elaboración propia, 2007

##### 4.1.4.1 Variación de la escorrentía

Como ya se mencionó, cada uso y cobertura de suelo posee características de impermeabilidad distintas y en función de ello es también posible relacionarlos con coeficientes de escorrentías particulares para cada uno. Estos índices son particulares para cada una de las cuencas en cada año de estudio (Figura 34).

Figura 34. Coeficientes de escorrentía por cuenca



Fuente: elaboración propia, 2007

El gráfico anterior describe claramente como los coeficientes de escorrentía aumentan desde 1980 al 2005, lo que quiere decir, por lo tanto, que cada vez se favorece más el escurrimiento por sobre la infiltración de las aguas, lo que produce indudables impactos negativo en los sistemas territoriales que conforman cada una de las cuencas. En términos generales la escorrentía real aumenta y el almacenamiento máximo potencial de agua en el suelo disminuye.

El aumento del Coeficiente de Escorrentía mostrado en la figura 34 implica, como ya se mencionó una ponderación de los distintos coeficientes de escorrentía por usos y cobertura de suelo, los cuales están determinados tanto por el episodio de tormenta que se seleccionó por cuenca como por el grupo hidrológico de suelo en que estén emplazados tales usos y coberturas.

#### 4.1.4.2 Coeficientes de escorrentía según uso y cobertura de suelo

La tabla muestra los diferentes componentes hidrológicos que son particulares para cada uso y cobertura de suelo, según el grupo hidrológico en que se encuentran emplazados. Se observa como los coeficientes de escorrentía más altos corresponden a las zonas comerciales, residenciales e industriales y los más bajos a las áreas verdes remanentes. Es importante mencionar que las áreas verdes artificiales poseen un coeficiente de escorrentía bajo, lo cual permite denominarlas como el uso de suelo más beneficioso en términos de la mitigación de los efectos negativos que produce la impermeabilización y la modificación del medio natural.

Caso aparte es lo que sucede con la red vial primaria, debido a que este uso es altamente impermeable, presentando un Coeficiente de Escorrentía de 0.93, es decir escurre el 93% del agua que precipita.

#### 4.1.4.3 Cambios en el Coeficiente de Escorrentía 1980-2005

En cada cuenca, existe un aumento general del coeficiente de escorrentía, que se debe principalmente al aumento de los usos urbanos de alta impermeabilidad; éstos a su vez, como ya se mencionó anteriormente, otorgan una configuración espacial característica a cada cuenca. Es así como, el cambio de los coeficientes de escorrentía posee características particulares en cada cuenca estudiada.

##### 4.1.4.3.1 Cuenca de Miraflores Alto

En Miraflores Alto, la superficie que sufre un aumento del CE entre 1980 y 1994 corresponde a 33,265 hás (Tabla 8), es decir, el 20% de la superficie de la cuenca. Estas superficies de aumento se encuentran distribuidas principalmente, por los sectores bajos de la cuenca, hacía el sector del Sporting Club y de la Avda. Uno Norte; sin embargo, una porción importante se ubica al oeste de la Avda. Eduardo Frei.

Es importante mencionar la superficie de aumento en el sector oriental de Miraflores Alto, debido a que son zonas de bosque, lo que quiere decir que existe una degradación significativa de este tipo de vegetación, lo que en definitiva significa una fragmentación del espacio.

**Tabla 8. Variación (Hás) del CE, Miraflores Alto 1980-2005**

Situación CE	1980-1994	1994-2005
Aumento	33,3	46
Disminución	0,125	3,7
Sin cambio	129,112	112,6

Fuente: elaboración propia, 2007

El aumento del uso residencial de alta densidad explica en un 64% el aumento del Coeficiente de Escorrentía (Figura 35), tanto debido a la superficie que ocupa en su emplazamiento como al alto coeficiente que ostenta (0.73 y 0.79). El resto del aumento se explica por una diversidad de usos del suelo. El avance del suelo

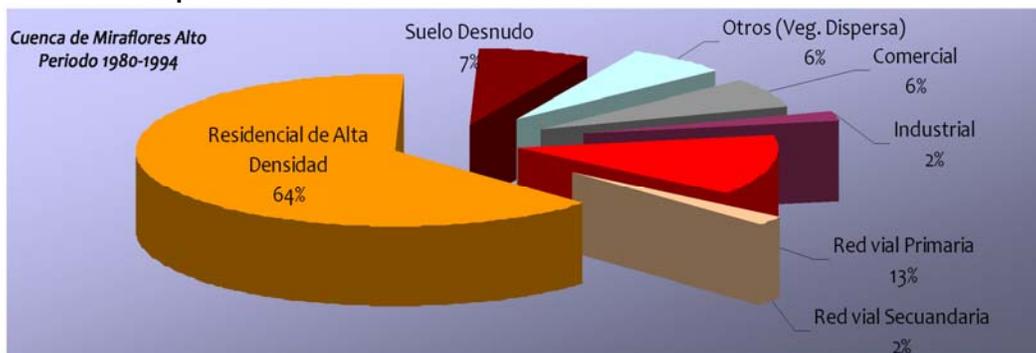
desnudo sobre coberturas naturales indica que el 6% del incremento de dicho coeficiente se debe al aumento de los sitios eriazos.

**Tabla 9. S, E y CE, según uso y cobertura de suelo, para las tres cuencas estudiadas**

	Uso de suelo	Grupo					
		Hidrológico	CN	Pp Tormenta	S	E (mm)	CE
<b>Miraflores Alto</b>	<i>Área Verde Artificial</i>	B	61	81.017	162.393	11.17	0.14
		C	74	81.017	89.2432	26.18	0.32
	<i>Área Verde Remanente Densa</i>	B	55	81.017	207.818	6.29	0.08
		C	70	81.017	108.857	20.88	0.26
	<i>Área Verde Remanente Dispersa</i>	B	58	81.017	183.931	8.57	0.11
		C	71	81.017	103.746	22.15	0.27
	<i>Cauce</i>	N	100	81.017	0	81.02	1.00
	<i>Espacios Abiertos</i>	B	66	81.017	130.848	16.20	0.20
		C	77	81.017	75.8701	30.59	0.38
	<i>Comercial</i>	B	92	81.017	22.087	59.46	0.73
		C	94	81.017	16.2128	64.36	0.79
	<i>Industrial</i>	B	88	81.017	34.6364	50.49	0.62
		C	91	81.017	25.1209	57.11	0.70
	<i>Red vial Primaria</i>	N	98	81.017	5.18367	75.11	0.93
	<i>Red vial Secundaria</i>	N	92	81.017	22.087	59.46	0.73
	<i>Residencial de Alta Densidad</i>	B	92	81.017	22.087	59.46	0.73
		C	94	81.017	16.2128	64.36	0.79
	<i>Residencial de Baja Densidad</i>	B	85	81.017	44.8235	44.42	0.55
		C	90	81.017	28.2222	54.84	0.68
	<i>Suelo Desnudo</i>	B	69	81.017	114.116	19.65	0.24
C		79	81.017	67.519	33.76	0.42	
<b>Yolanda</b>	<i>Área Verde Artificial</i>	B	61	82.7	162.393	11.86	0.14
		C	74	82.7	89.2432	27.29	0.33
	<i>Área Verde Remanente Densa</i>	B	55	82.7	207.818	6.80	0.08
		C	70	82.7	108.857	21.86	0.26
	<i>Área Verde Remanente Dispersa</i>	B	58	82.7	183.931	9.17	0.11
		C	71	82.7	103.746	23.16	0.28
	<i>Cauce</i>	N	100	82.7	0	82.70	1.00
	<i>Espacios Abiertos</i>	B	66	82.7	130.848	17.05	0.21
		C	77	82.7	75.8701	31.80	0.38
	<i>Comercial</i>	B	92	82.7	22.087	61.06	0.74
		C	94	82.7	16.2128	65.99	0.80
	<i>Industrial</i>	B	88	82.7	34.6364	52.00	0.63
		C	91	82.7	25.1209	58.69	0.71
	<i>Red vial Primaria</i>	N	98	82.7	5.18367	76.79	0.93
	<i>Red vial Secundaria</i>	N	92	82.7	22.087	61.06	0.74
	<i>Residencial de Alta Densidad</i>	B	92	82.7	22.087	61.06	0.74
		C	94	82.7	16.2128	65.99	0.80
	<i>Residencial de Baja Densidad</i>	B	85	82.7	44.8235	45.86	0.55
		C	90	82.7	28.2222	56.40	0.68
	<i>Suelo Desnudo</i>	B	69	82.7	114.116	20.61	0.25
C		79	82.7	67.519	35.02	0.42	
<b>Avda. Francia</b>	<i>Área Verde Artificial</i>	B	61	86.3	162.393	13.40	0.16
		B	55	86.3	207.818	7.92	0.09
	<i>Área Verde Remanente Densa</i>	B	58	86.3	183.931	10.50	0.12
		B	66	86.3	130.848	18.93	0.22
	<i>Cauce</i>	N	100	86.3	0	86.30	1.00
	<i>Comercial</i>	B	92	86.3	22.087	64.49	0.75
		B	88	86.3	34.6364	55.26	0.64
	<i>Red vial Primaria</i>	N	98	86.3	5.18367	80.38	0.93
	<i>Red vial Secundaria</i>	N	92	86.3	22.087	64.49	0.75
	<i>Residencial de Alta Densidad</i>	B	92	86.3	22.087	64.49	0.75
		B	82	86.3	55.7561	43.14	0.50
	<i>Suelo Desnudo</i>	B	69	86.3	114.116	22.69	0.26

Fuente: elaboración propia, 2007

**Figura 35. Participación de los usos de suelo en el aumento del Coeficiente de Escorrentía superficial en Miraflores Alto 1980-1994**



Fuente: elaboración propia, 2007

El uso comercial explica en un 6 % los CE, mientras que el industrial en un 2%. Si bien es cierto la superficie ocupada por estos usos es minoritaria en la cuenca, su alto grado de impermeabilidad los hace participes importantes de la alteración de la escorrentía. Muy importante es también, el incremento de las redes viales, que entre la primaria y secundaria, representan el 15% del acrecentamiento de la escorrentía superficial<sup>21</sup>.

Punto aparte merece la existencia de cubiertas con vegetación dispersa. Se trata de la única cobertura que tiene ingerencia en el aumento de la tasa de escorrentía, y aunque tiene características favorables para la infiltración, al haber reemplazado a las áreas verdes remanentes más densas, participa de todas formas en un cambio negativo en la escorrentía de la cuenca.

La disminución del Coeficiente de Escorrentía, se observa sólo en 0,125 há. ubicadas en el sector urbano, al Noroeste de la cuenca (Figura 37). Al estar en un sector netamente urbano, esta superficie claramente corresponde al uso de áreas verdes artificiales. Es importante destacar que para este año no existe ningún tipo de disminución del coeficiente de escorrentía en el sector del bosque.

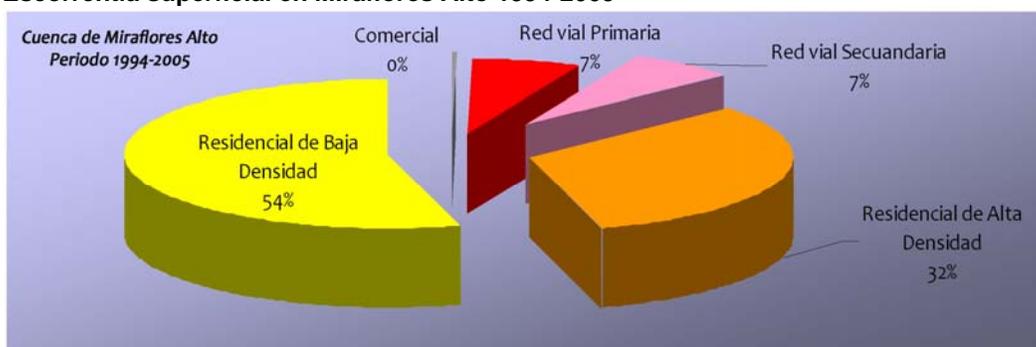
La superficie sin cambio, corresponde al 80%, y se debe principalmente a que la cuenca posee un alto grado de urbanización para el año 1980, por tanto la mayor parte de esta condición se encuentra concentrada en la cabecera de la cuenca; por otro lado existen vastos sectores de bosques donde no se han presentado cambios (Anexo 13).

El Coeficiente de Escorrentía en 1980 alcanzaba a 0.25 y en 1994 correspondía a 0.29, por lo tanto el aumento sufrido en este periodo de tiempo está estimado en un 16%, cifra que es significativa si se considera que Miraflores Alto posee una extensión de sólo 162 há. lo que indicaría que los efectos son mayores que en el resto de las cuencas. Por otro lado se observa que la escorrentía aumenta en 3.2 milímetros, por lo que hay que comentar que se trata de un aumento moderado, ya que, en algunos sectores la escorrentía puede sobrepasar los 60 mm (de los 81.017 mm de precipitaciones, estimados para esta cuenca). Lógicamente el almacenamiento máximo potencial de agua (S) disminuye cerca de 12 mm, indicador claro de una pérdida de los servicios ambientales de la cuenca, en términos de la retención y facilitación de la infiltración del agua en el suelo

<sup>21</sup> La escorrentía superficial esta completamente ligada y por lo tanto es directamente proporcional con el coeficiente de escorrentía.

Entre 1994 y el 2005 existe una mayor superficie de aumento del Coeficiente de Escorrentía, llegando a 46 hás, es decir, el 28% de la cuenca. Esto está directamente relacionado con el aumento de la escorrentía de la cuenca, que en este periodo corresponde a un 17%. La superficie de disminución del CE, alcanza las 3,6 hás, las que se ubican casi totalmente en los sectores vegetacionales de bosque y se deben principalmente a procesos netamente naturales, ya que no existe indicio de reforestación en la zona. Existen sectores en la trama urbana que presentan disminución del Coeficiente de Escorrentía, debido esencialmente a la introducción de áreas verdes artificiales (Anexo 14). Estas superficies son menores y como ya se mencionó se remiten únicamente a sectores urbanizados y se presentan en una mínima expresión espacial; por otro lado el aumento de la escorrentía superficial se observa claramente en el sector medio de la cuenca, extendiéndose a los sectores donde la vegetación densa y dispersa poseían mayor presencia (Figura 37 y Anexo 15).

**Figura 36. Participación de los usos de suelo en el aumento del Coeficiente de Escorrentía superficial en Miraflores Alto 1994-2005**



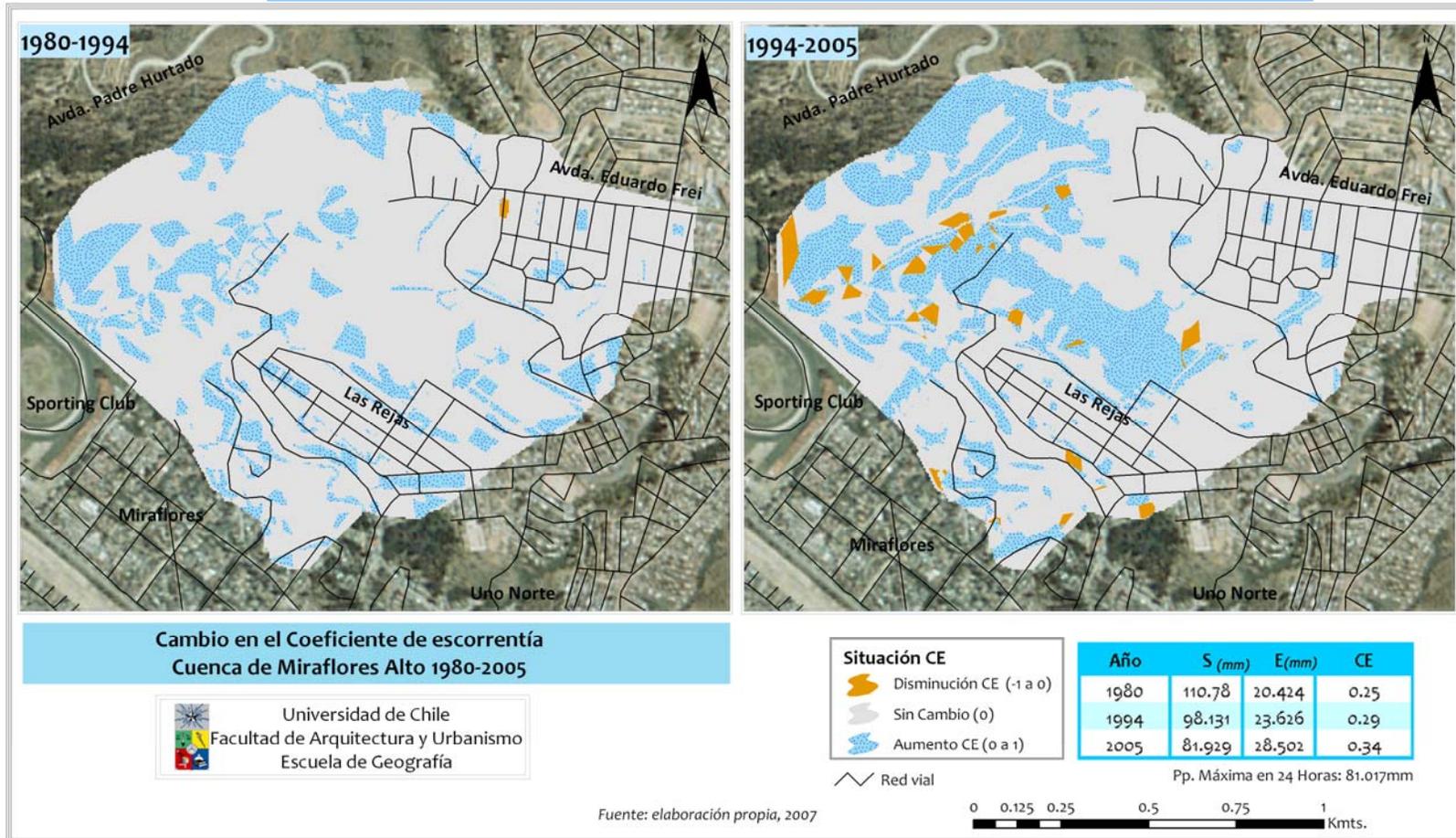
Fuente: elaboración propia, 2007

El aumento de la tasa de escorrentía en este periodo, se explica en un 54% por el avance de zonas residenciales de baja densidad, en un 32 % por zonas de alta densidad residencial y a un 14% por las redes viales. Menos del 1% se debe a las zonas comerciales (Figura 36). Todos estos usos presentan una escorrentía superficial superior al 60% (Tabla 9).

La superficie sin cambios en el coeficiente de escorrentía disminuye respecto del período anterior, pero se mantiene en los sectores de la cabecera de la cuenca (sector de la Avda. Eduardo Frei) y disminuye en los sectores naturales, observándose una notable fragmentación espacial respecto de los valores del coeficiente de escorrentía en los sectores circundante de las quebradas de esta cuenca (Anexo 15).

En cuanto al almacenamiento máximo potencial de la cuenca, este disminuye en 16 mm y la escorrentía superficial aumenta en 5 mm. Sin embargo, es importante destacar que la superficie de espacios abiertos, de vegetación remanente densa y dispersa, son amortiguadores naturales del coeficiente de escorrentía general de la cuenca. Es por esto, que aunque se presenten grandes extensiones de urbanización, la escorrentía superficial de toda la cuenca no aumenta en gran medida. Ello no significa que no existan implicancias negativas importantes en los sectores residenciales de la cuenca, ya que en ellos escurre más del 60% de las aguas precipitadas. Es decir, se generan más de 50 mm de agua que escurren en situaciones de tormenta, produciendo potenciales escenarios de riesgos naturales.

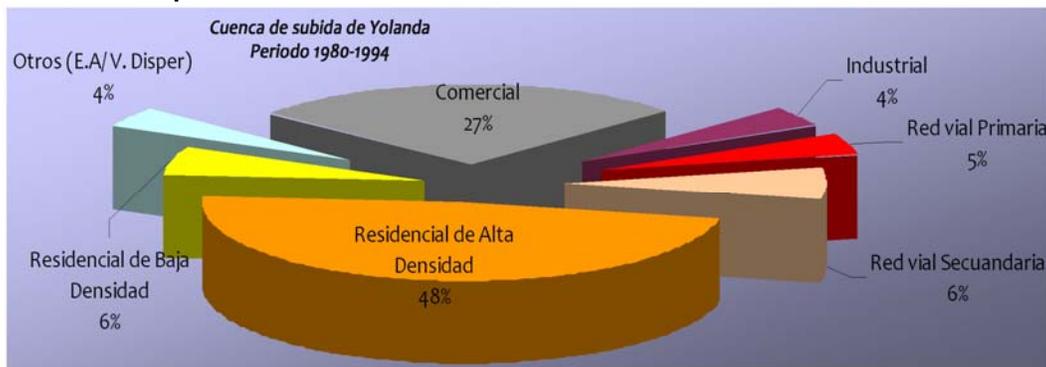
**Figura 37. Cambio en el Coeficiente de Escorrentía, Cuenca de Miraflores Alto 1980-2005**



#### 4.1.4.3.2 Cuenca de Subida de Yolanda

Entre 1980 y 1994 el Coeficiente de escorrentía de la Subida Yolanda aumentó un 26%, lo que implica un incremento de la escorrentía superficial en casi 5 mm y la disminución del almacenamiento máximo potencial de 19 mm.

**Figura 38. Participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en subida de Yolanda 1980-1994**



Fuente: elaboración propia, 2007

**Tabla 10. Variación (Hás) del CE, Yolanda 1980-2005**

Situación CE	1980-1994	1994-2005
Aumento	16,3	212,2
Disminución	4,4	8
Sin cambio	407,7	354,7

Fuente: elaboración propia, 2007

En el aumento de la escorrentía superficial, en este periodo, inciden en gran medida (48%) los sectores residenciales de alta densidad que se extienden por sobre toda la cuenca, aunque cercanos a las redes viales primarias; el uso comercial participa en un 27% de la modificación de la tasa de escorrentía y junto con el uso anteriormente nombrado son los que tienen mayor influencia en el cambio de la escorrentía; los usos residencial de baja densidad, la red vial secundaria y primaria suman un 17% en el incremento del Coeficiente de Escorrentía (Figura 38). Es importante el caso de la baja densidad residencial, ya que, son viviendas ubicadas en plenos talwegs de la subida Yolanda; importante es resaltar, un leve aumento de áreas verdes remanentes dispersas, que reemplazan a coberturas con permeabilidades superiores.

La superficie con aumento del Coeficiente de Escorrentía corresponde a 162,815 hás, es decir, cerca del 29% de la cuenca (Tabla 10), localizadas claramente en el sector de la cabecera, lo que genera una dispersión espacial en la distribución de las áreas con altos coeficientes de escorrentía, ya que en el año 1980 se presentaba una situación relativamente compacta y homogénea (Anexo 16). El aumento es evidente en todos los sectores de Yolanda, destacándose también los sectores del exutorio, donde el reemplazo de suelos desnudos por redes viales y por usos residenciales, lo explican. La inserción de redes viales y de urbanización residencial de baja densidad al interior de las laderas de la quebrada de Yolanda, explican la dispersión del aumento de la escorrentía en la sección media de la cuenca (Anexo 16). En el sector de la cabecera, existe un importante aumento del Coeficiente de Escorrentía debido a la inserción de viviendas de alta densidad y de copas de agua (uso industrial) lo que se aprecia claramente en el sector de Rodelillo.

La disminución del Coeficiente de Escorrentía se observa en los sectores cercanos al exutorio, donde la urbanización presenta un mayor grado de consolidación en 1980 (Figura 40). Estos sectores, que representan alrededor del 0.8% de la cuenca, corresponden íntegramente a áreas verdes artificiales emplazadas sobre suelos desnudos, como lo es la plaza de la Conquista, ubicada en el Cerro Placeres.

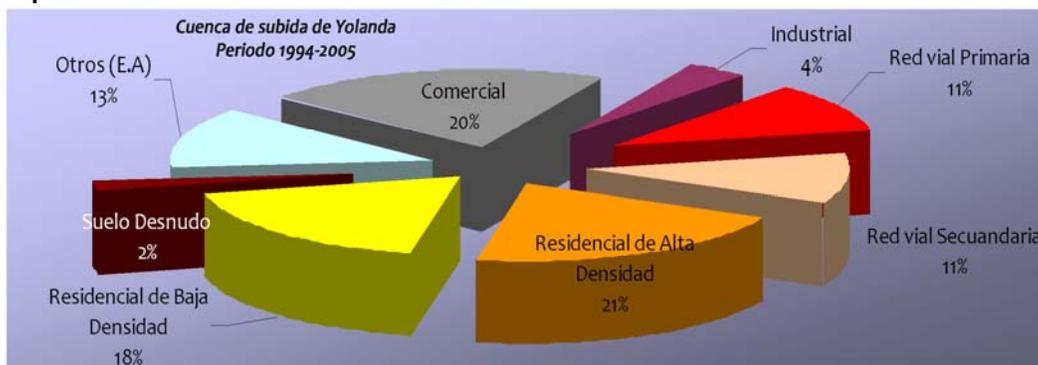
En tanto el sector que no presenta cambios en el Coeficiente de Escorrentía corresponde a 407,687 hás, es decir, el 70% de la cuenca, las que se ubican básicamente en el sector urbano, cercano al Cerro Barón y Cerro Placeres, a los sectores laterales de la cuenca, es decir Avda. Matta y Avda. Rodelillo y a un significativo sector de la cabecera, donde se encuentra vegetación de características naturales (Figura 40).

La disminución de la capacidad de almacenamiento máximo potencial de agua implica un aumento de la escorrentía en este periodo, y este aumento a su vez, causa un acrecentamiento en los procesos de erosión de los suelos. Si se considera que las quebradas son sectores altamente dinámicos, el favorecimiento de la escorrentía significa la acentuación de los riesgos naturales que afectan a la población que aquí se ubica. Junto con ésto, la erosión también representa una degradación ambiental en tanto se impide el crecimiento de vegetación más densa lo que se vuelve en un círculo vicioso, impidiendo la recuperación de los coeficientes de escorrentía menores.

Como se mencionó en el caso de Miraflores, el hecho que la escorrentía superficial aumente sólo en 5 mm no indica que no se generen situaciones críticas, ya que en las zonas urbanas escurre alrededor del 60% del agua caída, lo que significa más de 49 mm para un total estimado de 82.7 mm de precipitaciones en la cuenca de Yolanda.

Entre 1994 y el 2005 el Coeficiente de Escorrentía aumentó de 0.29 a 0.38, lo que corresponde a un 31%, equivalente a casi 8 mm.

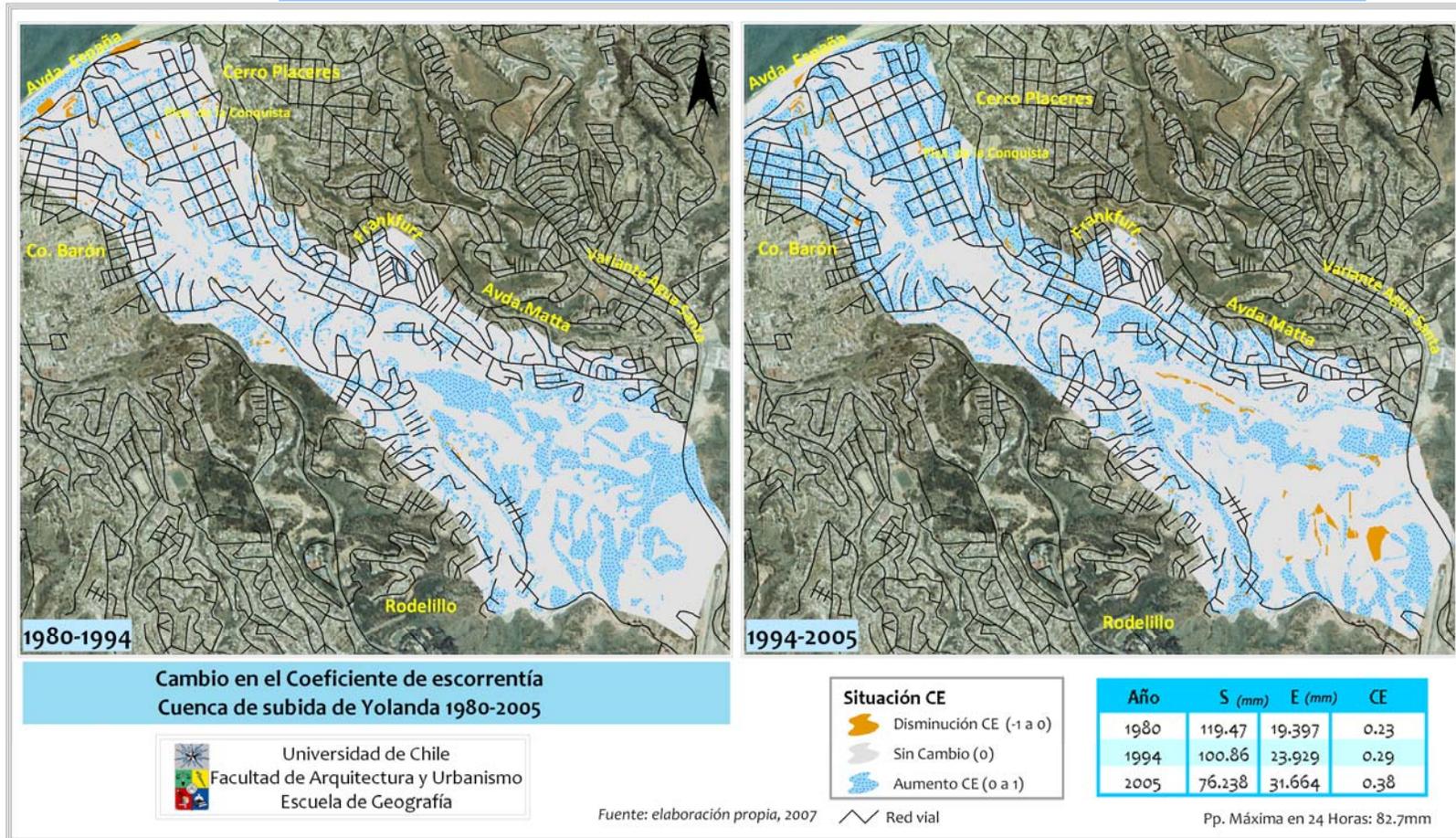
**Figura 39. Participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en subida de Yolanda 1994-2005**



Fuente: elaboración propia, 2007

Entre 1994 y el 2005 el aumento del Coeficiente de Escorrentía, como se observa en la figura 39, se explica principalmente por los usos residenciales de alta densidad (21%) y los usos comerciales (20%), usos que presentan niveles de escorrentía superiores al 70% (Tabla 9). No es menor, por otro lado, la participación de las zonas residenciales de baja densidad (18%) y de la red vial primaria y secundaria (22%). Este incremento vial se da en el sector de Rodelillo (Avda. Rodelillo) y en el sector del exutorio.

**Figura 40. Cambio en el Coeficiente de Escorrentía, Cuenca de subida de Yolanda 1980-2005**



Los suelos desnudos e industriales, sólo significan un 6% del aumento de la tasa de escurrimiento superficial, incluso menores a los espacios abiertos, (13%), los cuales reemplazan superficies de mayor almacenamiento máximo potencial, como lo son áreas verdes remanentes densas y dispersas.

En los años 1994 y 2005 se exhibe una total desintegración del sector de la cabecera de la cuenca (Anexo 16), especialmente en el sector de Rodelillo (Figura 40) donde el aumento de CE es cada vez más claro. En este periodo, el aumento se extiende claramente por toda la cuenca, alcanzando el 37% de toda la superficie (Tabla 10). Es significativo el fenómeno que se da en el exutorio, donde sectores de suelos desnudos han sido urbanizados a lo largo de los años. Las quebradas son cada vez más urbanizadas lo que explica el aumento de la escorrentía en estos lugares.

Existe una importante superficie de disminución del coeficiente de escorrentía (8 hás) que se dan claramente en el exutorio y en la cabecera de Yolanda. En el sector del exutorio se debe al aumento, en algunos sectores de las áreas verdes artificiales (Universidad Federico Santa María en el sector de Placeres) y algunas plazas esporádicas encontradas en este lugar; por otro lado, en la cabecera de la cuenca, estos procesos de disminución de la escorrentía se deben principalmente, a procesos naturales, que han escapado a la degradación general que sufre la cuenca.

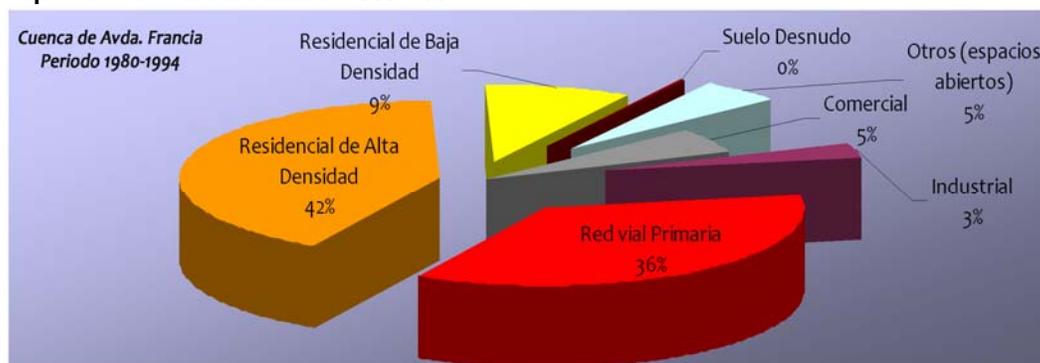
En 1994 y 1995, según la figura 16 de Anexos se observa el aumento general del coeficiente de escorrentía en la cuenca.

#### 4.1.4.3.3 Cuenca de Avda. Francia

Antes de empezar a detallar la variación del Coeficiente de Escorrentía de esta cuenca, se hace imprescindible explicar, que se está en presencia de un sistema semi natural, que consta con un porcentaje mayoritario de áreas cubiertas por vegetación natural, sobre todo en la cabecera, y que la urbanización se concentra en el exutorio y en parte de la sección media.

Entre 1980 y 1994, esta cuenca presentó un aumento del CE de 23.5% (pasando de 0.17 a 0.21), por el cual la escorrentía de tormenta aumenta casi en 4mm y el almacenamiento máximo potencial disminuye en 21mm.

**Figura 41. Participación de los usos de suelo en el aumento del coeficiente de escorrentía superficial en Avda. Francia 1980-1994**



Fuente: elaboración propia, 2007

Este aumento se debe en gran medida a la localización de zonas residenciales de alta densidad y al desarrollo de la red vial primaria (Figura 41) que juntas explican casi el 80% de dicho incremento. Es importante señalar, que las redes viales primarias se

extienden únicamente por el plan (Figura 42) cercano al comienzo de la entubación de la quebrada de Jaime, en lo que es la Avda. Francia, propiamente tal. Las zonas residenciales de alta densidad, se ubican en el exutorio, donde se prevé un mayor proceso de densificación y avance urbano.

El resto de los usos que fundamentan el aumento de la escorrentía de la cuenca corresponden a sectores residenciales de baja densidad (9%) que se van instalando en las laderas de las quebradas de la cuenca; sectores comerciales, en el sector del Plan y en el sector cercano a la entubación; sectores industriales (3%) ubicados en el sector costero y significativos también son los espacios abiertos, los cuales avanzan sobre coberturas que prestan mejores servicios ambientales a la cuenca.

**Tabla 11. Variación (Hás) del CE, Avda. Francia 1980-2005**

Situación CE	1980-1994	1994-2005
Aumento	84,41	104,72
Disminución	6,54	11,8
Sin cambio	232,39	206,9

Fuente: elaboración propia, 2007

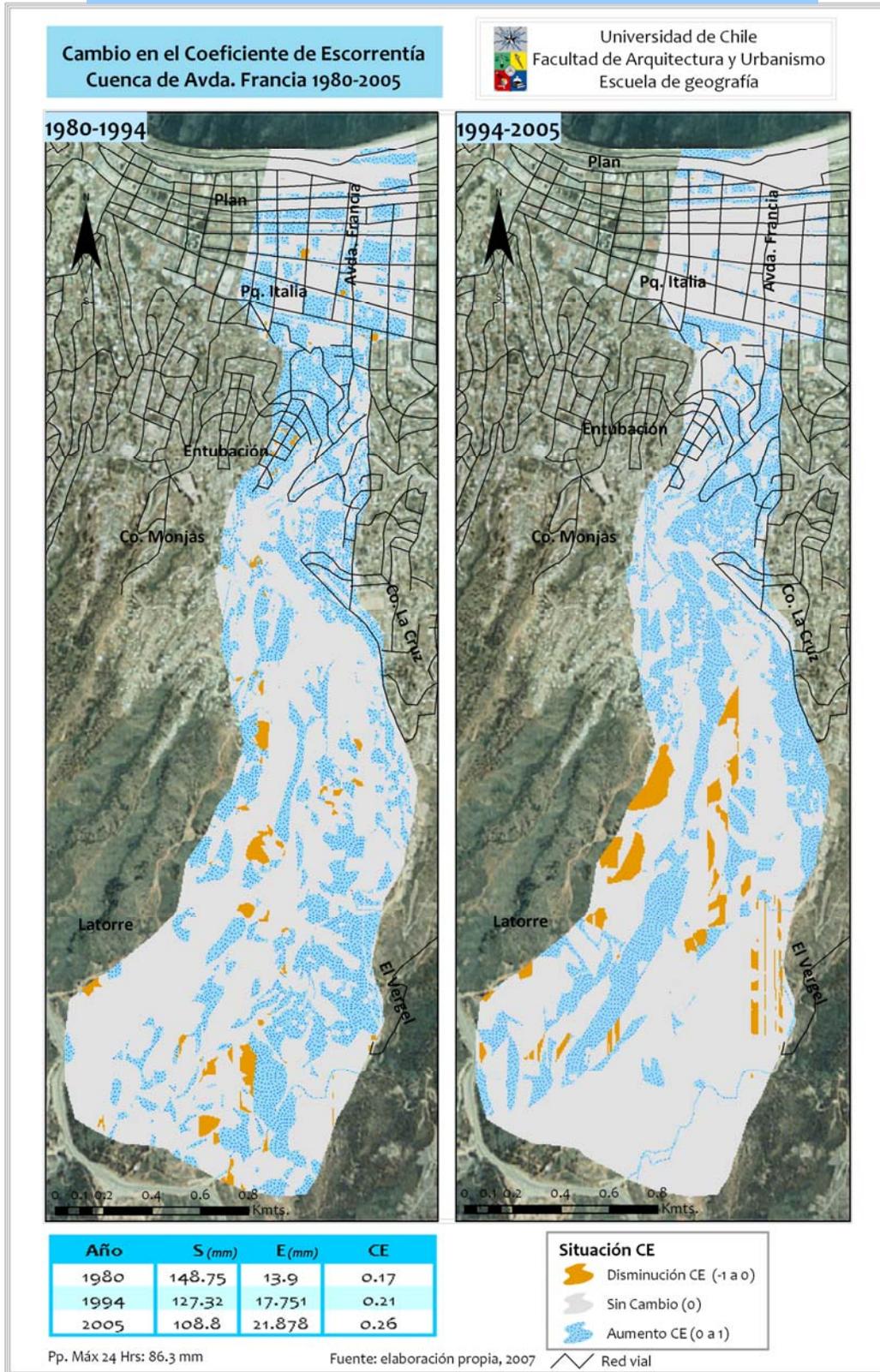
Como se observa en la tabla 11, la superficie de aumento entre 1980 y 1994 corresponde a 84,4 hás, es decir un 26% de la cuenca. Este aumento se extiende desde el plan hasta los sectores de las quebradas en El Vergel y Latorre, por medio de las quebradas. El incremento en el sector del plan, corresponde a urbanización de alta densidad y de usos comerciales (CE superiores al 70%). Hacia las quebradas este incremento se explica básicamente por los suelos desnudos y por el uso residencial de baja densidad. Es importante señalar, que al ser una cuenca inserta en un sector urbano, la influencia negativa de la urbanización afecta a los sectores naturales, encontrados en su cabecera, por lo que existe una notable degradación de los procesos hídricos, como lo son la evapotranspiración y la infiltración, sobretodo en el sector de El Vergel. En el año 1980 existía una cabecera con coeficiente de escorrentía que mayoritariamente no superaba el 16%, lo que va cambiando en cada año analizado (Anexo 19).

Se da una superficie minoritaria de disminución de la escorrentía (6,54 hás), que se inserta casi íntegramente en los sectores donde predominan coberturas naturales. Sólo algunos sectores del plan han sido habilitados como áreas verdes lo que ayuda a la infiltración y a la disminución parcial del nombrado coeficiente (Figura 42).

La superficie sin cambios en los procesos de escurrimiento superficial, alcanza las 232,385 hás, es decir, sobre un 71%, debido a que el sector del plan se encontraba ya urbanizado presentando altos coeficientes de escorrentía (Anexos 17) y a la presencia de biomasa, que no se ha visto afectada en gran medida por la degradación habitual de la cuenca.

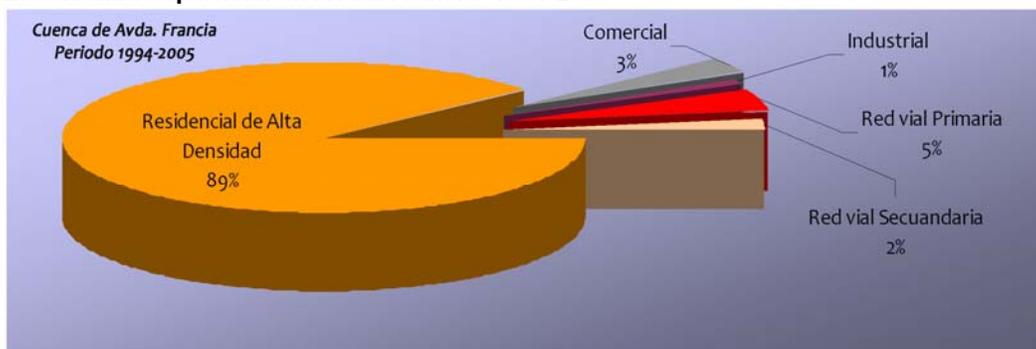
Como ya se ha indicado en las cuencas anteriores, el hecho que el aumento del Coeficiente de Escorrentía sea de un 23%, no significa que en sectores como el exutorio no se produzcan situaciones nefastas para las personas, como lo que ocurre históricamente con la salida de la quebrada de Jaime, ya que se encuentra urbanizada con usos que superan el 60% de escurrimiento, que para este caso significarían 51.78 mm de escorrentía real.

**Figura 42. Cambio en el CE, Cuenca de Avda. Francia 1980-2005**



Entre 1994 y el 2005, el Coeficiente de Escorrentía pasó de 0.21 a 0.26, aumentando en un 23.9%, es decir, una cifra levemente superior a lo acontecido en el periodo anterior. Existe un aumento de la escorrentía de 4mm y una disminución del almacenamiento máximo potencial de 18.5mm.

**Figura 43. Participación de los usos de suelo en el aumento del Coeficiente de Escorrentía superficial en Avda. Francia 1994-2005**



Fuente: elaboración propia, 2007

La participación primordial en el aumento del Coeficiente de Escorrentía de la cuenca de Avda, Francia, correspondió a las zonas residenciales de alta densidad que significaron el 89% del cambio, explicando en forma casi exclusiva la variación mencionada (Figura 43). Esto se debe principalmente a la densificación habitacional de sectores de baja densidad en los cerros La Cruz y Monjas. El 11% restante del aumento del coeficiente en Avda. Francia está representado por la red vial primaria (5%) y secundaria (2%), así como por los usos comercial (3%) e industrial (1%)

El aumento de la escorrentía se presenta en una extensión de 104,715 hás, que significan el 32% de la cuenca. Se observan en algunos sectores del plan, fundamentalmente, sitios eriazos que han pasado a ser galpones comerciales. Es importante observar como el Coeficiente de Escorrentía sigue aumentando en el sector cercano a la entubación, lo que quiere decir que la quebrada cada vez se torna menos estable ante eventos de crecidas como los ocurridos en julio del 2006. Existe una importante superficie que se extiende en el sector de El Vergel y que corresponde a sectores residenciales de alta y baja densidad junto a sectores de suelos desnudos. Por otro lado, en la cabecera de la cuenca se encuentra una mixtura de aumento y disminución del escurrimiento, predominando claramente el primero.

En los años 1994 y 2005, se observa (Anexo 17) como el sector de la entubación de la quebrada de Jaime, alcanza un proceso constante de aumento de la escorrentía superficial. El plan, al ser un lugar casi completamente comercial, alcanza elevados coeficientes de escorrentía, que superan claramente el 70% (Tabla 9).

Los sectores donde disminuye el coeficiente de escorrentía, se encuentran básicamente en la cabecera, representando un 3.7% de la superficie de la cuenca. Es claro, que no existe disminución en los sectores más bajos de Avda. Francia.

En cuanto a las zonas que no poseen cambios en el escurrimiento superficial (63% del total) se concentran en El Vergel y en el Plan, en superficies naturales de coberturas vegetacionales densas y dispersas y en usos de suelo urbanos consolidados respectivamente.

Si bien es cierto, el aumento de la escorrentía superficial se da claramente en el sector del exutorio, específicamente en el comienzo de la entubación (Figura 42) no deja de ser importante recordar que es precisamente aquí donde se han suscitado eventos negativos para las personas, como lo ocurrido en julio del 2006, donde la quebrada de Jaime inundó vastos sectores urbanos y también debido a la erosión sufrida por altos coeficientes de escorrentía se han producido deslizamientos de terrenos como en el año 2002.

#### **4.2 PARTICIPACIÓN DE LAS PENDIENTES EN EL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DE LOS USOS DE SUELO URBANOS Y SU IMPACTO SOBRE LA CUENCA; IMPORTANCIA DE LA POSICIÓN TOPOLÓGICA DE LOS USOS Y COBERTURAS DE SUELO RESPECTO DE LA ALTERACIÓN DE LAS ÁREAS DE RECARGA Y DESCARGA HÍDRICA.**

##### **4.2.1 Impacto de la urbanización según pendientes y su impacto sobre el Coeficiente de Escorrentía superficial.**

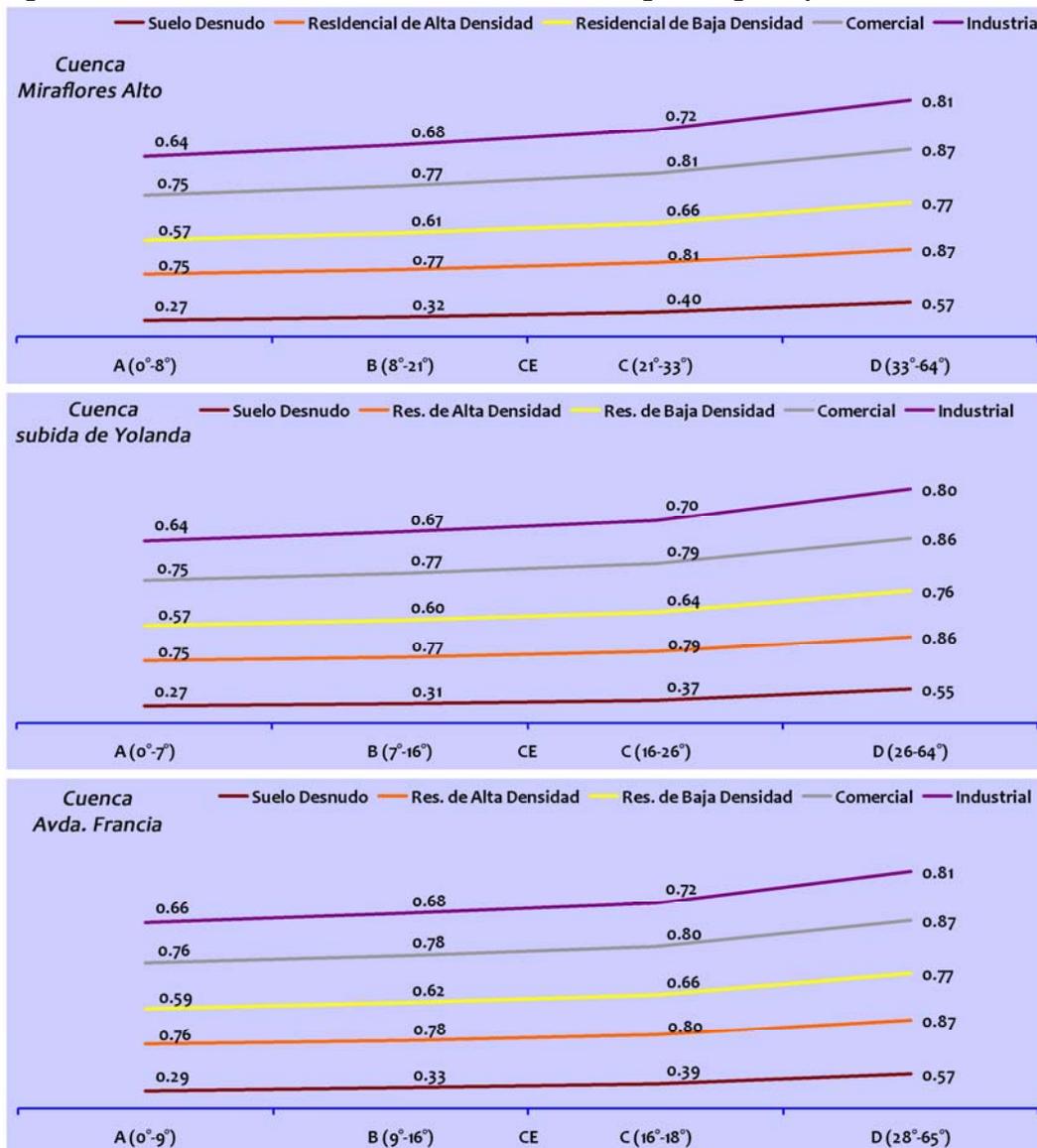
La urbanización es sin duda el factor que más altera el Coeficiente de Escorrentía, pero la urbanización en sectores donde existen pendientes ciertamente afecta de manera diferencial a dicho coeficiente (Figura 44). Si se considera que las tres cuencas estudiadas se encuentran en un contexto de pendientes fuertes (superando los 64°), es imprescindible hacer diferencias respecto de los sectores en donde se produce el avance de la mancha urbana.

En algunos usos, como el suelo desnudo, la variación entre el rango de menor pendiente "A" y el de mayor pendiente "D" es superior al 100%, lo que indica claramente la diferencia entre urbanizar en sectores planos y sectores de relieves abruptos. Los usos residenciales de alta y baja densidad sufren incrementos importantes de sus coeficientes de escorrentía mientras se insertan en pendientes más pronunciadas.

Evidentemente no todos los sectores con pendientes pronunciadas han sido ocupados por todos los usos, sin embargo como muestran los resultados que se exhibirán a continuación, es un fenómeno que avanza progresivamente, alterando en forma considerable el escurrimiento superficial de las cuencas. Si bien es cierto, los resultados representan grandes aumentos de las tasas de escurrimiento, importante es entender la tendencia que surge, la que sugiere un aumento constante de las urbanizaciones por sobre quebradas, laderas e incluso lechos de cauces.

Es importante también, indicar que la presencia de estos usos urbanos ocupa solo un porcentaje de la cuenca, y que en algunos casos como en Avda. Francia, la superficie natural es, en todos los periodos, la que predomina. Es por eso que el aumento del Coeficiente de Escorrentía considerando las pendientes, son un indicador del mayor daño que sufren los entornos naturales, producto de la erosión de los suelos, el aumento de la escorrentía en sectores donde podría existir infiltración y una serie de fenómenos naturales.

**Figura 44. Variación del Coeficiente de Escorrentía, según rango de pendiente**

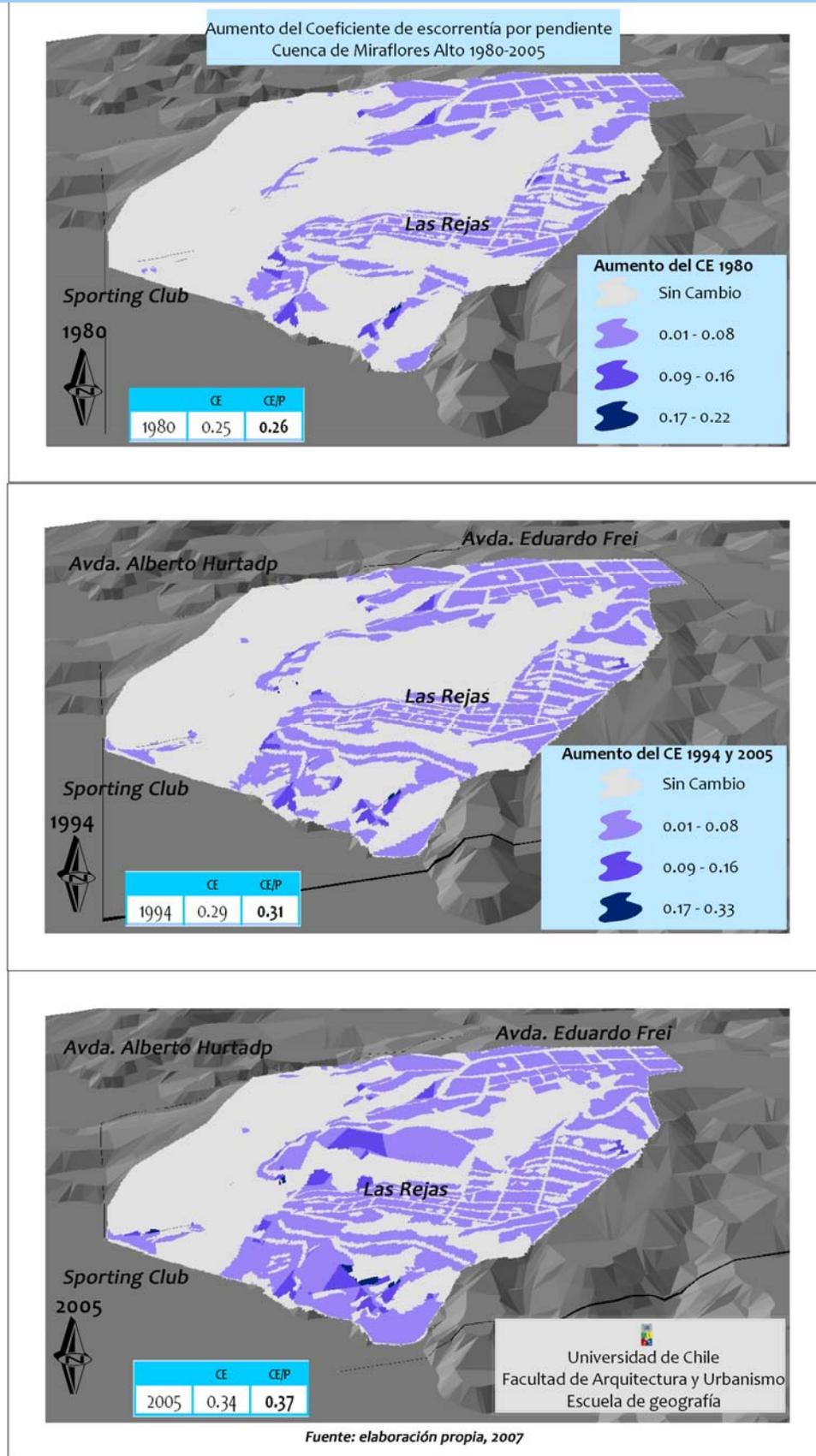


Fuente: elaboración propia, 2007

#### 4.2.2 Variación de la escorrentía según la pendiente en Miraflores Alto

En Miraflores Alto, para el año 1980, se observa un aumento del Coeficiente de Escorrentía mayoritario en el sector Este de la cuenca (Figura 45). Este aumento, en su mayoría, se encuentra en el rango de 0.01 a 0.08. El incremento de la tasa de escurrimiento es leve, ya que como se observa en la figura 45 corresponde sólo al 4%. Este ligero incremento se debe principalmente a que los usos que influyen en él se encuentran en pendientes ubicadas en el primer y segundo rango (Anexo 18), por lo que no implican una situación más marcada. Existen algunos lugares, principalmente cercanos a la Avda. Eduardo Frei y al Sporting Club, que presentan un mayor aumento (0.09-0.16/0.17-0.22) los cuales corresponde a sectores residenciales de alta y baja densidad, aunque no superan las 5 há (Anexo 18). Muy destacable es que, en este año, la mayor alza fue de 0.22, a diferencia del resto de la cuenca en que alcanzó a 0.33. Ello se debe al hecho que las áreas de mayor pendiente aún no han sido urbanizadas.

**Figura 45. Aumento del CE por Pendiente, Cuenca Miraflores Alto 1980-2005**



Para el año 1994 nuevamente el patrón que existe es el de un incremento ligero de la tasa de escorrentía superficial, que se observa en los mismos sectores que en el año 1980. Sin embargo, si bien es cierto, se mantiene el mismo patrón, la superficie que abarca es mayor, debido a que responde al avance de los sectores residenciales de alta y baja densidad, el cual se produce en partes de pendientes poco pronunciadas (Figura 44 y Anexo 18). Los espacios donde las pendientes son más bruscas se encuentran cercanos al Sporting Club y se aprecia claramente como comienza a alterarse el Coeficiente de Escorrentía en estas zonas, especialmente en el año 1994 y debido esencialmente a la existencia de suelos desnudos (los que duplican sus coeficientes), y a la presencia zonas residenciales de alta y baja densidad. Existen algunos sectores aislados al Este de zona que para 1994 experimentan urbanización en pendientes suaves, lo que implica un crecimiento del Coeficiente de Escorrentía de entre 0.01 a 0.08, explicado principalmente por la presencia de suelos desnudos.

Para 1994 la tasa de escurrimiento superficial de la cuenca aumenta en un 6.9%, lo que se debe principalmente a los usos residenciales, comercial y suelo desnudo (Anexo 18), los que cada vez se encuentran en zonas de mayor pendiente.

En el 2005, el área de crecimiento del Coeficiente de Escorrentía según la pendiente se extiende desde la cabecera, hasta la sección media, alcanzando amplios sectores del exutorio en el Sporting Club. Nuevamente el patrón es de un leve aumento de la escorrentía superficial; sin embargo, lo anterior se explica porque los usos residenciales que representan la mayor parte de este cambio, en su situación sin pendiente ya presentaban elevados coeficientes de escorrentía.

El incremento del 8.9% del Coeficiente de Escorrentía debido a la pendiente, está fuertemente influenciado porque en este año son extensamente urbanizados los sectores que se ubican en los rangos de pendiente más bruscos (C y D). Esto equivale a la urbanización de 14 há (Anexo 18) de suelos localizados en áreas de alta inclinación.

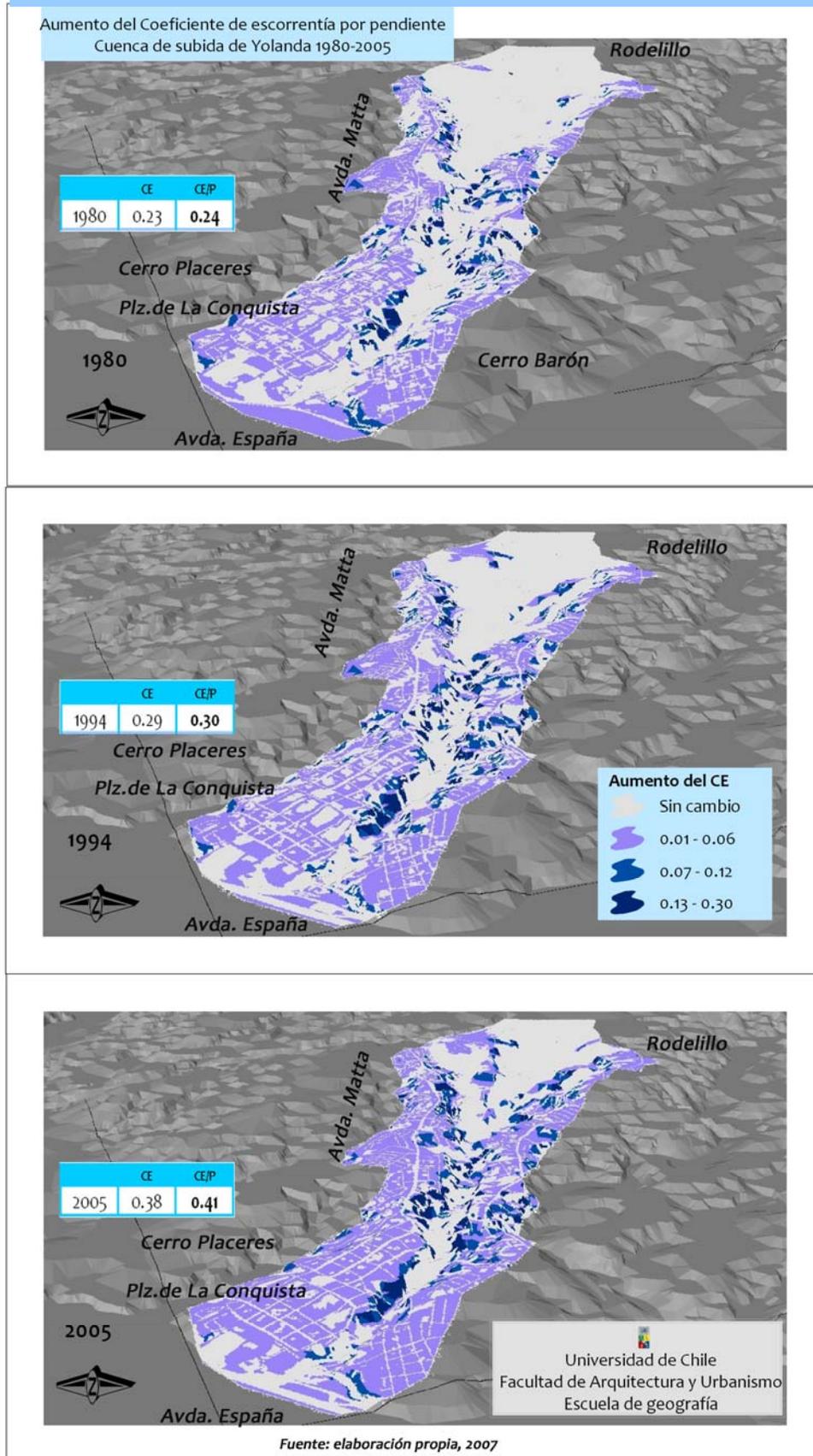
En el sector medio de la cuenca, donde se ubica un condominio residencial de baja densidad, existe un aumento considerable de la escorrentía, producto de que en este lugar las pendientes son del orden de los 8 a 21°.

La cuenca de Miraflores Alto presenta las pendientes relativamente más suaves respecto de las otras dos que están siendo analizadas, sin embargo es interesante observar cómo la ocupación extensiva de ésta significa la intervención progresiva y constante de zonas cada vez más inclinadas.

#### **4.2.3 Variación de la escorrentía según la pendiente en la subida de Yolanda**

En esta cuenca el aumento del coeficiente de escurrimiento según pendientes es progresivo en cada año de estudio. Si bien es cierto, toda la cuenca presenta sectores de pendiente de al menos 1°, exhibe un extenso cauce con laderas fuertemente inclinadas. Ya en 1980, esta cuenca presentaba superficies importantes de urbanización sobre laderas inclinadas. Este aumento se observa principalmente entre el Cerro Barón y el Cerro Placeres (Figura 46) y presenta importantes magnitudes, debido a que los rangos de pendiente corresponden al C y al D (Figura 44).

**Figura 46. Aumento del CE por pendiente, Cuenca de Yolanda 1980-2005**



El Coeficiente de Escorrentía aumentó levemente como consecuencia de la ocupación de áreas de pendiente, pasando desde 0.23 a 0.24, lo que es explicado por la incidencia de los sectores más planos de la cuenca en los Cerros Barón y Placeres. Las quebradas, propiamente tales, han sido urbanizadas, pero aun queda mucho terreno libre.

En el exutorio mismo, se encuentran sectores donde se produce un gran aumento de la tasa de escorrentía (entre 0.13 y 0.3) lo que se debe al uso residencial de baja densidad y los suelos desnudos (Anexo 18). El principal aumento se ubica en toda la extensión de la quebrada y se explica básicamente por la introducción de viviendas de alta densidad (Anexo 12), que ocupan alrededor del 5% de toda la cuenca.

La superficie de incremento del Coeficiente de Escorrentía mayormente corresponde a la de 0.01 a 0.06, y se explica básicamente, como ya se aludió a la urbanización de zonas residenciales de alta y baja densidad y de comercio en los sectores de menor inclinación (Figura 46).

El contexto general en el año 1994 es del aumento del coeficiente de escorrentía en un 3.4%; aunque se vislumbran cambios en las situaciones específicas. Es así como, el sector de la quebrada principal se encuentra mayormente urbanizado, lo que denota parches de aumento del coeficiente de escorrentía que llegan a 0.3. Esto se debe a la constante intervención desmedida de las quebradas, donde a partir de la instalación de zonas residenciales precarias comienza un aumento de los suelos desnudos destinados para la urbanización o que son resultados de la degradación general de la cuenca. Es posible apreciar la mezcla de varios usos y coberturas en diferentes pendientes, lo que torna un panorama complejo respecto de los efectos negativos que pueden llegar a suceder debido al aumento de la escorrentía, tanto para las personas como para el sistema natural.

En el sector de Rodelillo, se observa como empiezan a aparecer parches de mayor aumento de la escorrentía superficial, debido, principalmente, al avance industrial que trae consigo superficies de suelos desnudos, los que como ya se mencionó, en pendientes de rango D duplican su coeficiente de escorrentía (Figura 44).

Los sectores donde el crecimiento del Coeficiente de Escorrentía es insustancial se mantienen, debido a que la urbanización que aquí se presenta ya posee valores relativamente altos y su modificación en pendientes suaves no es importante (Figura 44). Sin embargo con el avance urbano sobre la cuenca de Yolanda, se ocupan mayores extensiones de suelos en condiciones de pendientes poco pronunciadas, lo que también influye en el aumento de la escorrentía de la cuenca.

Hacia el año 2005 el coeficiente de escorrentía sufre el mayor aumento de los tres años de estudio, el que se estima en un 8%. Esto producto de la intensa urbanización tanto en sectores con pendientes suaves a moderadas como de pendientes abruptas.

Los usos residenciales de alta y baja densidad junto con los comerciales, ubicados cercanos a las redes viales primarias de Avda. Rodelillo, y Avda. Matta, entre otros, tienen un aumento máximo en situación de gradientes encontrados en los rangos A y B de 0.05 respecto de su Coeficiente de Escorrentía, lo que se considera bajo. No obstante la suma ponderada de esta alza implica situaciones de inundaciones, anegamientos o erosión de los suelos.

El mayor aumento de la escorrentía superficial se observa, muy claramente, en la quebrada principal (figura 46) donde el avance urbano es imponente. Más de usos residenciales se encuentran en los rangos de pendiente C y D, lo que señala un

significativo aumento de la tasa de escorrentía, que corresponde al 38%. Se observa una quebrada prácticamente cerrada en la sección media y todo indica que el sector de la cabecera va en camino de la misma situación, ya que se encuentran parches con aumentos que van entre 0.01 y 0.3.

La mayor presencia de parches de aumentos de escorrentía en el sector de la cabecera es un síntoma negativo acerca de la salud de la cuenca en años posteriores, porque indica que el suelo desnudo comienza a avanzar por zonas naturales antes inalcanzadas, lo que a su vez abre paso a la implantación de superficies residenciales.

#### **4.2.4 Variación de la escorrentía según la pendiente en la Avda. Francia**

Esta es la cuenca que presenta un historial más importante respecto de acontecimientos nefastos para el hombre y el sistema natural, ya que los desbordes de la quebrada de Jaime han ocasionado innumerables problemas aguas debajo de la cuenca. Como se verá a continuación, a lo largo de los años estudiados, cada vez se presenta un incremento evidente del Coeficiente de Escorrentía, sobretodo en el sector del exutorio.

Luego también es importante reconocer, que en el sector del plan, al presentarse sin declives, no se consideró un aumento del coeficiente por cambio de pendiente, lo que permite deducir que el aumento de éste coeficiente en todos los años se debe única y exclusivamente a la urbanización de sus quebradas.

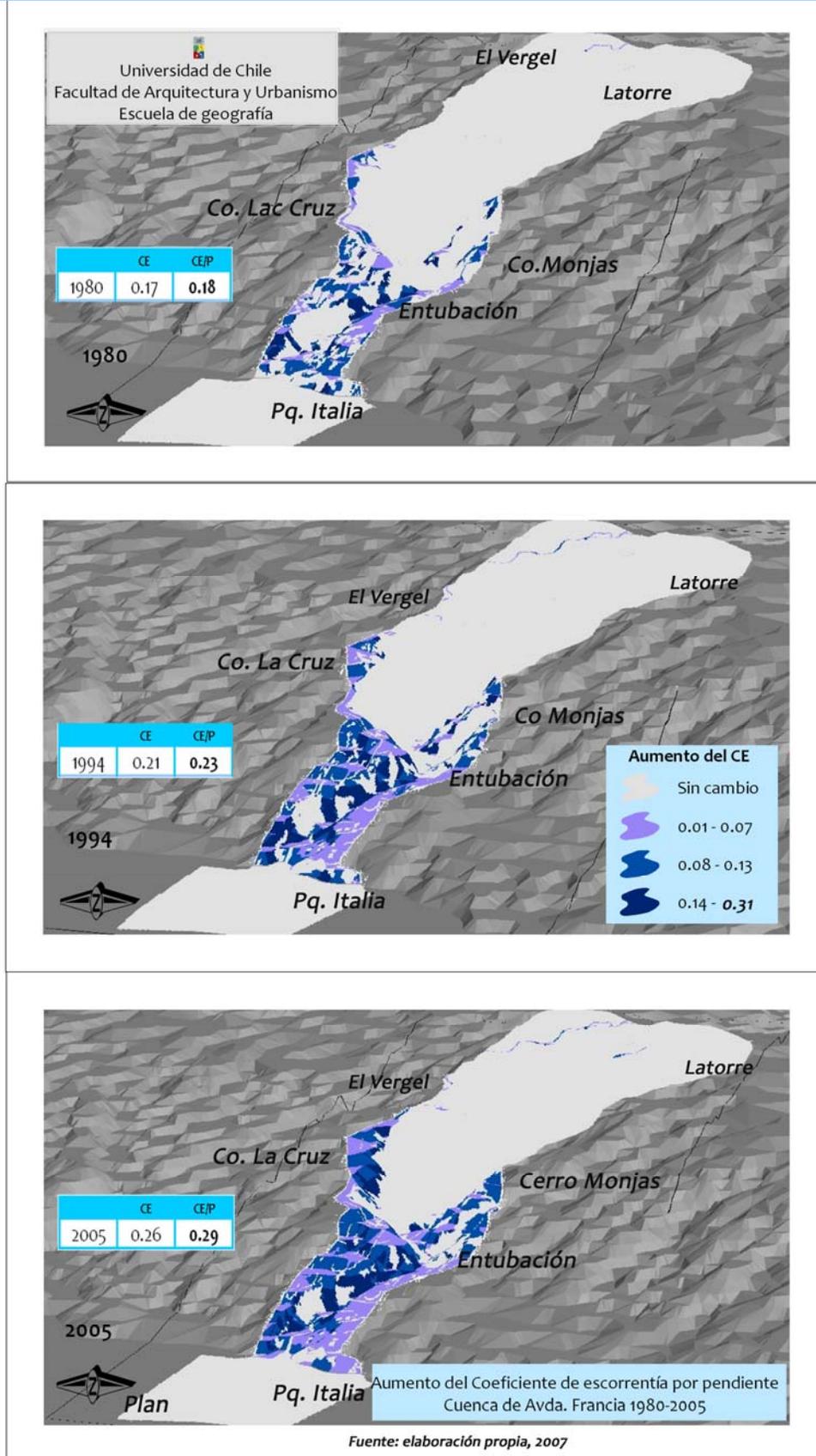
En 1980 se observa un mosaico en el sector del exutorio, debido principalmente a que la urbanización no sigue patrones claros. La convivencia de usos residenciales de alta y baja densidad, junto con la generación de suelos desnudos describe exactamente la situación de heterogeneidad espacial que se experimenta. Los aumentos de la tasa de escurrimiento van desde 0.01 a 0.31, es decir, se localiza en las urbanizaciones ubicadas en todas las pendientes, desde las más suaves hasta las más inclinadas (entre 0° y 65°). El aumento de 5.8% del Coeficiente de Escorrentía de la cuenca se explica en gran medida por el avance residencial sobre las laderas de las cuencas, ya que los usos comercial e industrial se remiten casi por completo al sector del plan (Figura 47 y Anexo 18).

Por los flancos norte y sur de la cuenca se observa como se comienza a desarrollar el aumento de las tasas de escorrentía en valores que van de 0.08 a 0.13, debido principalmente al aumento del uso residencial de baja densidad que se extiende por las laderas, ocupando casi 6 há.

El menor aumento se observa en la zona sur del exutorio (Figura 47), exactamente en el sector de la entubación de la quebrada de Jaime, ya que originalmente los coeficientes de escorrentía se presentaban altos en este sector.

Para el año 1994 la superficie de mayor aumento de la escorrentía se tiende a homogeneizar, extendiéndose por las laderas de la quebrada. En el sector de la cabecera, producto de la introducción de caminos con características de suelos desnudos, se observa un delgado hilo en el cual se presenta un aumento de la tasa de escorrentía de 0.31.

**Figura 47. Aumento del CE por pendiente, Cuenca de Avda. Francia 1980-2005**



Finalmente para el año 2005 el Coeficiente de Escorrentía de la cuenca aumenta en un 11.5%.

Prácticamente todo el sector del exutorio y sección media de la cuenca ha experimentado aumentos considerables del Coeficiente de Escorrentía como consecuencia de la urbanización sobre pendientes elevadas (figura 46). La urbanización de este sector, sobre todo con usos residenciales, implica que el factor pendiente es preponderante en el aumento de los riesgos naturales. En el sector de El Vergel (Anexo 19), en la sección media, se observa como en pendientes pronunciadas existe urbanización de baja densidad y suelos desnudos

Finalmente es posible destacar que en las cuencas de Yolanda y de Avda. Francia se presenta un mayor grado de aumento de la escorrentía producto de las pendientes abruptas que caracterizan la geografía de estas quebradas que drenan las terrazas de abrasión marina. Sin embargo, la tendencia a urbanizar estas superficies parece no detenerse, como un rasgo común en las tres cuencas analizadas.

#### **4.3 Evolución de las áreas potenciales de recarga y descarga hídrica**

Como se aprecia en la figura 48 en las tres cuencas ocurre una involución de las áreas potenciales de recarga, entre 1980 y el 2005. Tanto en la cuenca de Miraflores Alto como en Yolanda la situación prácticamente se invierte, es decir, las zonas de recarga van perdiendo terreno respecto de las zonas de descarga. La situación de Avda. Francia es relativamente menos notoria debido a la importante presencia de vegetación natural en la cabecera de la cuenca, lo que produce que las zonas de recarga permanezcan en el tiempo, pero de todas maneras se presenta una ostensible baja respecto de la superficie de las áreas de máxima potencialidad de recarga.

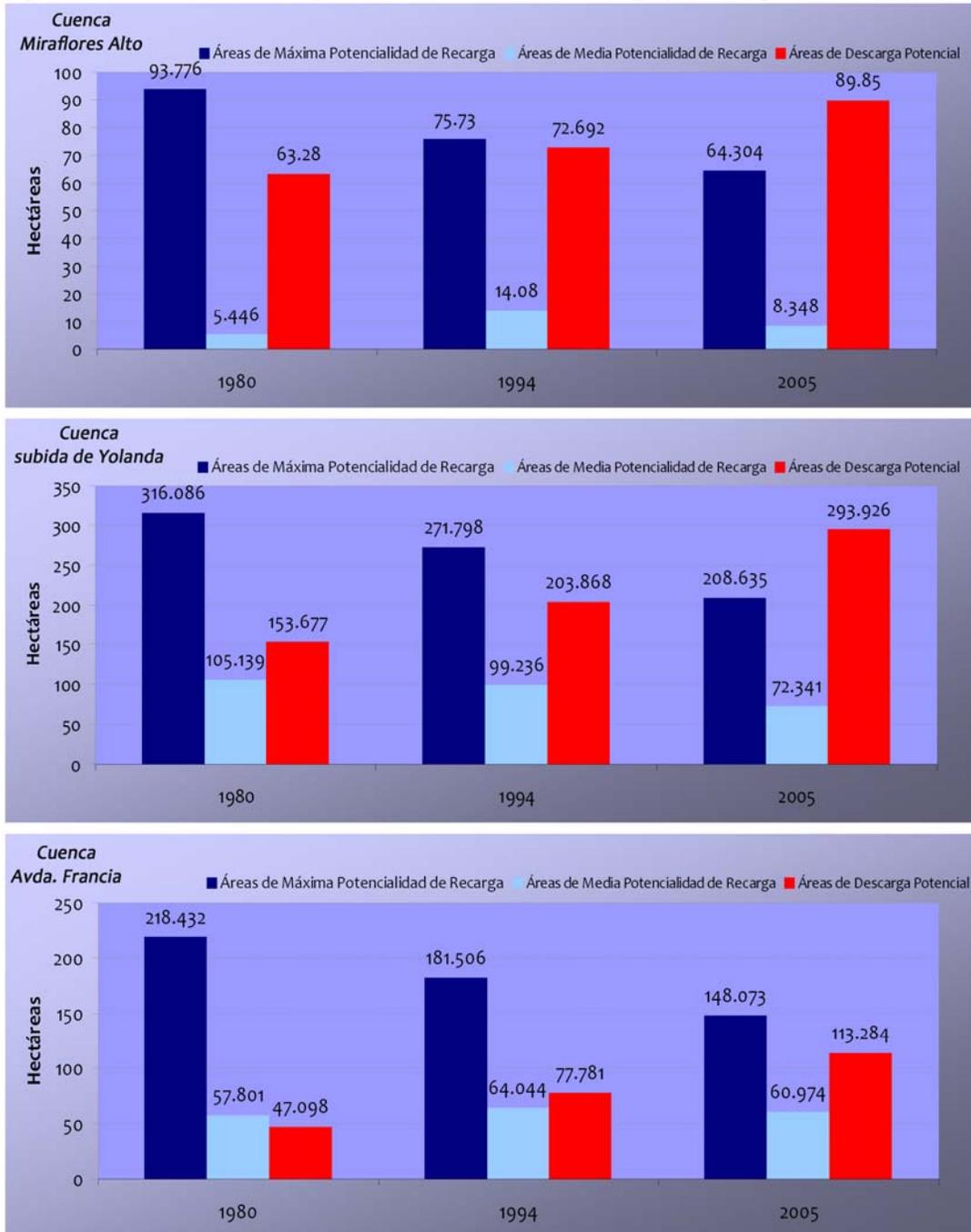
En las tres cuencas existe una secuencia de pérdida de zonas de máxima potencialidad de recarga que tiene como transición el año de 1994. En dicho año, las zonas de recarga y descarga se nivelan (a excepción de Avda. Francia), para pasar a dominar las zonas de descarga el año 2005.

Las áreas de media potencialidad de recarga no siguen un patrón común. Esta clase intermedia es producto de la degradación de sectores de la cuenca de máxima potencialidad de recarga. A su vez estos sectores de media potencialidad se transforman en sectores potenciales de descarga.

En general el fenómeno que acontece en las tres cuencas se desarrolla de manera tal que a medida en que avanza la urbanización se cambian las zonas de recarga por zonas de descarga, con lo que la permeabilidad de la cuenca va disminuyendo, lo que permite que el escurrimiento superficial se de en lugares donde debería favorecerse la infiltración.

Entre 1980 y 1994 las áreas de descarga potencial registraban una superficie de avance que se dividía en un 50% de áreas de máxima potencialidad de recarga y un 50% de media potencialidad de recarga, exceptuando la cuenca de Miraflores Alto, donde más del 90% del cambio se produjo sobre las áreas de mayor aptitud para la recarga. En este caso, el de Miraflores Alto, el 100% de las superficies de máxima potencialidad de recarga, que se perdieron en este periodo, se encuentran distribuidas entre las áreas de descarga potencial y de media potencialidad de recarga, con 9.21 Hás y 9.6 Hás respectivamente. En el avance de las áreas de descarga potencial existe una pequeña superficie (0,2 Hás) que correspondían a sectores de media potencialidad de infiltración.

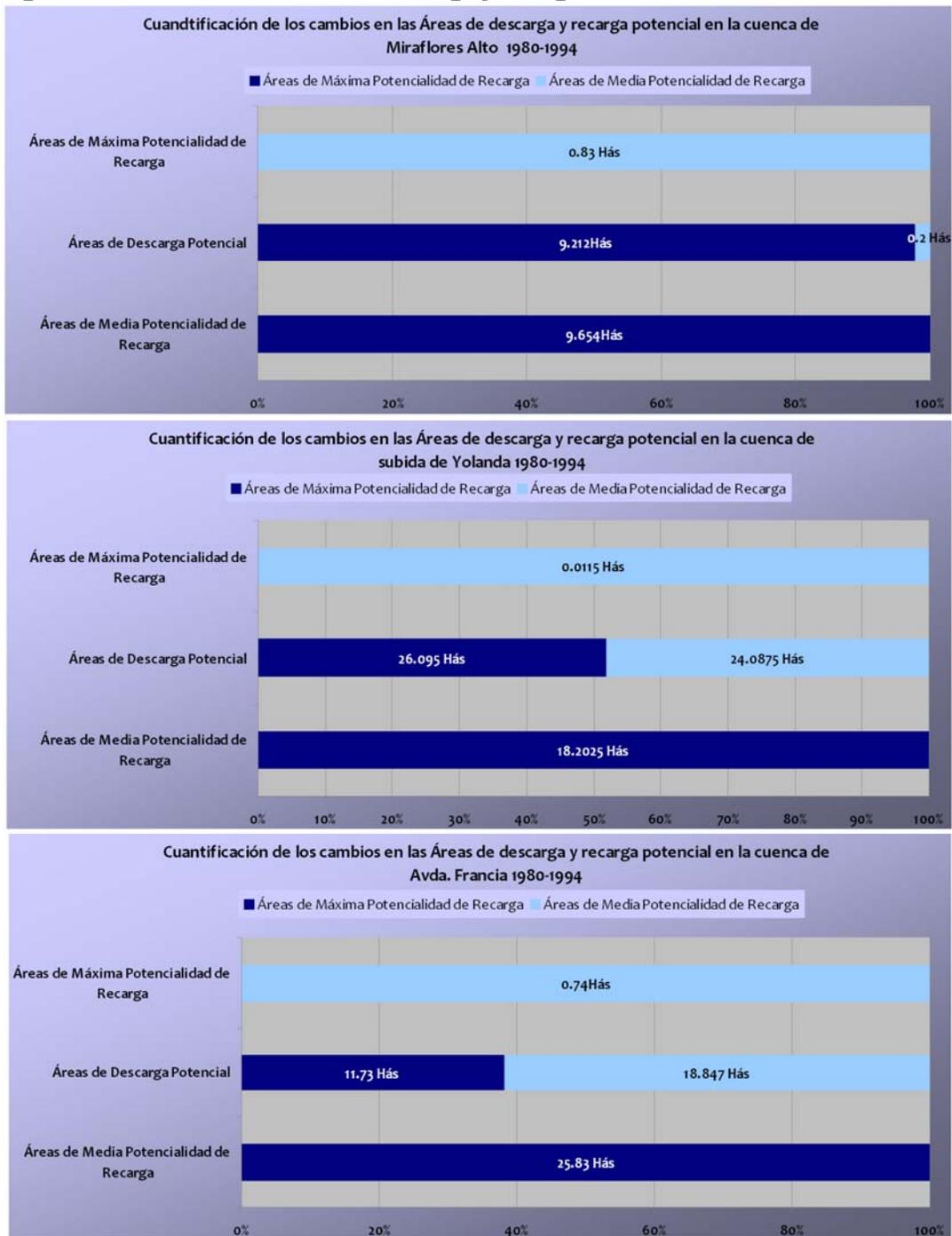
**Figura 48. Evolución de la superficie de las zonas de recarga y descarga 1980-2005**



Fuente: elaboración propia, 2007

### 4.3.1 Situación en el período 1980-1994

Figura 49. Cambios de las áreas de descarga y recarga 1980-1994



Fuente: elaboración propia, 2007

Las cuencas de Avda. Francia y de la subida de Yolanda, presentan un avance de las zonas de descarga potencial más equitativo que la cuenca de Miraflores Alto. Por ejemplo, en Yolanda 26 de las 50 hás que se agregan a esta superficie corresponden a los lugares de mejores condiciones para la infiltración y 24 hás. tenían antes características de una infiltración media (Figura 49).

Se podría denominar como homogéneo el avance de las zonas de descarga potencial, el cual se produce intensamente en los sectores bajos de la cuenca, específicamente entre el Cerro Barón y el cerro Placeres, desplazándose a la altura de la calle Frankfurt, siguiendo los ejes de Avda. Matta y Avda. Rodelillo. Otro lugar de cambio importante, es la zona de Avda. España, ubicada en el exutorio de la cuenca, a orillas del mar, la que se produce por la construcción de red vial primaria y secundaria. Lo que es considerable, es que la cabecera de la cuenca aún presenta superficies importantes que favorecen de manera óptima la infiltración, aunque para el año 2005 ya se observaban incrustaciones de áreas de descarga (Figura 51).

Por otro lado, en la cuenca de Avda. Francia, la distribución del aumento de las zonas de descarga, corresponde casi en un 40% (11.73%) a la transformación de superficies de recarga de potencialidad máxima y un 60% restante (18,847 hás) concierne a las zonas anteriores de recarga media (Figura 49). Este avance se extiende principalmente por el sector del Plan de Valparaíso, en las inmediaciones del Parque Italia (Figura 52) donde para el año 1980 se apreciaba un panorama relativamente heterogéneo, donde coexistían áreas de las tres categorías analizadas y para el año 2005 se presenta un panorama mayormente homogéneo, donde el mismo Parque Italia se presenta casi como un remanente de las zonas de mayor calidad ambiental. Siguiendo la extensión de la cuenca, en el sector de la entubación, entre el cerro Monjas y Cerro La Cruz, se desarrolla un fenómeno de acrecentamiento de las áreas de descarga potencial, debido básicamente al aumento de urbanización residencial en las laderas de la quebrada de Jaime.

Respecto de las áreas de media potencialidad de recarga, es claro que sólo avanzan cubriendo sectores anteriores de máxima potencialidad. En Miraflores Alto, este avance es de 9,65 hás y es encontrado preferentemente en el sector medio de la cuenca, al noroeste de la calle Las Rejas (Figura 51). Principalmente corresponde a suelos desnudos que son producidos por la degradación de la cuenca. Otro lugar donde se desarrolla este fenómeno es al norte del Sporting Club, donde las áreas de potencialidad media, se extienden sobre las de máxima potencialidad.

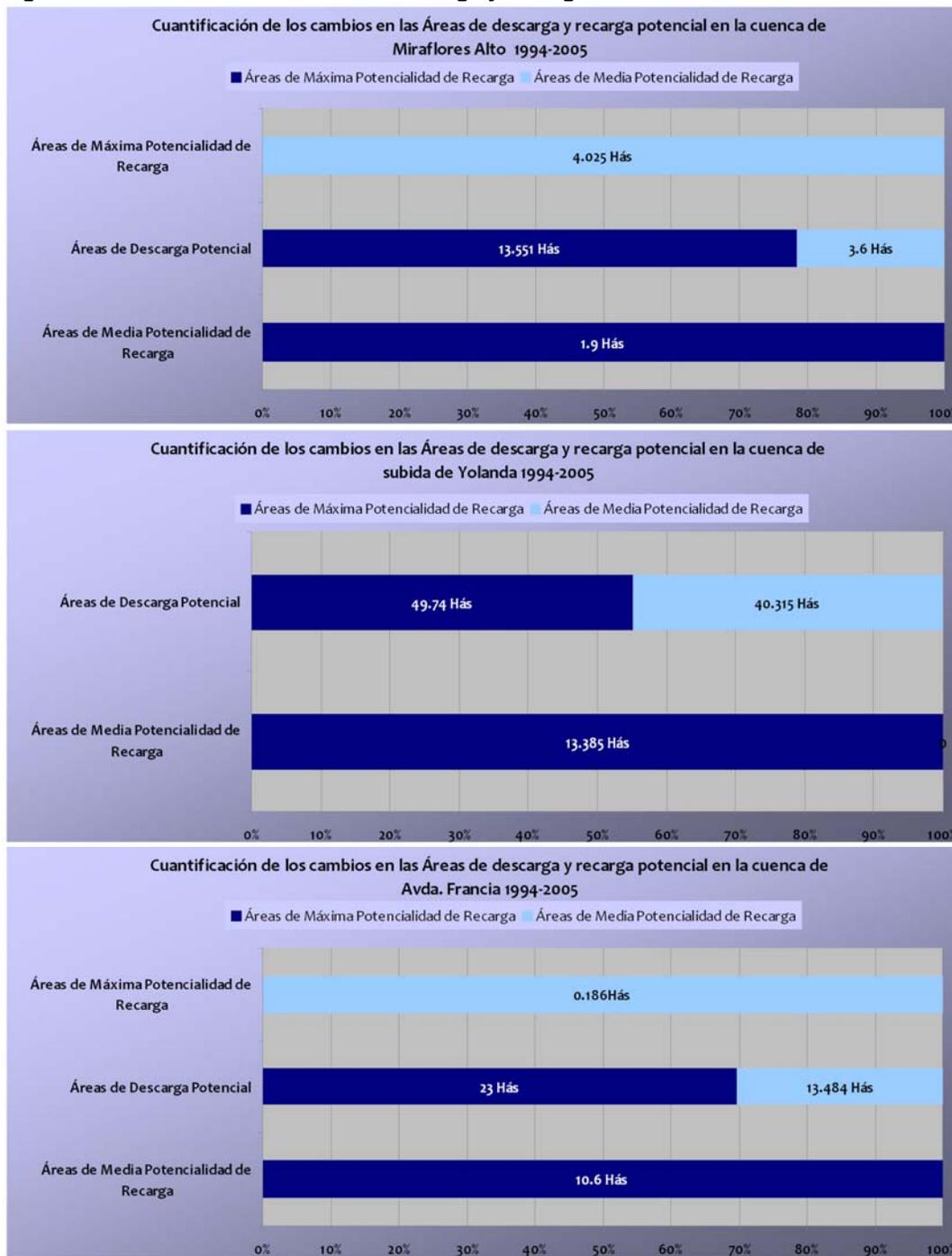
En el caso de la subida de Yolanda, el avance de las áreas de media potencialidad corresponde a 18 hás que se localizan en los sectores de Cerro Barón y de Cerro Placeres, cercano a la Plaza de la Conquista (Figura 50) y se deben al avance de los suelos desnudos por sobre áreas verdes.

Respecto de Avda. Francia, las zonas de media potencialidad tienen una superficie de crecimiento de 25 hás, correspondientes, como ya se aludió única y exclusivamente al reemplazo de áreas de máxima potencialidad. Estas áreas se localizan en el sector del exutorio, circundando el comienzo de Avda. Francia y en pleno cerro La Cruz y se explican por la extensión de sitios eriazos que avanza por sobre sectores naturales y semi naturales. Es considerable, también, la fragmentación cada vez más notoria de la cabecera de la cuenca, específicamente en El Vergel (Figura 52) donde las zonas de media potencialidad, paulatinamente van ganado terreno a las áreas de mejores condiciones para la recarga de acuíferos.

Punto aparte merece la leve recuperación, en todas las cuencas, de los sectores de máxima potencialidad. Si bien es cierto, en ninguno de los casos alcanza a sobrepasar una hectárea, es un indicio de que algunos de los procesos naturales correspondientes a la hidrología de la cuenca aún siguen funcionando, como lo es el control de la escorrentía y el crecimiento de vegetación más densa.

### 4.3.2 Situación en el período 1994-2005

Figura 50. Cambios de las áreas de descarga y recarga 1980-1994



Fuente: elaboración propia, 2007

En este periodo el progreso de las áreas potenciales de descarga se produce en forma relativamente más equitativa, en todas las cuencas. En Miraflores Alto, 13,5 há de las áreas potenciales de descarga corresponden a las áreas que para el año 1994 tenían características de máxima potencialidad de infiltración (Figuras 50 y 48) localizadas preferentemente en las cercanías de la calle Las Rejas (Figura 51), producto del avance

urbano hacía el sector de Miraflores Bajo. Respecto de los sectores intersticiales de la trama urbana, que para el año 1994 presentaban condiciones favorables para la recarga (áreas verdes) han sido paulatinamente eliminados y reemplazados por usos que favorecen de manera potencial la escorrentía superficial, como lo son las zonas residenciales de alta y baja densidad y en gran medida las redes viales tanto primarias, como secundarias; en esta misma cuenca, el avance de las superficies que favorecen el transporte de aguas por sobre los suelos que presentan en 1994 potencialidades medias para la infiltración ocurre alrededor de la calle Las Rejas preferentemente, tanto para el sector del barrio Miraflores Bajo y de la Avda. Eduardo Frei. Precisamente en el sector de esta red vial primaria, se produce la eliminación de zonas de media potencialidad (esencialmente sectores eriazos), quedando solamente algunas superficies, lo que como muestra la figura 50 provoca una compactación de las zonas de descarga.

La subida de Yolanda tiene un aumento de la superficie potencial de transporte de agua que alcanza aproximadamente las 90 hás (Figura 48) concentrándose en el sector del exutorio, en las inmediaciones de la plaza de la Conquista, extendiéndose por ambos flancos de la cuenca, es decir, por Avda. Matta al norte y Avda. Rodelillo por el sur (Figura 51). En el sector de la Plaza de La Conquista, se presentan cada vez más sectores de impermeabilidades altas, ya que, las áreas verdes que permiten o favorecen la retención de aguas lluvias y por ende la infiltración, ha sido reemplazadas por viviendas o suelos desnudos. El avance de estas zonas se observa cada vez más compacto, fenómeno que levemente se está reproduciendo en la cabecera (Anexo 20), que para el año 2005 posee importantes parches de escurrimiento superficial. El proceso gradual de degradación que experimenta la cuenca, tiene impactos cada vez más pronunciados en las zonas altas de la cuenca, lo que culmina en la situación observada en el año 2005 donde la parte de la cabecera se encuentra fragmentada en las tres categorías de potenciales zonas de recarga y descarga aunque se nota un claro patrón de avance de la peor condición ambiental en términos hídricos.

En Avda. Francia, las 23 hás que pierden las áreas de máxima potencialidad de recarga, debido al aumento de las zonas de descarga, se producen primordialmente en el ala Este de la cuenca (Figura 53), ampliándose por el contorno del Cerro La Cruz hasta El Vergel y por el ala Oeste hasta un poco más abajo del sector de Latorre. Cada vez más el sector cercano al cauce principal se encuentra con mayores grados de urbanización y por ende de áreas que favorecen la escorrentía, lo que sumado a la estrechez de la quebrada en esta zona y a la cercanía con la llanura de inundación generan situaciones de riesgo potencial para las personas. De igual manera las 13 hás que pierden las zonas de potencialidad media de infiltración que son reemplazadas por las zonas de descarga potencial, se insertan en los mismos lugares que anteriormente fueron detallados, lo que aumenta aun más la ocurrencia de situaciones críticas ante eventos naturales como las precipitaciones de tormenta.

Respecto del aumento de las zonas de potencialidad media para la recarga, el avance en Miraflores Alto es de sólo una hectárea, la cual se da como caso singular en las inmediaciones de la Avda. Alberto Hurtado (Figura 51), esto es asumido como la degradación de coberturas naturales producto de la cercanía a centros urbanos o a usos con altos niveles de impermeabilidad.

En el caso de la subida de Yolanda, las 13 hás que pierden la máxima potencialidad de recarga respecto de las de media potencialidad, se localizan primordialmente en la cabecera de la cuenca, ya que aguas abajo con la introducción de viviendas de alta densidad se genera un aumento de los sectores eriazos, producto de la nula

conciencia ambiental que se parece tener, debido a que como se constató en terreno<sup>22</sup> se presentan innumerables basurales ilegales (Anexo 21) en las quebradas ubicadas en las cercanías de la red vial primaria llamada Variante Agua Santa (Figura 52).

La cuenca de Avda. Francia, posee alrededor de 10 hás de crecimiento de sus superficies de media potencialidad de recarga por sobre las de más alta situación de potencial infiltración, esto, ocurre principalmente en la cabecera de la cuenca y se explica por la degradación progresiva que experimenta la cuenca entre 1994 y el 2005 (Figura 53).

Finalmente la recuperación que sufren las zonas de máxima potencialidad de recarga, es mayor en la cuenca de Miraflores Alto (4 hás.) (Figura 51). Considerando que esta cuenca presenta la menor superficie de las tres estudiadas, se podría entender como un significativo progreso ambiental. Sin embargo, si se considera que el crecimiento bruto de estas superficies corresponde a -11,4 hás, el saldo es evidentemente negativo, lo que explica que salvo algunas áreas verdes artificiales en la trama urbana, el incremento de la mejor superficie de infiltración se debe al aumento de la frondosidad de la vegetación cercana al Sporting Club (Figura 51).

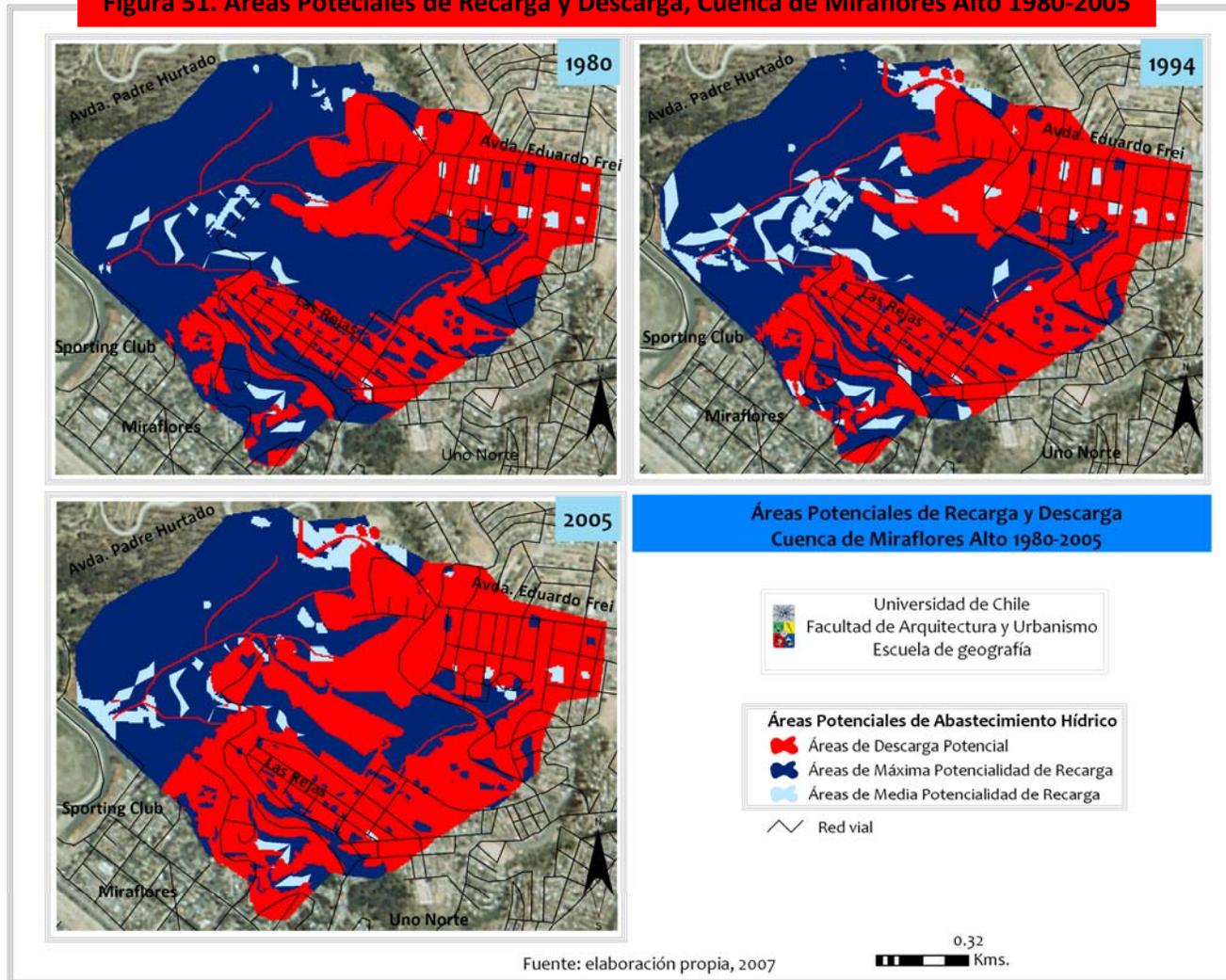
En Avda. Francia, el crecimiento es insignificante (0.1 hás), considerando la superficie total de la cuenca (alrededor de 323 hás) y de las pérdidas totales de estas áreas (32,5 hás) (Figura 50).

En la cuenca de Avda. Yolanda, no existe una superficie considerable respecto del paso de una condición ambiental media a una máxima, en términos de la facilitación de la infiltración profunda.

---

<sup>22</sup> Realizado con la participación del Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio de la Universidad de Chile, en Valparaíso y Viña del Mar en Agosto del año en curso.

**Figura 51. Áreas Potenciales de Recarga y Descarga, Cuenca de Miraflores Alto 1980-2005**



**Figura 52. +Áreas Potenciales de Recarga y Descarga, Cuenca de Yolanda 1980-2005**

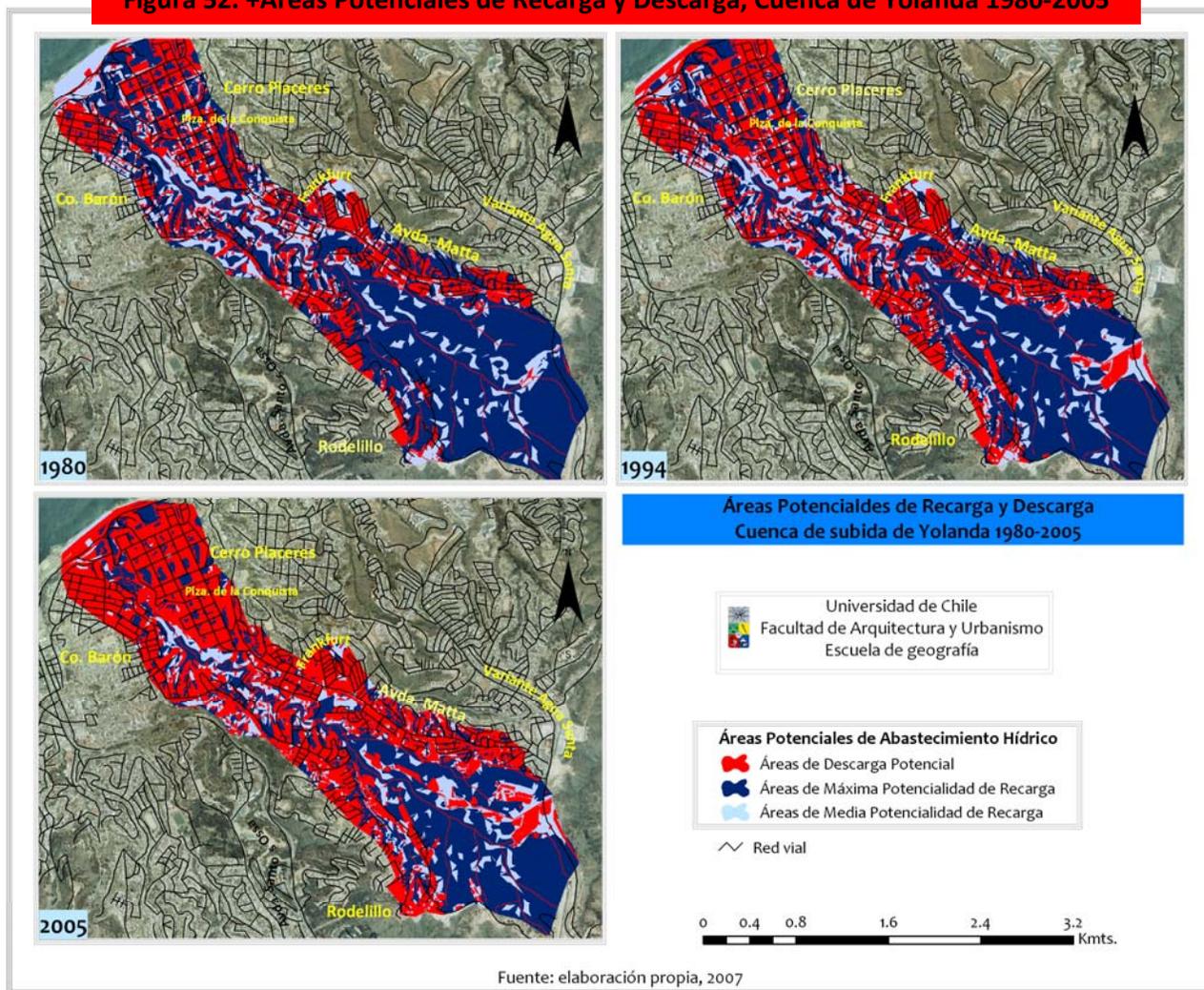
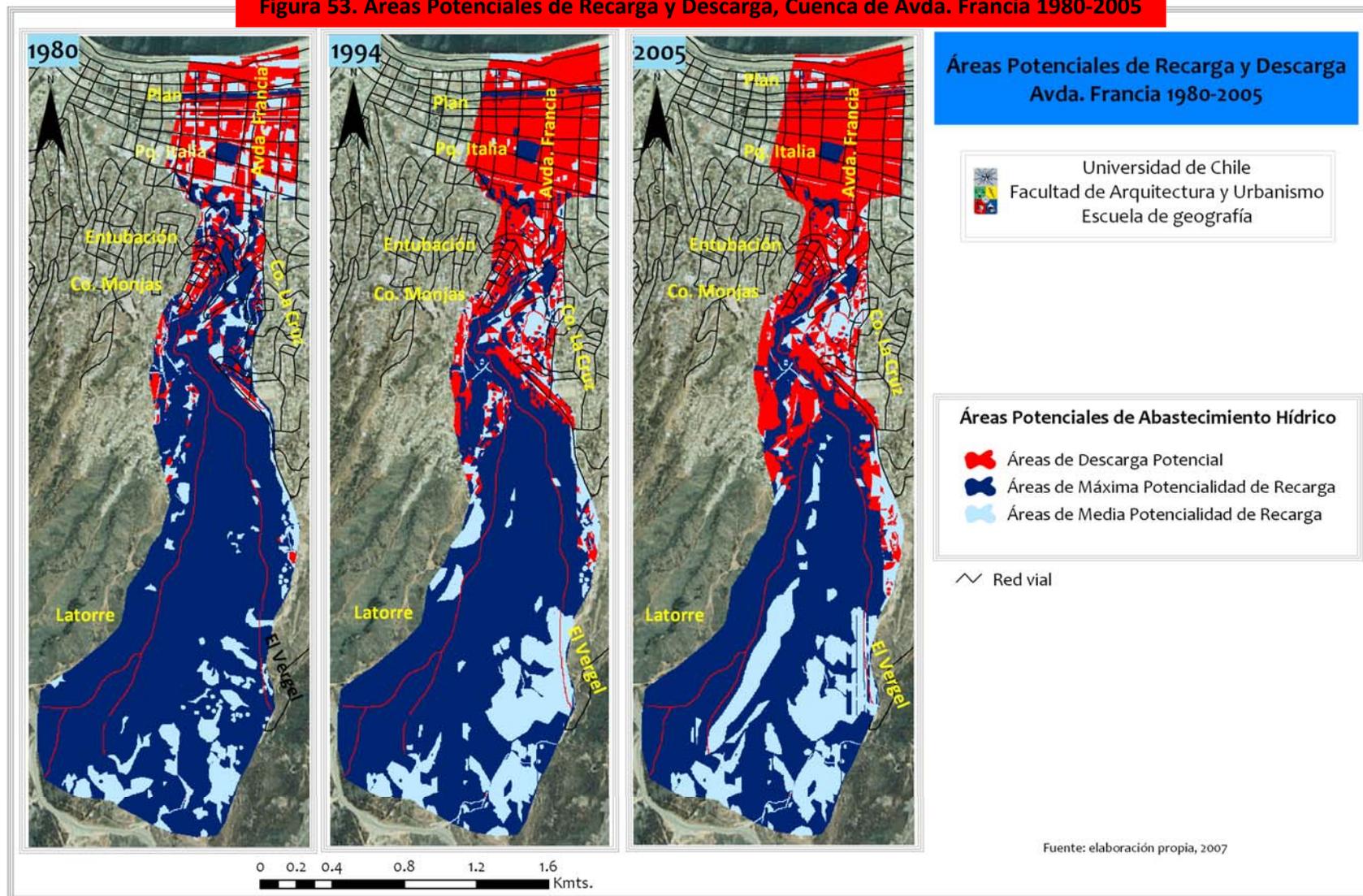


Figura 53. Áreas Potenciales de Recarga y Descarga, Cuenca de Avda. Francia 1980-2005



### 4.3 IMPACTO DEL CRECIMIENTO URBANO SOBRE LA RED DE DRENAJE NATURAL

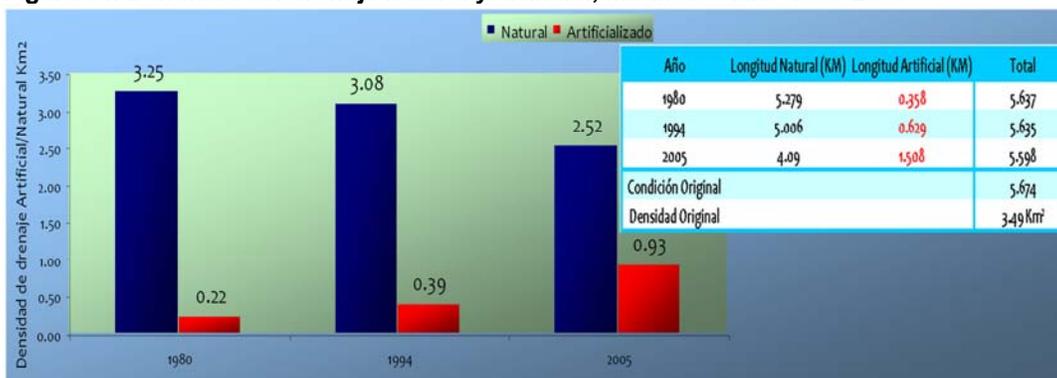
El avance de la urbanización implica una serie de perturbaciones sobre el sistema natural. Uno de ellos es la intervención de los cauces naturales debido a la creciente presión ejercida para emplazar usos residenciales en cualquier sector disponible, aunque no sea apto para este fin.

En el caso de Valparaíso esta situación se ha desarrollado históricamente, urbanizando en sectores de pendientes muy fuertes y muy cercanos a los cauces de las quebradas principales. Las dos cuencas estudiadas que se insertan en Valparaíso (Avda. Francia y subida de Yolanda) no escapan a esta situación general. Por su parte la cuenca ubicada en Viña del Mar, es decir, la de Miraflores Alto, no difiere mucho de las dos anteriores en términos de la intervención de la red hídrica que drena el sistema semi natural.

#### 4.3.1 Evolución de la red de drenaje en la cuenca de Miraflores Alto 1980-2005

Considerando los resultados anteriores, es evidente el aumento de las ATIs y de los Coeficientes de Escorrentía, y consecuentemente, la disminución de la densidad de los drenes naturales, en beneficio del aumento de la densidad de los drenes artificiales (Figura 54).

Figura 54. Densidad del drenaje natural y artificial, Miraflores Alto 1980-2005

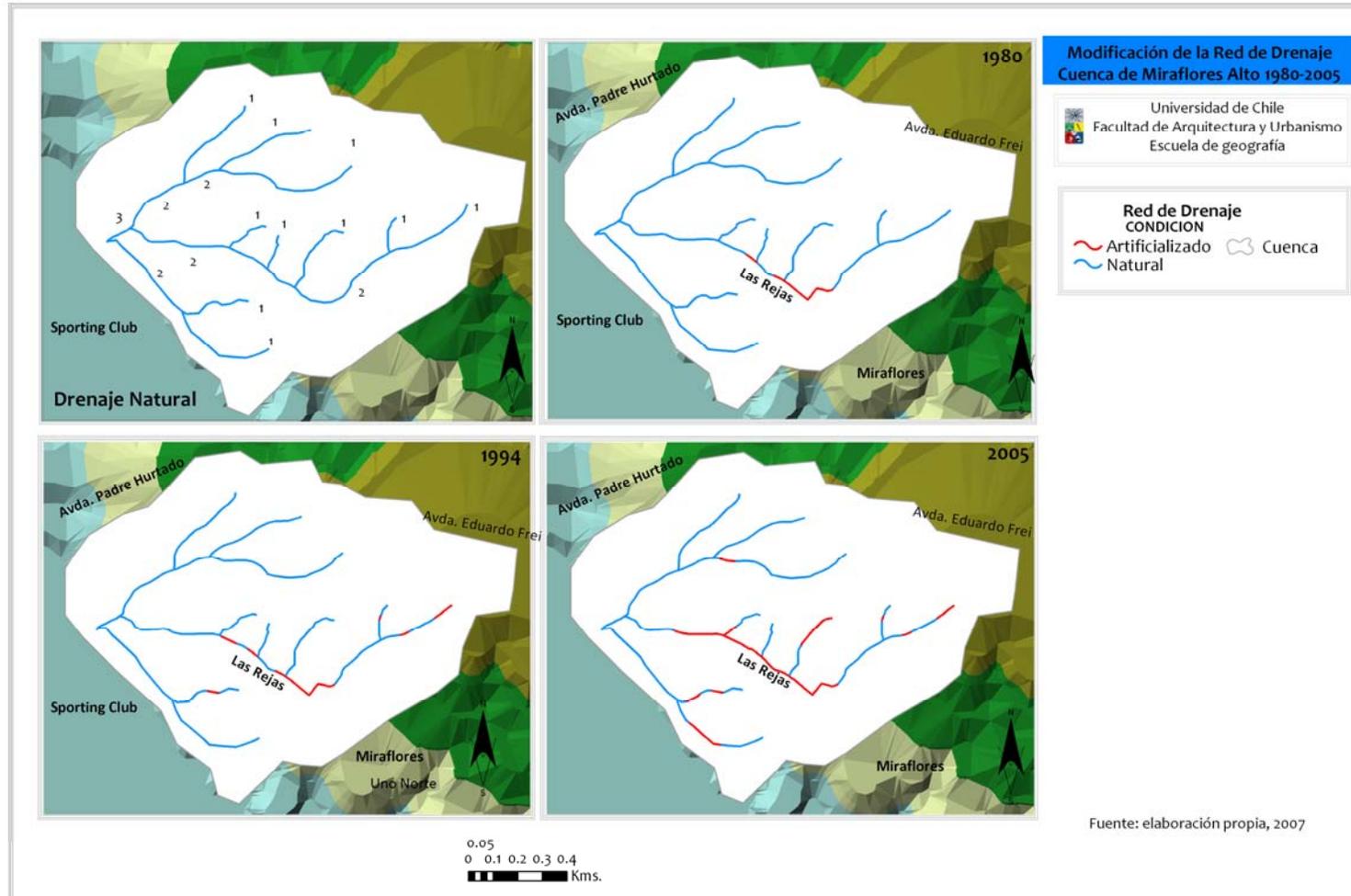


Fuente: elaboración propia, 2007

La red de drenaje de la cuenca de Miraflores Alto en condiciones naturales (Figura 54) presenta una longitud de 5, 674 Km y a su vez consta de una densidad de 3, 49 Km<sup>2</sup> (Kilómetros de la longitud del cauce por kilómetro cuadrado del área de la cuenca). Su forma es angulada y su textura gruesa, presentando la menor densidad de drenaje de las tres cuencas. Esta drenada por una gran cantidad de drenes de primer orden, pasando a segundo orden en las cercanías del exutorio, donde finalmente presenta una jerarquía de tercer orden.

Para el año 1980 la densidad del drenaje natural decae en un 6.9% lo que se desarrolla estrictamente sólo en el sector de la calle Las Rejas (Figura 55). Esto implica una pérdida de la longitud del drenaje de 0.395 Km respecto de la condición original (Figura 54). Si bien es cierto, la red de drenaje que presenta canales artificializados posee una extensión de sólo 0,358 Km, en condiciones de invierno puede resultar insuficiente para controlar las inundaciones.

**Figura 55. Modificación de la Red de Drenaje, Cuenca de Miraflores Alto 1980-2005**



No hay que olvidar que los efectos de la urbanización sobre la cuenca son acumulativos, debiéndose sumar la reducción del drenaje natural, el aumento del drenaje artificial y la situación de aumento general del Coeficiente de Escorrentía en este sector, como se explicó en los párrafos anteriores- Por lo tanto, se pueden esperar resultados negativos en términos naturales y antrópicos, ya que se produce erosión de suelos y por ende inestabilidad en las laderas que circundan estos sectores urbanos. Otro elemento a considerar, en el caso de un análisis más detallado, es que estas intervenciones artificiales de las redes de drenaje, implican barreras tanto verticales como horizontales, que impiden la escorrentía natural del agua, generando potenciales situaciones de anegamientos e inundaciones y/o impidiendo la infiltración que modera los episodios de precipitaciones.

En 1994 la situación se vuelve más marcada y la longitud del drenaje artificial aumenta en un 75% respecto de 1980, es decir, casi se duplica. Esto implica que la densidad del drenaje artificial pase de 0.22 Km<sup>2</sup> en 1980 a 0.39 Km<sup>2</sup> en 1994.

Por otro lado, la red de drenaje natural pierde sólo doscientos metros de longitud, lo que es identificado claramente en el sector de Las Rejas (Figura 55). El cauce total no disminuye más que algunos metros, por lo que es importante el aumento de la densidad de la red de drenaje artificial. La disminución de la densidad de drenaje natural corresponde solo al 5% y salvo el sector de La Rejas no presenta un patrón claro de distribución espacial.

Se encuentran otros sectores de la red de drenaje natural en condiciones artificializadas, pero por su disposición espacial fragmentada corresponden más bien a barreras o impedimentos para tanto la infiltración como para una escorrentía adecuada. Estos espacios se ubican agua abajo de la Avda. Eduardo Frei y en un dren de primer orden sobre el Sporting Club (Figura 55).

Para el año 2005 se observa el mayor aumento de la superficie de drenes artificializados (1,508 Km), lo que está directamente relacionado con el mayor porcentaje de urbanización y con el periodo en que se presentan las tasas de aumento de ATIs y coeficientes de escorrentía de mayor envergadura.

Se aprecia que la densidad de drenajes artificializados aumenta drásticamente en un 138.46%, es decir a un poco más del doble. Este fenómeno queda claramente descrito en la figura 55, ya que el sector de Las Rejas se encuentra completamente artificializado en la medida que el dren de segundo orden, está completamente entubado (Anexo 22).

Se observa una intensificación de las barreras, y se puede hablar de un patrón fragmentado, donde los drenes intervenidos son todos del primer orden, lo que evidentemente pone en riesgo a la población, generando, como ya se ha mencionado, potenciales zonas de inundaciones, anegamientos e incluso deslizamientos.

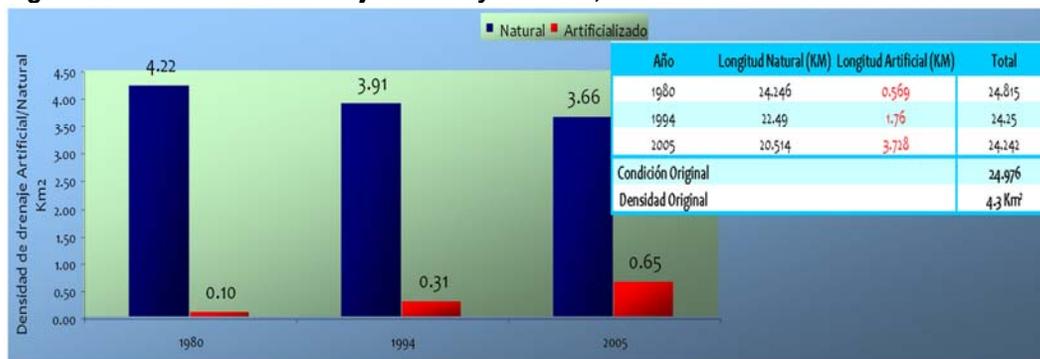
Es importante constatar que esta red de drenaje se inserta en una cuenca pequeña, lo que permite señalar que ante eventos de tormenta la respuesta será proporcional a su tamaño, y que además la artificialización de la red de drenaje aumenta los riesgos de origen natural. En términos generales, la cuenca experimenta un crecimiento exponencial de la densidad del drenaje artificializado entre 1980 al 2005, aumentando en un 322%, mientras que la red de drenaje natural, disminuye un 22.4%. Este proceso no tiende a detenerse en el tiempo, por lo que se espera que siga aumentando a medida en que pasan los años: Por otro lado es importante constatar

que existen problemas ante situaciones de precipitaciones prolongadas<sup>23</sup>, debido a lo cual calles cercanas al Sporting Club, han presentado problemas a causa de inundaciones en sectores de la entubación del cauce de Miraflores Alto.

#### 4.3.2 Evolución de la red de drenaje en la cuenca de Subida de Yolanda 1980-2005

Se observa un patrón similar al de la cuenca de Miraflores Alto, es decir, se incrementa la densidad de drenaje artificial en contraposición a la disminución del drenaje natural (Figura 56).

**Figura 56. Densidad del drenaje natural y artificial, subida de Yolanda 1980-2005**



Fuente: elaboración propia, 2007

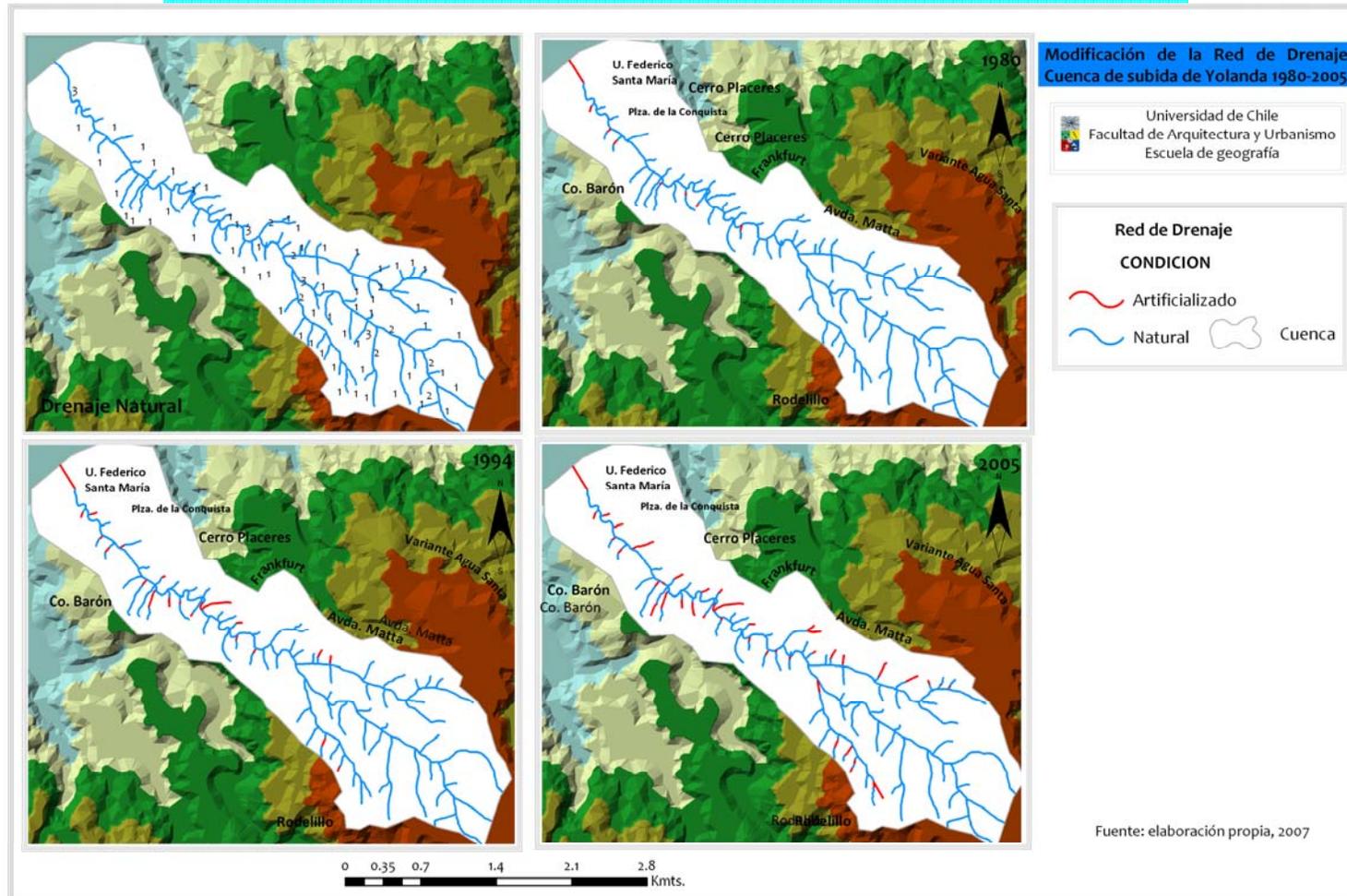
La cuenca de subida de Yolanda posee tres drenes importantes, los cuales se encuentran separados, ubicándose en la sección de la cabecera, en el sector medio de Avda. Matta, Rodelillo y en el sector de Cabritería en el exutorio. Estos confluyen formando el dren de más alta jerarquía (3) a la altura de la calle Frankfurt (Figura 57). En condiciones naturales posee una longitud de 24,976 Km lo que significa una densidad de 4,3 Km<sup>2</sup>. Junto con esto presenta una textura media y una forma pinada, drenada principalmente por drenes de primer orden.

Hacia el año 1980 la longitud del drenaje disminuye en un 2.9%, lo que significa algo más de 700 metros lo que se traduce en una densidad de 4,22 Km<sup>2</sup>. Esto radica principalmente en la entubación del cauce que se produce a la altura de la Universidad Federico Santa María (Figura 57). Los otros lugares donde esta intervenida la red de drenaje son esporádicos y se encuentran en drenes de primer orden, lo que debería haber causado impactos negativos aguas abajo.

La cabecera de la cuenca, en 1980 no presentaba ningún tipo de modificación, lo que implica las condiciones ideales para el escurrimiento. Sin embargo, la cercanía de las zonas urbanas con el cauce sumado al aumento de las ATIs genera potenciales zonas de riesgos.

<sup>23</sup> Sección reclamos, página Web Municipalidad de Valparaíso.

**Figura 57. Modificación de la Red de Drenaje, Cuenca de subida de Yolanda 1980-2005**



Los 0.10 Km<sup>2</sup> de drenaje artificial, no representan una superficie importante en la cuenca, pero como se mencionó anteriormente, a una mayor escala de análisis, puede implicar situaciones problemáticas puntuales para los centros urbanos, relacionado con los coeficientes de escorrentía superiores al 60% que ostentan los usos residenciales.

En el año 1994 la situación cambia de manera clara en un dren de jerarquía 2 al sur de la calle Frankfurt. Los drenes que anteriormente se encontraban levemente intervenidos, ahora se encuentran en condiciones más perturbadas y los fragmentos de artificialización se hacen más masivos hacia el sector de Avda. Matta y de Rodelillo (Figura 57). La densidad de drenaje artificial aumenta en un 210%, lo que indica que se triplicó respecto del año 1980 y respecto de su longitud, aumentan en un kilómetro con doscientos metros.

La longitud total de los drenes tanto naturales como artificiales disminuye en algo más de 600 metros. El drenaje natural por su parte pierde 1.736 Km lo que ya resulta una superficie importante respecto de la longitud total de los drenes de la cuenca (Figura 56).

En este año la cabecera de la cuenca comienza a tener leves indicios de intervención de sus drenes, en el sector de pequeñas quebradas en Rodelillo, lo que significa importantes alteraciones en el desarrollo de el escurrimiento aguas abajo de la cuenca.

El proceso de cambio de los drenes naturales por drenes artificiales parece tomar fuerza en este año, ya que comienzan a aparecer, como se citó anteriormente, nuevos tramos artificializados, que a una escala mayor de análisis pueden significar situaciones peligrosas para los centros urbanos, sobre todo aguas abajo de la cuenca. Sin embargo, en los sectores específicos de artificialización existe un aumento considerable de la escorrentía lo que produce socavones en las quebradas que provocan presiones extras sobre las laderas, generando potenciales deslizamientos en masa.

Respecto del año 2005, ocurre el incremento más importante de la red de drenaje artificial, la cual se amplía en 2,02 Km traduciéndose en 0.65 Km<sup>2</sup> de densidad, lo que significa un aumento de un 109%. La reducción del cauce natural corresponde a 1,976 Km. La densidad de la red natural cae de 3,91 a 3,66 Km<sup>2</sup>.

Se observa una sección media de la cuenca (altura de calle Frankfurt) con una mayor intensidad de drenaje artificial donde dos drenes de jerarquía uno se encuentran completamente artificializados lo que implica un abastecimiento irregular e intervenido hacia el dren de mayor jerarquía. Se observan drenes de primer orden ubicados al sur oeste del Cerro Barón y que desembocan en el dren principal, los cuales están, para el 2005 intensamente intervenidos, lo cual implica un desmejoramiento del almacenamiento natural del cauce principal (Figura 57).

La cabecera de la cuenca, se encuentra mayormente afectada, ya que sus drenes se presentan intervenidos en el sector de Avda. Matta y Rodelillo, lo que está ligado con el aumento del Coeficiente de Escorrentía producto del avance de usos impermeables, lo que implica una serie de problemas en los sectores puntuales en donde se ha modificado la red hídrica y se entiende que existen efectos acumulativos tanto a nivel natural como antrópico. La fragmentación de los drenes naturales, para el 2005, se hace mucho más evidente que en los años anteriores, no advirtiéndose ninguna

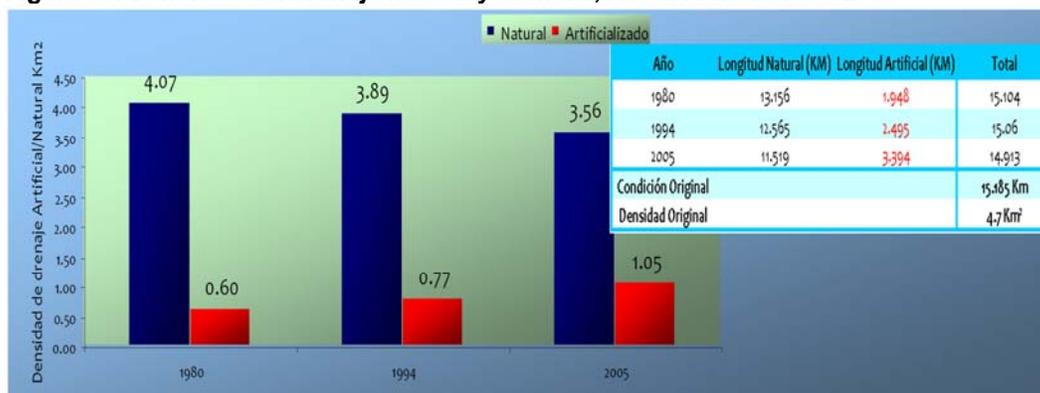
intervención de organismos reguladores, como se advierte en el Plan Regulador de la Ciudad<sup>24</sup>.

Es notable como la red de drenaje artificial va ganando terreno respecto de la red de drenaje natural, lo que finalmente incide en varios ámbitos de la salud ambiental de la cuenca, ya que a medida en que se artificializan los drenes naturales aumenta la contaminación, produce impactos sobre la escorrentía, y por ende sobre la evolución natural de los suelos, lo que indica, como se ha señalado anteriormente, que el impacto de la urbanización sobre la red de drenaje y en general sobre la cuenca da cuenta de efectos acumulativos en todos los sectores.

#### 4.3.3 Evolución de la red de drenaje en la cuenca de Avda. Francia 1980-2005

La tendencia de las dos cuencas anteriores no es distinta en la cuenca de Avda. Francia, ya que se experimenta la pérdida de la densidad del drenaje natural en beneficio del drenaje artificial, intensificándose sobre todo en el último año (Figura 58).

**Figura 58. Densidad del drenaje natural y artificial, Avda. Francia 1980-2005**



Fuente: elaboración propia, 2007

La cuenca en estado original presenta una forma pinada con una mayor densidad de drenaje en la cabecera poseyendo un cauce principal que se define en el sector medio del Cerro La Cruz y que tiene una jerarquía 3. La extensión de la red de drenaje original corresponde a 15,185 Km y presenta una densidad de 4,7 Km<sup>2</sup>. Según la separación y densidad de sus drenes su textura es media.

Para el año 1980 y debido a la entubación de la quebrada de Jaime producida a comienzo del siglo XX se artificializa el exutorio. Esta entubación posee más de setecientos metros, es decir, el 36% de toda la extensión de los drenes artificiales. Se observa que la densidad de estos drenes es de 0.60 (Figura 58), los cuales se concentran claramente en donde se juntan los Cerros La Cruz y Monjas, formando un cajón muy cerrado, lo que está relacionado con la evolución de la urbanización y el avance de las ATIs. Algunos sectores del drenaje natural que nace del Cerro La Cruz se encuentran fragmentados, debido a sitios eriazos que han provocado una degradación constante de los cauces naturales.

En cuanto al drenaje natural se observa que ha perdido un 13.4% de densidad manteniéndose intacta la sección de la cabecera, aguas arriba de la cuenca.

<sup>24</sup> Plan regulador Comunal Vigente para el año 2005.

El que la mayor parte del drenaje artificializado se concentre en la parte más angosta de la quebrada, es preocupante, debido a la gran cantidad de zonas residenciales de alta y baja densidad que se encuentran aquí. Es posible concluir que el sector del plan sufre las consecuencias del aumento del escurrimiento superficial provocado por la alteración de los drenes naturales.

Para el año 1994 los canales hídricos artificializados aumentan en un 28% denotándose una intensificación en el dren que nace en el Cerro La Cruz, el cual se presenta con casi el 80% de impermeabilización. Se encuentran artificializados algunas secciones de los drenes en la sección media, pero esto se da de forma esporádica y puntual, afectado sólo a drenes de la jerarquía inferior (1).

Respecto del drenaje natural este pierde casi seiscientos metros (Figura 58) y su densidad sufre una caída, quedando en  $3.89 \text{ Km}^2$ . Es importante señalar, que aún para este año no se presentan intervenciones notorias en el sector de la cabecera, sin embargo existe un dren de considerable extensión en el Vergel, que posee una pequeña intercepción producida por caminos precarios. Si bien es cierto se trata de una pequeña intervención, el proceso de artificialización es constante y creciente, y la urbanización cada vez se expande más por los flancos de la cuenca, por lo que cabría esperar el aumento de la degradación de la cabecera.

En el año 2005 se observa una extensión del drenaje artificial en la misma zona que los restos de los años de estudio y el dren que nace en el Cerro La Cruz presenta una homogeneización de su superficie artificial, completando prácticamente toda su extensión.

La longitud del drenaje artificial corresponde a un 36% mayor que en el año 1994 lo que significa casi un kilómetro de aumento. La densidad del drenaje es de  $1,05 \text{ Km}^2$  siendo la única de las tres cuencas que supera el kilómetro cuadrado de densidad, lo que es sumamente preocupante si se considera la estrechez del cauce en el sector que más ha sido alterado.

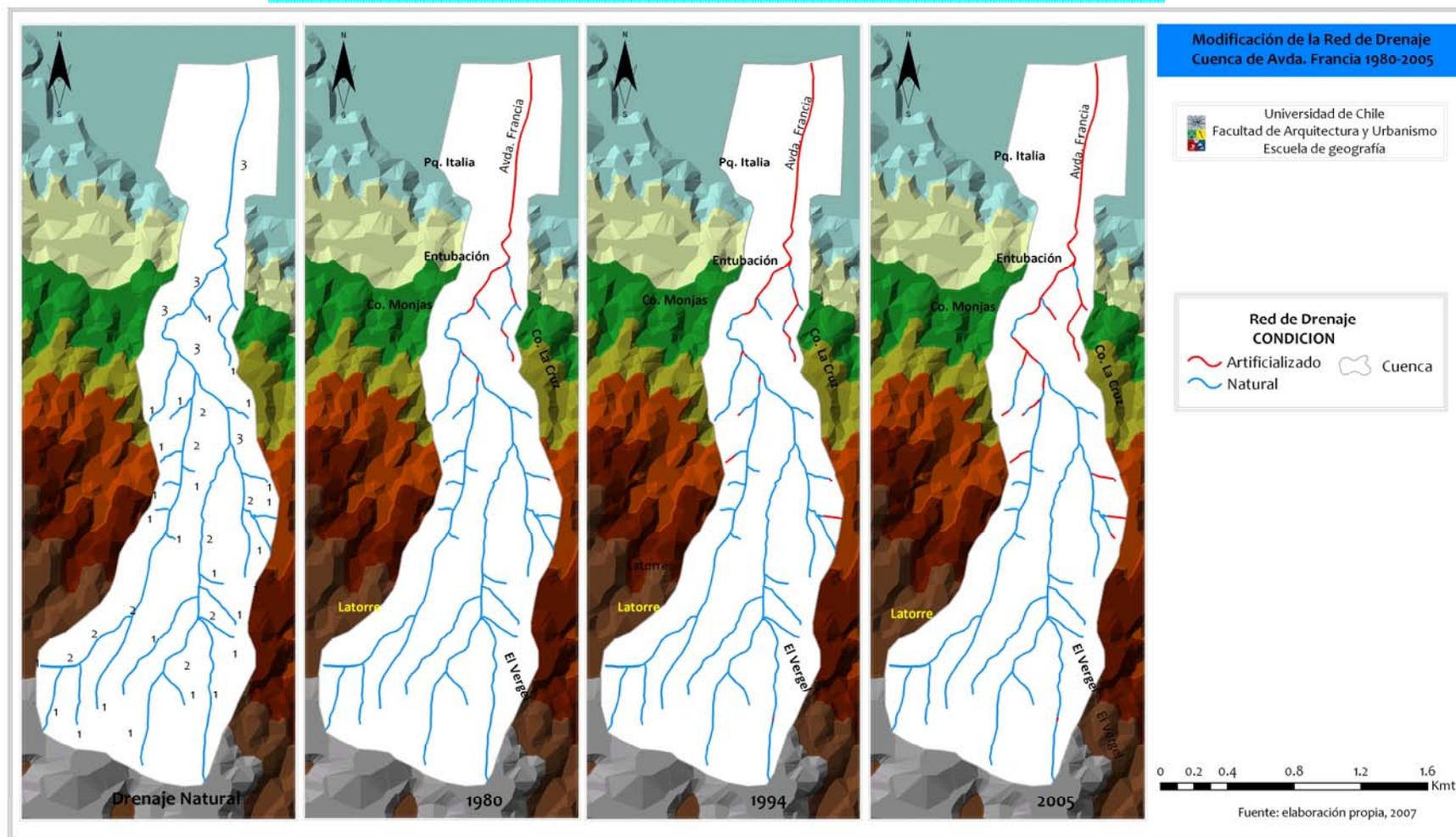
Respecto del drenaje natural, se ve reducido en un kilómetro y su densidad decae en un 8.4% quedando en  $3,46 \text{ Km}^2$  (Figura 58). Se observa su alteración en ambos flancos, Este y Oeste, y una importante pérdida por artificialización se encuentra en las cercanías del Cerro Monjas (Figura 59).

El caso de Avda. Francia resulta importante de destacar, debido a que posee un abovedamiento importante, donde se han producido los más importantes hechos de desastres naturales e incluso pérdida de vidas humanas. Esto debido a que es la zona que se encuentra más impactada por el avance urbano y es la sección más estrecha del cauce, produciéndose situaciones graves de inundaciones y anegamientos producto del colapso del lugar donde comienza este abovedamiento (Anexo 23).

Es importante considerar este asunto, especialmente teniendo en cuenta que el Plan Regulador de Valparaíso para el año 2005 no plantea programas de manejo de cuencas.

Resumiendo se puede apreciar claramente que en todas las cuencas existe un avance notable de la artificialización de la red de drenaje natural, produciéndose con mayor intensidad entre los años 1994 y el 2005.

**Figura 59. Modificación de la Red de Drenaje, Cuenca de Avda. Francia 1980-2005**



## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN FINAL**

### **5.1 DISCUSIÓN FINAL**

Evidentemente el Gran Valparaíso ha experimentado una expansión significativa del espacio urbano, la cual ha causado innegables efectos medio ambientales, como lo postula Romero et al (2006). El aumento de las superficies urbanizadas ha implicado una pérdida importante de coberturas naturales, las cuales ofrecen servicios ambientales importantes para las ciudades y los ecosistemas. Este proceso de urbanización, puede ser observado y analizado a diferentes escalas, desde un nivel regional a uno comunal, siendo necesario señalar que también se deben considerar escalas mayores como lo son las subcuencas e incluso los barrios. Cada escala espacial de análisis resalta los cambios y efectos de determinados atributos ambientales en forma específica.

El avance urbano reciente observado en el Gran Valparaíso, ha tenido un impacto evidente en las cuencas de Miraflores Alto en Viña del Mar y las de subida de Yolanda y Avda. Francia en Valparaíso, que pueden ser consideradas representativas de los cambios acaecidos en la totalidad de los paisajes de quebrada de ambas ciudades, aunque teniendo en cuenta sus tamaños, pendientes y especificidades paisajísticas naturales y sociales.

Estos impactos, como los resultados de esta investigación pudieron constatar afectan gradualmente, según las fases de urbanización, a componentes importantes del sistema hídrico, como lo son la escorrentía y la infiltración de las aguas lluvia. Es así como, a partir de una superficie urbana creciente, se produce un aumento de los coeficientes de escorrentía y una disminución de la capacidad que tiene cada cuenca para permitir la infiltración, generando una pérdida importante de las zonas de recarga de los acuíferos, las que finalmente se transforman en zonas de descarga como lo han planteado ROMERO & VÁSQUEZ (2005).

El predominio creciente de las áreas de descarga por sobre las de recarga en las cuencas del Gran Valparaíso se debe principalmente a la pérdida de coberturas naturales que regulan el escurrimiento superficial como lo son las áreas de vegetación densa e incluso las de vegetación dispersa, las que al ser reemplazadas por usos antrópicos, contribuyen a generar la impermeabilización de suelos, cuyo escurrimiento superficial de las aguas causa estragos aguas debajo de las cuencas, como lo que sucede en Avda. Francia, cada vez que precipita de manera intensa.

Si se considera que el medio ambiente urbano es un mosaico de usos de suelo que cumplen con distintas funciones ambientales, es posible vislumbrar que el comportamiento hídrico al interior de cuencas urbanizadas se torna complejo, ya que, cada uno de ellos presenta diferentes tipos de respuestas ante eventos como las precipitaciones y el escurrimiento superficial (PAUL & MEYER, 2001).

En otros lugares donde se han desarrollado estudios de este tipo, como por ejemplo en Canadá, se han considerado usos de suelo residenciales con características muy diferentes, en cuanto a la densidad de construcción, para calcular las escorrentías, en comparación con Valparaíso. Por ejemplo, las densidades de las zonas residenciales de baja densidad, corresponden a las que en Chile y en este estudio se definen como de alta densidad, de lo que resultan resultados peores en nuestro país en términos comparativos. Así mismo, la tendencia en países desarrollados, como lo plantea NEL\*O (1998), es al aumento de las superficies urbanas correspondientes a sectores residenciales de baja densidad (y de altos ingresos), a diferencia de Chile, donde si

bien crecen las áreas residenciales de baja y alta densidad, son estas últimas las que lo hacen en mayor forma, debido a las condiciones socioeconómicas prevalecientes.

La mezcla de usos urbanos de alta y baja densidad, así como la existencia de áreas verdes privadas, sitios comerciales e infraestructuras viales, contribuyen a generar un mosaico de paisajes urbanos muy complejo en términos ambientales al interior de las cuencas urbanizadas de ciudades como Valparaíso y Viña del Mar. Dicha complejidad se expresa finalmente en comportamientos hídricos diferentes.

Por otro lado, en el caso específico de las cuencas de Avda. Francia y de subida de Yolanda, se mezclan usos residenciales de alta y baja densidad, no correspondiendo necesariamente ésta última precisamente a niveles socio económicos elevados, encontrándose distribuidas de manera irregular sobre las laderas de las cuencas. Por lo tanto, dependiendo de la distribución espacial de las áreas residenciales de los diversos sectores socioeconómicos al interior de las cuencas urbanizadas, serán los costos y efectos ambientales adversos que deben enfrentar quienes viven en los sectores inferiores de los mismos. En este sentido, es posible señalar la necesidad de considerar la Justicia Ambiental como una fuente de instrumentos de compensación entre quienes producen las inundaciones y otros desastres naturales en los sectores elevados de las cuencas y quienes sufren sus efectos devastadores por estar localizados aguas abajo. De igual manera es evidente que la protección de laderas y de los cauces fluviales de las cabeceras y sectores altos de las cuencas deben formar parte, tanto de planes integrados de manejo de cuencas, como de mecanismos específicos de pago por servicios ambientales, tal como sucede en países que han avanzado en la solución de estos conflictos.

Los instrumentos mencionados anteriormente asumen una creciente importancia en la medida que se acentúa la instalación de condominios vallados y edificios de altura en los cerros de Valparaíso y Viña del Mar. Hasta ahora la discusión respecto a su construcción ha girado casi exclusivamente en términos estéticos y panorámicos. Si bien ambos argumentos son importantes tratándose de la conservación de las vistas espectaculares que ofrece el anfiteatro porteño, no es menos cierto que es necesario identificar los efectos de estas acciones sobre las condiciones ambientales locales, tales como los climas urbanos (especialmente temperaturas, ventilación y calidad del aire) y particularmente sobre la impermeabilización de las cuencas y sus efectos sobre la escorrentía superficial de las aguas lluvias.

Recientes investigaciones practicadas ante las graves consecuencias de las inundaciones sobre la ciudad de Concepción han demostrado que la responsabilidad debe ser a lo menos compartida entre episodios anómalamente altos de lluvias y los cambios en las tasas de impermeabilización y reducción de humedales que han caracterizado un proceso de urbanización muy desaprensivo respecto a sus consecuencias ambientales. Ello constituye un llamado a incorporar la Evaluación Ambiental Estratégica, el Ordenamiento Territorial y la Planificación Ambiental de las Ciudades, junto con el Ecurbanismo, como conceptos e instrumentos que permitan prever los efectos ambientales adversos provocados por una descuidada urbanización de ecosistemas frágiles y dinámicos.

Para incorporar debidamente los conceptos de la urbanización de cuencas en los planes de gestión territorial de las ciudades chilenas, muchos autores han trabajado con coeficientes de escorrentía teóricos según trabajos realizados en realidades distintas, donde pueden existir diferencias como por ejemplo respecto a las clasificaciones de alta y baja densidad. Los resultados parecen ser más adecuados adaptando las metodologías a las realidades del contexto del estudio. En este sentido HENRIQUEZ, 2005, plantea una adaptación de los usos de suelo a partir del método

de la SCS y de su aplicación a la realidad específica de Chillán y Los Ángeles, método que permite un mejor entendimiento de la variación del coeficiente de escorrentía en ciudades intermedias como las señaladas. Es así como la adaptación de los usos de suelo a las realidades de cada investigación resulta ser un factor preponderante a la hora de resultados más efectivos. En este trabajo se agregó el factor pendiente a la ecuación de cálculo del Coeficiente de Escorrentía, factor que en trabajos como los de AYALA & CABRERA (1996) es considerado sólo hasta pendientes de 7°, lo que escapa totalmente a la realidad de las cuencas que fueron analizadas en el presente trabajo. Generalmente se consideran en estos estudios, ciudades que no presentan pendientes importantes, factor que constituye un elemento determinante cuando se presentan fenómenos de tormentas, ya que, potencia el deslizamiento superficial provocando deslizamientos de terreno, inundaciones o anegamientos.

En este estudio se ha comprobado lo planteado por autores como ZANDBERGEN (2000) respecto de que al aumentar las superficies impermeables, aumentan los coeficientes de escorrentía, y específicamente lo que plantea ARNOLD & GIBBONS (1996) que explican que a medida en que avanza la superficie impermeable se degradan componentes del ciclo hidrológico, lo que concuerda totalmente con este estudio. Ellos plantean que al presentarse, por ejemplo, entre un 35 y un 50% de impermeabilización, debería existir un 30% de escorrentía superficial, que es precisamente lo que sucede en las cuencas estudiadas.

Luego, también este estudio ha comprobado lo planteado por ROMERO & VÁSQUEZ, (2005), respecto de los cambios de las zonas de recarga y descarga. Las áreas de recarga tienden en gran medida a transformarse en zonas de recarga, lo que produce múltiples efectos en términos de la distribución de las aguas en las cuencas.

Es preciso señalar, que la escala de análisis es importante, debido a que la mayoría de los trabajos que identifican zonas de descarga y recarga como los de DELGADO & ANGELES (2004) lo hacen en cuencas de tamaño regional. Sin embargo, autores como TÖTH (1963) han estudiado cuencas pequeñas, similares a las de este análisis. Para el caso de meso o macro cuencas, las zonas de recarga se ubican en la parte de la cabecera de la cuenca y la sección media y baja favorecen el transporte. En el caso de las cuencas pequeñas o micro cuencas esto puede variar, debido a que las zonas de recarga se presentan en toda la cuenca y prevalecen las características del suelo y la infiltración como factores explicativos, antes que la altitud, por ejemplo. La distribución de las precipitaciones en cuencas pequeñas parece ser más homogénea que en las cuencas regionales, donde se nota marcadamente la diferencia entre las precipitaciones en la cabecera, en la sección media y en el exutorio.

Por otro lado, el proceso de urbanización trae consigo implicancias sobre la red de drenaje que indican una simplificación de éstas, lo que produce un aumento de los sedimentos, como lo indican ROMERO & VÁSQUEZ (op.cit). En esta investigación se pudo constatar que las redes de drenaje, efectivamente se simplifican (en términos de su forma) ya que, las formas curvas van siendo reemplazadas por formas rectas, lo que a su vez genera impactos negativos en los lugares puntales donde se intervienen los drenes, como es el caso de Avda. Francia, donde el exutorio es un lugar muy dinámico en el cual se han producido nefastos acontecimientos para el ser humano.

Según los Coeficientes de Escorrentía, HENRIQUEZ (op.cit) plantea que el aumento de la biomasa permite un control sobre su crecimiento desmesurado. La generación de áreas verdes y la recuperación de las zonas que se encuentran degradadas (pero aún no urbanizadas con usos residenciales o de alta impermeabilidad) permitirían mitigar los efectos de las precipitaciones intensas sobre las cuencas.

Respecto de lo anterior, hay que tomar en cuenta que la impermeabilización provoca efectos irreversibles en los sistemas naturales, como lo plantea ROMERO, et al 2006, indicando que las otras metrópolis de Chile (Santiago y Concepción) sufren fenómenos similares a los de Valparaíso. Es por ello que hay que tomar en cuenta estudios como los mencionados anteriormente, y proponer ideas para generar con urgencia instrumentos que permitan la conservación de los espacios naturales, y crear espacios antrópicos donde convivan de manera armoniosa usos de suelo de media densidad con usos de gran permeabilidad y biomasa, lo que permitiría el control del CE, de la temperatura ambiental y de la contaminación. Esto sin duda inhibiría el impacto ambiental provocado en la cuenca producto de la urbanización.

Resulta importante resaltar que la urbanización por sí sola no implica necesariamente grandes porcentajes de impermeabilización y que altos porcentajes de urbanización no implican coeficientes de escorrentía mayores, como lo postula ROMERO et al (2003a). Si se urbanizan zonas residenciales de muy baja densidad, donde las áreas verdes se presentan mayoritariamente, generando además parques y plazas, el impacto sobre el escurrimiento superficial es mucho menor en comparación a una urbanización de alta densidad, donde las vías de transporte, los techos y la proximidad de una casa con la otra, provocan un mayor escurrimiento superficial. Lo que se relaciona principalmente con el CE es el aumento de las áreas impermeables, cuyas tasas más altas son características de usos urbanos como el comercial, residencial de alta densidad y sectores industriales.

## 5.2 CONCLUSIONES

Es posible concluir, en términos generales, que todas las cuencas se encuentran evidentemente alteradas respecto a su estado natural, desde el punto de vista medio ambiental, lo que implica una pérdida general de los servicios ambientales ligados al ciclo hidrológico, como lo son la infiltración y la escorrentía. Este impacto negativo se intensifica en todos los casos y para todas las cuencas en el periodo comprendido entre 1994 y el 2005, lo que se debe al aumento intenso, en este lapso de tiempo, de las áreas totales impermeabilizadas producto de la urbanización, sobre todo de usos residenciales de alta y baja densidad, lo que impacta de manera acumulativa todos los ámbitos de la cuenca.

Respecto de los usos y coberturas de suelo, es evidente, que existe un avance acelerado y sostenido de los usos de suelo más impermeables por sobre coberturas naturales y por usos que en condiciones originales presentaban un mayor grado de permeabilidad. Esto facilita y fomenta el aumento de las ATIs, de la escorrentía superficial y de la modificación de la red hidrográfica en todas las cuencas estudiadas. También se concluye que la cuenca de Miraflores al presentarse con una situación inicial de urbanización y de impermeabilización más importante que el resto de las cuencas, exhibe un avance de los usos urbanos por sobre superficies naturales y suelos desnudos; también es importante mencionar que en las demás cuencas el se debe sobretodo a una densificación de los usos de suelo residenciales de baja densidad. Es decir, su estado final para el año 2005 es de zonas residenciales de alta densidad y por ende de tasas de impermeabilización mayores.

La densificación de los usos de suelo urbano se produce a través de la totalidad de las cuencas en Avda. Francia y subida de Yolanda, a diferencia de la cuenca de Miraflores, donde el avance se produce por los sectores de pendientes más suaves y especialmente en la cabecera.

Respecto de las Áreas Totales Impermeables, su avance es constante y no tiene signos de decrecer. Las ATIs están completamente ligadas al deterioro ambiental de las cuencas y de su aumento derivan los estados de salud de éstas, que en todos los casos cambia negativamente respecto del período anterior.

Las ATIs son la principal causa de los aumentos del escurrimiento superficial y de la modificación de los drenes naturales. El aumento del porcentaje de ATIs en las cuencas produce el incremento de los coeficientes de escorrentía y de la longitud de los drenajes artificiales, junto con la disminución de la red de drenaje total.

El avance de las superficies impermeabilizadas de las cuencas de Yolanda y Avenida Francia se desarrolla a través de sus quebradas llegando finalmente a la cabecera de la cuenca, de forma muy avanzada en la primera y de manera menos importante en Avda. Francia, aunque es posible estimar su aumento hacia las partes altas de la quebrada del cauce de la Quebrada de Jaime. En el caso de la cuenca de Miraflores Alto, su cabecera ya se encuentra urbanizada en 1980, por lo que el avance consiste en la acreción de nuevas áreas urbanas a las superficies existentes en dicho año, aumentando en ligeros fragmentos hacia el sector del bosque (áreas verdes remanentes densas).

Respecto a las tasas de incremento de las ATIs por cuenca, en Avda. Francia y en la subida de Yolanda se presenta un aumento del 100% entre 1980 y 2005; en la cuenca de Miraflores Alto el incremento es menor debido a que desde 1980 se presentaba una superficie importante de áreas impermeabilizadas. Finalmente su crecimiento total corresponde al 49%.

Los Coeficientes de Escorrentía siguen el mismo patrón de crecimiento de las ATIs, es decir, aumentan constantemente a través de todos los años del análisis. La situación más alta de aumento del Coeficiente de Escorrentía la experimenta la subida de Yolanda, alcanzando un incremento total de un 65% entre 1980 y el 2005; le sigue Avda. Francia con un 53% y finalmente la cuenca de Miraflores Alto. que presenta un 36% de crecimiento de la tasa de escurrimiento. Si bien es cierto, en términos absolutos, tanto Avda. Francia, como la cuenca de Miraflores Alto tienen un incremento de 0.09 puntos, los coeficientes más bajos de la primera el año de inicio del estudio, , indican que ha sido mayormente modificado este coeficiente.

Respecto a la participación de cada cobertura y uso del suelo en el aumento del Coeficiente de Escorrentía en las tres cuencas, se puede concluir que para el caso de Miraflores Alto los usos que intervienen de mayor forma son el residencial de alta densidad entre 1980 y 1994 y el mismo uso, además del residencial de baja densidad, para 1994 y el 2005; en la cuenca de la subida de Yolanda entre 1980 y 1994 los usos que tienen una mayor responsabilidad en el incremento de la escorrentía superficial son el uso residencial de baja densidad y el uso comercial y entre 1994 y el 2005 ocurre una situación más heterogénea, aunque dominan los usos residenciales y el uso comercial; finalmente para el caso de la Avda. Francia el uso residencial de alta densidad y la red vial primaria participan mayoritariamente en el aumento de los flujos superficiales entre 1980 y 1994 y entre 1994 y el 2005 el uso residencial de alta densidad explica en gran medida el aumento del coeficiente de escurrimiento. En definitiva, se concluye que los usos residenciales de alta y baja densidad, además del uso comercial son los que más afectan el cambio experimentado por las tasas de escurrimiento superficial entre 1980 y el 2005.

Respecto de la urbanización en áreas de pendientes inclinadas y su relación con el Coeficiente de Escorrentía, se establece que, a mayor gradiente se experimenta un mayor coeficiente de escorrentía y por lo tanto todas las cuencas, en la medida en que impermeabilicen más las quebradas y los sectores con mayores pendientes incrementarán en mayor medida su escurrimiento superficial.

Todas las cuencas experimentan similares tendencias en los aumentos de las tasas de escorrentía, siendo 2005 el año en que más se intensifica este crecimiento.. El aumento es sostenido y puede ser mayor si se sigue con el mismo patrón de urbanización. Los usos residenciales son los mayormente ocupan sectores con pendientes pronunciadas, destacando el uso residencial de baja densidad.

La vegetación natural actúa como control del Coeficiente de Escorrentía. Mientras más coberturas vegetales existan mayormente se aminora el impacto general del aumento de las tasas de escurrimiento superficial, sin embargo, en todas las cuencas existe un proceso de eliminación sistemática de estas coberturas y no existe un intento por recuperarlas, ya que incluso las áreas verdes artificiales indican una pérdida de superficie entre 1980 y el 2005.

En cuanto a las áreas potenciales de recarga y descarga, en las tres cuencas, la tendencia absoluta es de un aumento de las zonas de descarga potencial y un descenso de las zonas de máxima potencialidad de recarga.

Los casos más graves ocurren en Miraflores Alto y en la subida de Yolanda, donde para el último año de estudio las superficies de descarga superan a las de recarga. Si bien es cierto, en Avda. Francia las superficies potenciales de descarga no superan a las de recarga, la tendencia indica que claramente esto sucederá con el transcurso de los años. De esta manera es posible concluir que las zonas de descarga reemplazan

sistemática y sostenidamente a las zonas de media y máxima potencialidad de recarga, destacando que es sobre las de máxima potencialidad donde se desarrolla la mayor sustitución.

Si bien es cierto, todas las cuencas (a excepción de Yolanda entre 1994 y el 2005) experimentan situaciones de recuperación de las zonas de máxima potencialidad de recarga, esto se debe principalmente a procesos naturales y en mínima medida a la creación de algunas áreas verdes artificiales sobre suelo desnudo.

La red de drenaje se ha visto afectada en todos los años de estudio. Esto se debe principalmente a la degradación general de la cuenca experimentada por el aumento de las áreas totales impermeables. Esta modificación de la red hídrica al igual que el proceso de urbanización, de aumento de las áreas impermeables y de los coeficientes escorrentía, van aumentando con el paso del tiempo y debido a la urbanización.

La densidad del drenaje natural decae en todas las cuencas, y el último año de estudio (2005) se observa una mayor baja en cuanto a su longitud. Ello se ve reflejado en la disminución cada vez más notoria de la longitud de la red de drenaje y es posible definir que, en términos absolutos, la cuenca que se ve más afectada es la de Yolanda, seguida de la de Avda. Francia y luego la de Miraflores Alto. Sin embargo, considerando que son cuencas con dimensiones diferentes, la pérdida ponderada más alta recae en la cuenca de Miraflores Alto con un 27.9%, posteriormente la de Avda. Francia con un 24.2% y finalmente la subida de Yolanda con un 17.9%.

Desde el punto de vista de la densidad del drenaje artificial, este va en aumento constante en todas las cuencas. Sin embargo, la que logra obtener una mayor densidad corresponde a la de Avda. Francia, que es la única que supera el kilómetro cuadrado.

Nuevamente el periodo en donde se experimenta el mayor aumento de las longitudes de drenes artificializados corresponde al comprendido entre 1994 y el 2005, lo que está directamente relacionado con el aumento de las ATIs y de los Coeficiente de Escorrentía.

Por último, se debe considerar que en todas las cuencas los procesos de degradación de los componentes hídricos señalados, van en un notable aumento que se intensifica a lo largo de los años. A partir de ésto, se hace completamente necesario confeccionar herramientas que permitan una mitigación de los efectos negativos que produce sobre las cuencas el proceso de urbanización, sugiriéndose:

1. Planes reguladores y ordenamiento del territorio: se deben agregar a este tipo de herramientas de planificación elementos como el Coeficiente de Escorrentía por usos y coberturas de suelo, con el objetivo de poder generar una relación armoniosa entre la urbanización y la evacuación de las aguas lluvias.
2. Gestión integrada de cuencas hidrográficas: usos del suelo complementarios y articulados, respeto por las áreas naturales y de conservación, no ocupación de lechos fluviales y laderas inclinadas, control de densidades de uso urbano, protección de taludes en caminos, localización de áreas verdes y buffers riparianos.
3. Intervenciones al interior de las cuencas que compensen las diferencias de ATIs y CE: localización estratégica de áreas de recarga e infiltración, control de las áreas de descarga.

4. Planes especiales de gestión de cuencas y cauces, siguiendo ejemplos de Europa (PAULEIT, 2005) y Estados Unidos (ZANDBERGEN, 2000), asegurando la participación de los habitantes locales.

## **BIBLIOGRAFÍA**

AGUILÓ et al, 2000. Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Ministerio del Medio Ambiente, España.

- AGUIRRE, M., TORRES, H., RUIZ, R. 2003: Manual de procedimientos para la delimitación y codificación de cuencas hidrográficas del Perú. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales.
- ALBERTI, M., 1996. Measuring urban sustainability. Environmental Impact Assessment Review, Vol. 16, Nº 4 – 6, pág. 381 – 423.
- ALVAREZ, L. 2001: Origen de los Espacios Públicos en Valparaíso: el discurso higienista y las condiciones ambientales en el siglo XIX. Revista de Urbanismo. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Departamento de Urbanismo.
- ANDERSON, J, HARDY, E, ROACH, J, WITMER, R. 1976. A land user and land cover classification system for using with remote sensor data. Geological survey professional paper 964, United States department of the Interior.
- ARNOLD & GIBBONS, 1996: Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. Elsevier, Journal of the American Planning Association Nº62, pág. 241-258
- AUDEFOY, J, 2003: La problemática de los desastres en el hábitat urbano en América Latina, Boletín del Instituto de la Vivienda, Vol.18, Nº47, Universidad de Chile.
- AYALA & CABRERA (1996) en ROMERO, H., ORDENES, F., APABLAZA V., ROCHA., V., REYES, C., VÁSQUEZ, A. 2003(a): Planificación Ecológica y Gestión Ambiental de Cuencas Urbanas del Piedemonte de Santiago; Gobierno regional de la Región Metropolitana de Santiago. Programa de financiamiento de tesis y estudios de interés regional.
- AZOCAR G., SANHUEZAR. y HENRIQUEZ, C. 2003: Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central. EURE, vol.29, no.87, p.79-82. ISSN 0250-7161
- BARNES K, MORGAN J, ROBEREGE M. 2001: Impervious surfaces and the quality of natural and built environments. Departamento of Geography and Environmental Planning, Towson University.
- BÄHR, J & MERTINS, G. 1993. La ciudad en América Latina. Población y sociedad. Nº1, Pág. 5-14.
- BORSODORF, A. 2000: El desarrollo urbano de Valdivia. Estudio de Caso en una ciudad mediana chilena". *Espacio y Desarrollo*, 12: 45-82.
- CASTRO, C & BRIGNARDELLO, A 1998, Metabolismo y estructuración urbana del Gran Valparaíso: Consideraciones ambientales y alcances territoriales del desarrollo urbano en la zona costera; Revista Geográfica de Chile: "Terra Australis", Nº43, Santiago, Chile
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D. y MAYS, L. 1994: Hidrología Aplicada. Santafe de Bogotá, McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- CIREN CORFO 1996: Estudio Agrológico V Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales, Chile.

- CHUVIECO, E. 2002: Teledetección ambiental. Barcelona, Editorial Ariel, S.A.
- DELGADO, J., ÁNGELES, G. 2004: The rural-urban interface, a territorial approach to the spatial fragmentation of urban sprawl. Universidad Nacional Autónoma de México.
- DEMATTEIS, G. 1998. Suburbanización y periurbanización. Ciudades anglosajonas y ciudades latinas. La ciudad dispersa: Suburbanización y nuevas periferias, F.C Monclús, Centre de Cultura Contemporània de Barcelona.
- DIETZ, M., CLAUSEN, J. 2007: Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision. Elsevier. Journal of Environmental Management. En prensas.
- DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. 2007: Climas de la Quinta Región, [http://www.meteochile.cl/climas/climas\\_quinta\\_region.html](http://www.meteochile.cl/climas/climas_quinta_region.html)
- ENGLISH, W., WILSON, T., PINKERTON, B. 2000: Urbanization impacts aquatic resources. College of Agriculture Forestry and Life Sciences, Cleamson University, Clemson, USA.
- FERRANDO, F. 2003: En torno a los desastres "naturales": Tipología, conceptos y reflexiones. Boletín del Instituto de la Vivienda, Vol.18, N°47, Universidad de Chile.
- FERNÁNDEZ, B. 2003: Drenaje de aguas lluvias urbanas en zonas semiáridas. Revista ARQ, Santiago, Chile.
- FERNANDEZ, R., LUPI, A., PAHR, N. 1999 : Aptitud de las tierras para la implantación de bosques. Provincia de Misiones. EEA MONTECARLO-Centro Regional Misiones, Misiones, Argentina.
- GONZALEZ M, 1994. La fragilidad del medio natural en la expansión urbana de las ciudades de rango medio. Algunos alcances para tres ciudades chilenas: Curicó, Talca y Linares. Revista Geográfica de Chile Terra Australis, N° 39.
- HENRIQUEZ, C. 2005: Modelación, impacto ambiental y sustentabilidad del crecimiento urbano en las ciudades intermedias de Chillán y Los Ángeles. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Centro de Ciencias Ambientales, EULA, Chile.
- HERMELIN, M. 2003: Urbanismo y naturaleza en América Latina: Un matrimonio Indisoluble, Boletín del Instituto de la Vivienda, Vol.18, N°47, Universidad de Chile.
- HIDALGO, R, TRUMPER, R, BORSODORF, A. 2005: El Nuevo dibujo de la ciudad latinoamericana. Transformaciones urbanas y procesos territoriales. Estructuras del nuevo dibujo de la ciudad latinoamericana. Serie GEOLibros.
- HUNDECHA, Y., BÁRDOSSY, A. 2004: Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. Elseviere. Journal of Hydrology. N°291, pág. 281-295.
- INE. Censo de población y vivienda 1992 y 2002
- IZQUIERDO, T., MARQUEZ, A. 2006: Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias). Grupo de Geología, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.

JANOSCHKA M. 2002: El nuevo modelo de la ciudad latinoamericana: Fragmentación y privatización. EURE (Santiago), dic. 2002, vol.28, no.85, p.11-20.

JAQUE, E. 1994: Problemas ambientales en un área de expansión urbana en la cuenca del estero Nongué. Concepción, Chile. Revista Geográfica de Chile Terra Australis, N°39.

MARCHBANKS, S. 2000: The effects of urbanization and population growth on streamflow, GEO 306.

MARIANGEL, W. 1990. Aplicación al pie de monte de la comuna de La Reina, de un parámetro primordial para la expansión urbana: El riesgo Físico. Revista geográfica de Chile Terra Australis, N° 32, págs: 51- 71.

MAY, C. 2001. A Potential New Strategy for Stormwater Management in the Puget Sound Region. [on line] En: Proceedings of the Puget Sound Research 2001. <[http://www.wa.gov/puget\\_sound/Publications/01\\_proceedings/sessions/oral/7d\\_may.pdf](http://www.wa.gov/puget_sound/Publications/01_proceedings/sessions/oral/7d_may.pdf)> [Consulta: 10 Julio 2007].

MAY C, HORNER R, KARR J, MAR B, WELCH, E. 1998: Effects of urbanization on small streams in the Puget sound ecoreion. Watershed protection techniques, University of Washington, Seattle, Washington.

MELESSE, A., SHIH, S.F., 2002: Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. Elsevier, Computers and electronics in agriculture N°37, pág. 173 – 183.

MOLINA, M. 2006: Informe de práctica profesional: Expansión física y cambios en los usos y coberturas del suelo del Área Metropolitana de Santiago entre 1975 y 2004. Proyecto FONDECYT 1050423. Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio, Escuela de Geografía, Universidad de Chile.

MOSCOSO, C. 2006: Informe de práctica profesional: Expansión física y cambios de coberturas y usos de suelo en el área Metropolitana de Valparaíso, V Región, Chile: período 1975-2004. Proyecto FONDECYT 1050423. Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio, Escuela de Geografía, Universidad de Chile.

MUNICIPALIDAD DE VALPARAÍSO, 2005: Plan Regulador Municipal formato digital, vigente para el año 2005.

MUÑOZ, O. Quebrada de Macul, 1990: Un factor de desequilibrio físico en la comuna de la Florida. 1990, Revista geográfica de Chile Terra Australis, N° 32, págs: 103- 134.

NATIONAL LAND COVER DATASET (NLCD). 2003: Classification system of land use and land cover. Geologic Survey. U. S. Ministry of Interior

NEL\*LO O. 1998: Los confines de la ciudad sin confines. Estructura urbana y límites administrativos de la ciudad difusa. La ciudad dispersa: Suburbanización y nuevas periferias, F.C Monclús, Centre de Cultura Contemporània de Barcelona.

ORTIZ, J, CASTRO, CP, ESCOLANO S. 2004: Procesos de reestructuración urbana y niveles de vulnerabilidad a amenazas naturales en una ciudad de tamaño medio: La Serena, Chile. Investigaciones geográficas.

PAUL, M. & MEYER, J. 2001: Streams in the Urban Landscape. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 2001.32:333-65.

PAULEIT, S., ENNOS, R. & GOLDING. 2005: Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change: a study in Merseyside, UK. Elsevier, *Landscape and Urban Planning* N° 71 (2005), pág. 295- 310.

PAULEIT, S., DUHME, F. 2000: Assessing the environmental performances of land cover types for urban planning. *Landscape Urban Planning*, N°22, pág 1-20.

PETERMANN A. 2006: ¿Quién extendió a Santiago? una breve historia del límite urbano, 1953-1994. 2006, marzo. Publicado en: Santiago: dónde estamos y hacia dónde vamos. Galetovic, Alexander.

PICKETT S, BURCH W, FORESMAN T, MORGAN J, ROWNTREE R, 1997. Referencia para el estudio de los ecosistemas humanos en las áreas urbanas. Traducción y síntesis con fines docentes por Hugo Romero, Octubre de 1999.

PICKETT S., CADENASSO M., GROVE J., 2001. Urban Ecological Systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of Metropolitan Areas. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* N° 32, pág. 127–57.

PICKETT S, CADENASSO M, GROVE J, 2003. Resilient cities: meaning, models, and metaphor for integrating the ecological, socio – economic, and planning realms. Elsevier, *Landscape and urban planning* N° 69, pág 369 – 384.

PUJADAS, R & FONT, J. 1998: Ordenación y planificación territorial. Editorial Síntesis, Barcelona, España.

QUINTANILLA V, REYES C, VERA V. 1998: Causas y efectos de los incendios de vegetación por parte de la población en la V Región de Valparaíso, Chile Central. "Terra Australis", N°43, Santiago, Chile

RAULD, R., FERNÁNDEZ, JC. 2002: Deslizamientos en Viña del Mar y Valparaíso: Casos y Causas. Simposio Internacional de Geología Ambiental para Planificación del Uso del territorio. Puerto Varas.

ROMERO H, 2004. Crecimiento espacial de Santiago entre 1989 y 2003 y la pérdida de servicios ambientales. *En* TUPPER, P. *Hacer ciudad*. Santiago: Centro Chileno de Urbanismo, pág. 179-202.

ROMERO H, HENRIQUEZ, C, AZÓCAR, G, VÁSQUEZ, A, NAIRCYLENE, do SOUZA, RIVEROS S, MORÁN A: 2005. Sistemas de información geográfica para el desarrollo sustentable de las ciudades chilenas. Universidad del Bío-Bío, Chile.

ROMERO H., MOLINA M., MOSCOSO C., SMITH P., 2006. Cambios de usos y coberturas de los suelos asociados a la urbanización de las metrópolis chilenas. El aporte de la Geografía en la superación de los desequilibrios territoriales y sociales: XXVII Congreso Nacional y XX Internacional de Geografía. Oct. 17 – 20, Concepción, Chile.

ROMERO, H., ÓRDENES, F., APABLAZA V., ROCHA., V., REYES, C., VÁSQUEZ, A. 2003(a): Planificación Ecológica y Gestión Ambiental de Cuencas Urbanas del Piedemonte de Santiago; Gobierno regional de la Región Metropolitana de Santiago. Programa de financiamiento de tesis y estudios de interés regional.

ROMERO, H., TOLEDO, X., HENRIQUEZ, M., AZÓCAR, G. 2003(b): Análisis y evaluación de la sustentabilidad ambiental de ciudades intermedias: Estudios de los casos en Quillota, Chillán, Los Ángeles y Temuco. Santiago. Proyecto Fondecyt N°1000828.

ROMERO, H. & VÁSQUEZ, A. 2005: Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. REVISTA EURE. Pág 97-117.

RUIZ M. 2005: Evaluación de la situación ambiental de la ciudad de San Juan. Republica Argentina: Consecuencias del crecimiento urbano sobre los componentes ambientales. Tesis para optar al grado de Magister en Geografía. Santiago de Chile, 2005.

SCANLON, B., HEALY, R., COOK, P. 2002: Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal. 10:18-39

SLEAVIN J, CIVCO, L. 2000: Measuring impervious surfaces for non-point source pollution modeling. University of Connecticut, USA.

SMITH, P. 2006: Informe de Práctica Profesional: Análisis espacial de los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la urbanización en el área Metropolitana del Gran Concepción entre 1975 y 2004. Proyecto FONDECYT 1050423. Laboratorio de Medio Ambiente y Territorio, Escuela de Geografía, Universidad de Chile.

SOPHOCLEOUS, M. 2002: Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, Hydrogeology j. 10:52-67.

STANUIKYNAS, T. y Van ABS, D. 2000. Impervious Surface Methodology. A Methodology for Defining and Assessing Impervious Surfaces in the Raritan River Basin. New Jersey Water Supply Authority.

STONE, B. jr. 2004: Paving over paradise: how land use regulations promote residential imperviousness. Elsevier, Landscape and urban planning N° 69, pág 101-113.

TIMMS, D. 1976: El mosaico urbano. Hacia una teoría de la diferenciación residencial. Nuevo urbanismo. Instituto de estudios de Administración Local, Madrid.

TÖTH, J. 1963: A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, Journal of Geophysical.

WAGNER M, ANDERSON P. 2004: Impacts of urbanization on stormwater runoff. United States Environmental Protection Agency (EPA), USA.

WAY, 1978 en AGUILÓ et al, (2000): Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología. Ministerio del Medio Ambiente, España.

WHITFORD, V, ENNOS, R, HANDLEY, J, 2001: City form and natural process-indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and urban planning*. 57, Pág. 91-103.

WOOD R, HANDLEY J, 2001. Landscape dynamics and the management of change. *Landscape Research*, Vol. 26, N° 1 pág. 45 – 54.

ZANDBERGEN P, SCHREIER H, BROWN S, HALL K, BESTBIER R. 2000: Urban watershed management version 2.0. Vancouver: Institute for Resources and Environment, University of British Columbia.

# **ANEXOS**

### 1. Tipologías de usos y coberturas de suelo.

USOS DE SUELO		RECONOCIMIENTO	
URBANO	ÁREAS RECREACIONALES O SIN USO	Área Verde Artificial Zonas de recreación Canchas, club de campo, piscinas, plazas, etc.	Colores verdes y texturas suaves, límites bien definidos
		Suelo Desnudo Espacios vacíos insertos afectados por la trama urbana Sitios serenos, espacios construibles	Color café moteado, textura moteada Límites insertos en la trama urbana
	RESIDENCIAL	Residencial de Alta Densidad Sectores de gran presencia de edificaciones de vivienda Viviendas con separación mínima.	Coloración homogénea, oscura, nula separación entre sus individuos. Formas rectas Límites bien definidos
		Residencial de Baja Densidad Sectores Viviendas con separación notoria.	Coloración variada, textura moteada Separación entre sus individuos Límites poco claros
	COMERCIAL	Comercio Prestamo de Bienes y Servicios Colegios, universidades, Almacenes, Centros Comerciales	Coloración gris o blanca, homogénea Textura suave y límites bien definidos Formas rectas
INDUSTRIAL	Industria Zonas de trabajos y almacenamiento industrial Maquinaria, bodegas, galpones	Colores claros, gris o blancos Límites de bien definidos Textura suave/ Formas rectas	
TRANSPORTE	Red vial Primaria Conexiones principales. Autopistas, carreteras, avenidas	Colores grises o negros, límites bien definidos Formas lineales y gruesas	
	Red vial Secundaria Conexiones de segundo orden Calles y algunas redes urbano rurales	Colores grises o negros, límites bien definidos Formas lineales y delgadas	
SEMINATURAL	VEGETACIÓN	Área Verde Remanente Densa Vegetación natural atrapada en la trama urbana de frondosidad notoria Arbustos, árboles, etc.	Colores verdes u oscuros, formas indefinidas Textura rugosa
		Área Verde Remanente Dispersa Vegetación natural atrapada en la trama urbana de frondosidad disminuida notoriamente. Pastizales, arbustos, etc.	Colores verdes claros o gris claro, textura moteada, límites poco claros
		Espacios Abiertos Espacios sin vegetación, de origen natural.	Áreas de coloraciones café o gris claro Textura moteada, fuera de la trama urbana
NATURAL	HIDROGRAFÍA	Curso de Agua Lugar donde escurre o debería escurrir agua. Quebradas, Canales, etc.	Definido por IGM

Fuente: elaboración propia, 2007

### 2. Ejemplo ponderación de las tasas de Impermeabilidad para el cálculo de las ATIs de las cuencas

Uso de Suelo 2005	hás	%	TI	TIponderado
Área Verde Artificial	2.213	1.36	4.6	6.20
Área Verde Remanente Densa	34.822	21.43	0.7	14.74
Área Verde Remanente Dispersa	27.63	17.00	4.1	69.62
Cauce	2.297	1.41	0.0	0.00
Comercial	3.69	2.27	81.1	184.05
Espacios Abiertos	0.633	0.39	17.1	6.68
Industrial	0.357	0.22	75.8	16.66
Red vial Primaria	6.559	4.04	99.2	400.33
Red vial Secundaria	14.217	8.75	85.6	748.69
Residencial de Alta Densidad	28.43	17.50	89.2	1560.73
Residencial de Baja Densidad	35.262	21.70	66.4	1441.46
Suelo Desnudo	6.392	3.93	19.8	77.83
162.502			<b>ATI cca</b>	<b>45.20</b>

Fuente: elaboración propia, 2007

**3. Tabla adaptada, de los números de curva principales de la SCS**

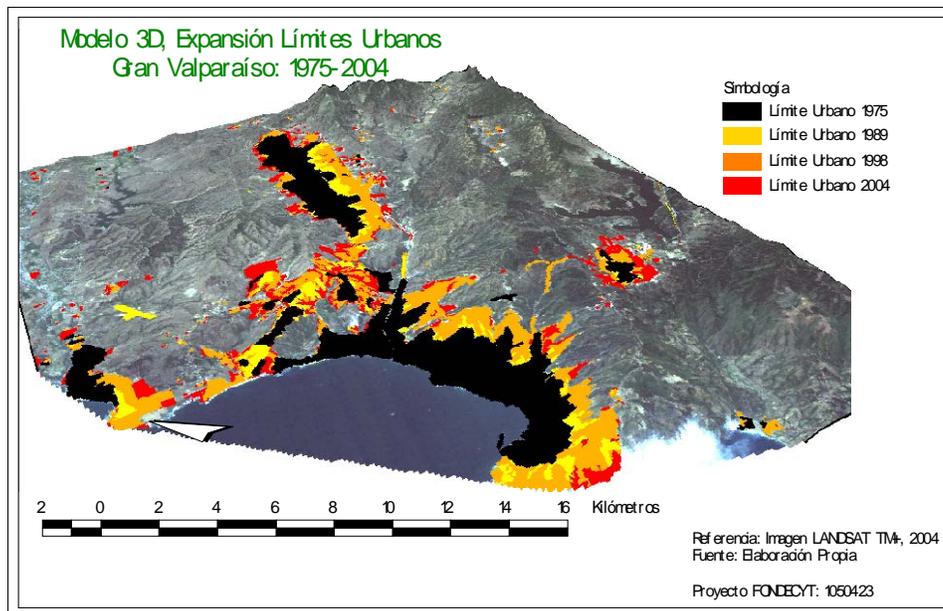
**Números de curva de escorrentía para usos de tierra agrícola, suburbana y urbana (Condiciones antecedentes de Humedad AMC II, Ia= 0,25)**

**Grupo Hidrológico del suelo**

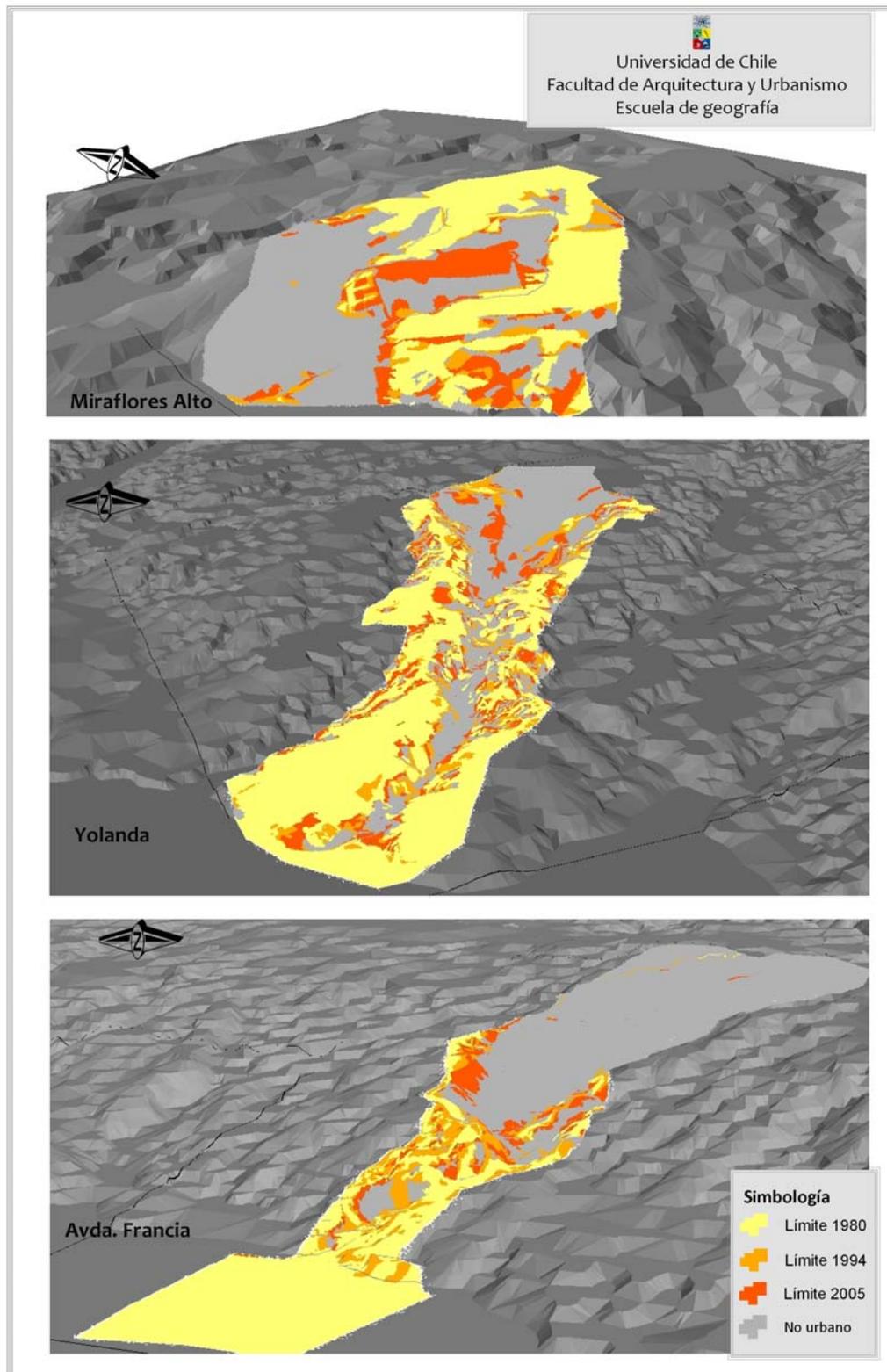
DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA TIERRA	A	B	C	D
Tierra Cultivada				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales				
Condiciones pobres	68	79	86	89
Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de Ríos	30	58	71	78
Bosques				
Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, cementerios, etc				
Óptimas condiciones: 75% de cubierta de pasto	39	61	74	80
Condiciones medias: 50% de permeabilidad	49	69	79	84
Áreas comerciales o de negocios	89	92	94	95
Districtos Industriales	81	88	91	93
Residencial 65% Impermeabilidad	77	85	90	92
Calles y Carreteras	98	98	98	98
Cauce y cuerpos de agua	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia, 2007

**4. Expansión de los límites urbanos del AMV, referencia 3D.**



### 5. Límites urbanos de las tres cuencas, referencias 3D



Fuente: elaboración propia, 2007

**6. Imagen de la urbanización de la quebrada de subida de Yolanda**



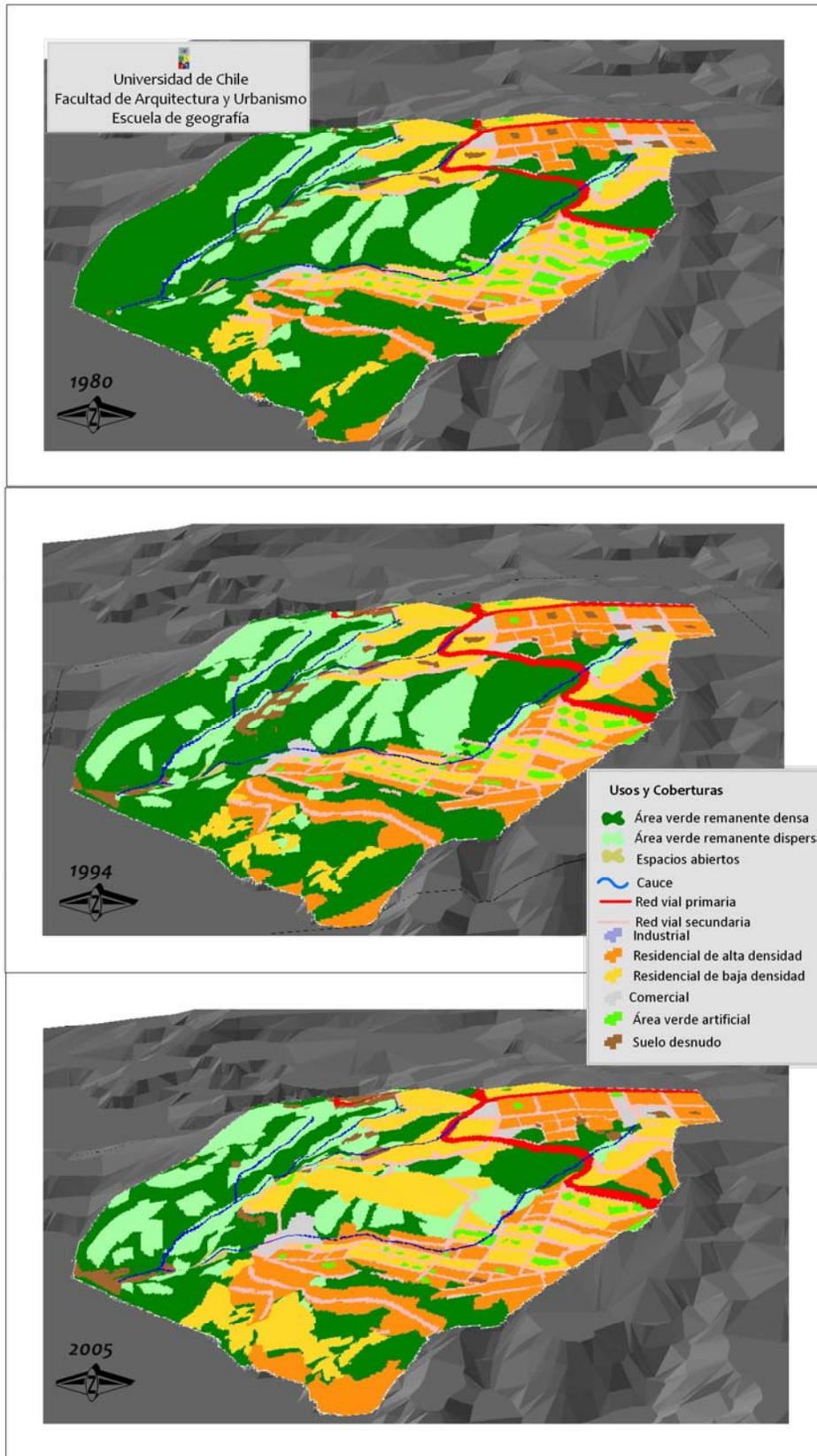
Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

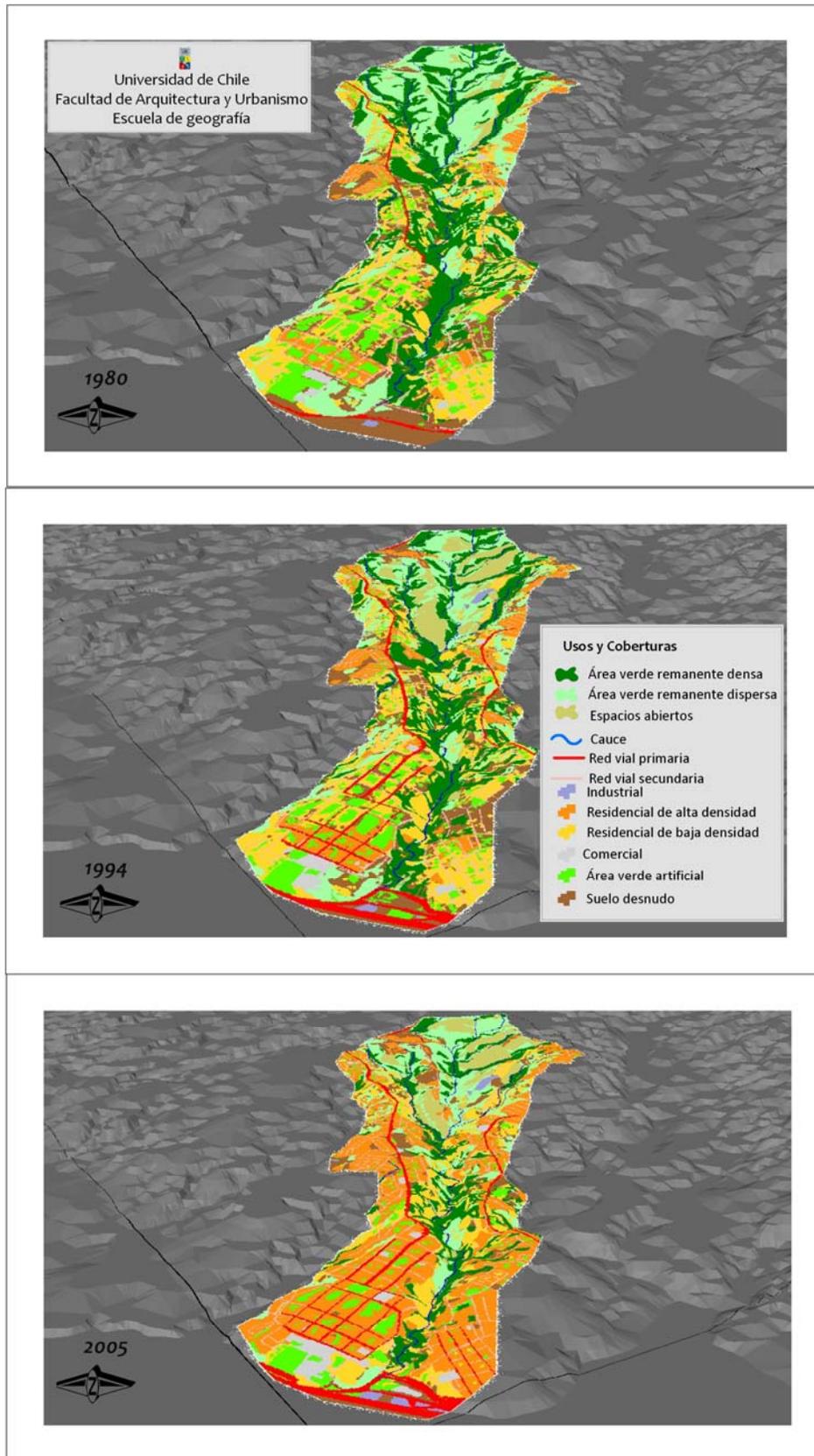
**7. Imagen urbanización quebrada de Jaime**

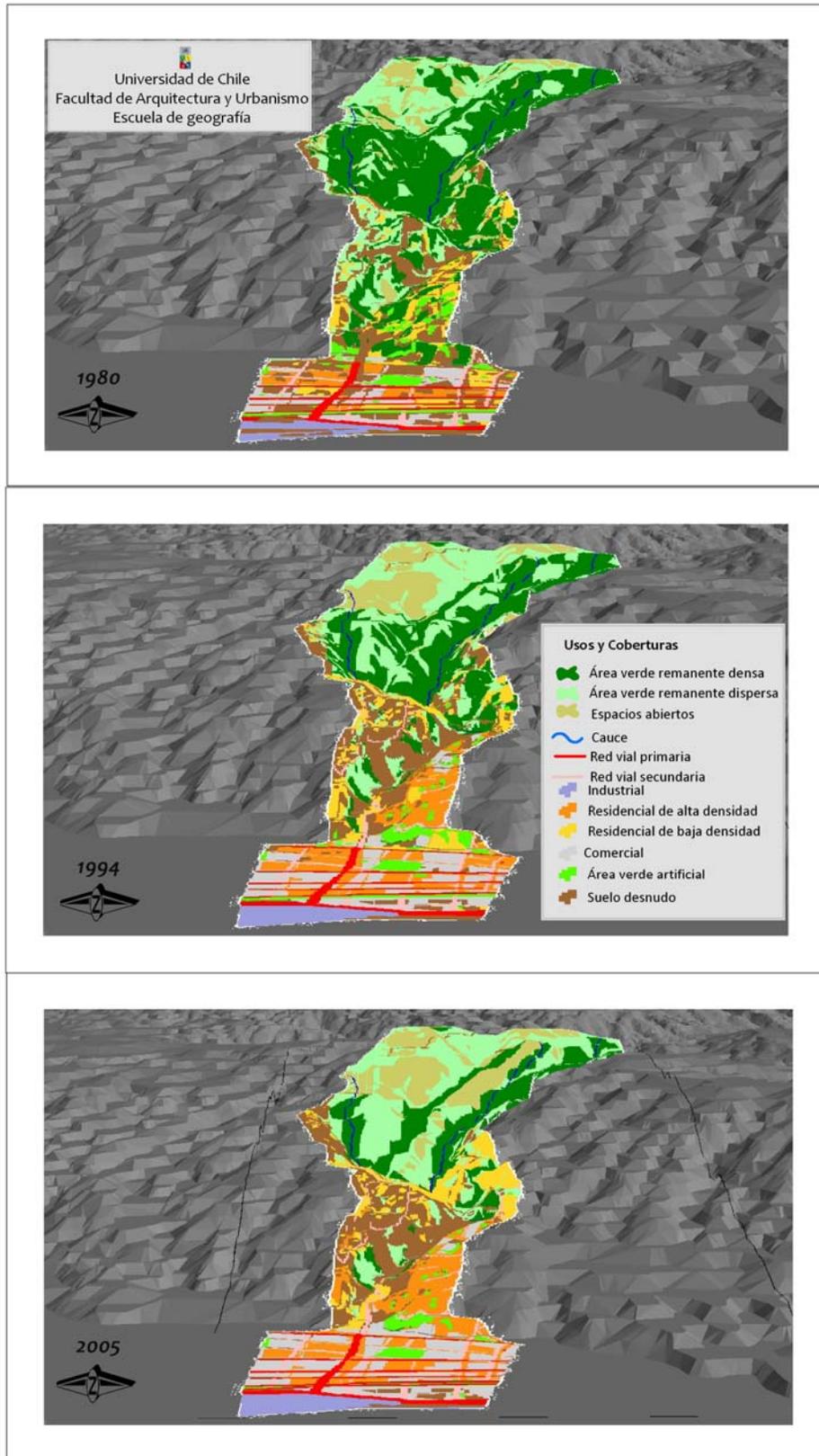


Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

### 8. Referencia 3D de los usos y coberturas de suelo de las tres cuencas 1980-2005







Fuente: elaboración propia, 2007

**9. Ejemplo de departamentos de baja densidad en Miraflores Alto**



Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

**10. Uso comercial en el plan de Valparaíso, influencia cuenca Avda. Francia**



Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

**11. Urbanización de la quebrada de Yolanda, cercana al cauce.**



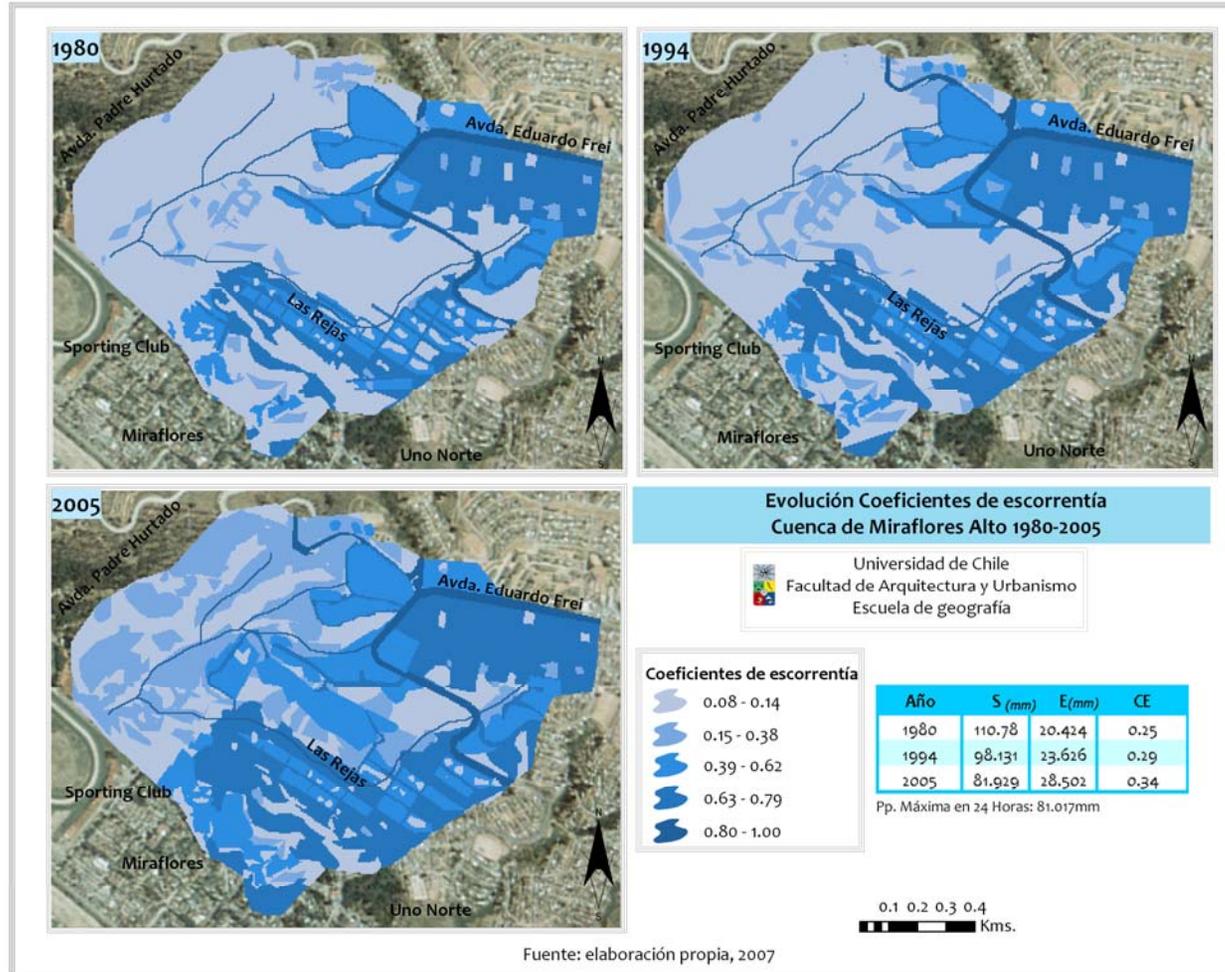
Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

**12. Exutorio natural quebrada de Jaime, comienzo de la entubación**



Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

13. Imágenes del coeficiente de escorrentía por año, Cuenca de Miraflores Alto



#### 14. Áreas verdes en Miraflores Alto



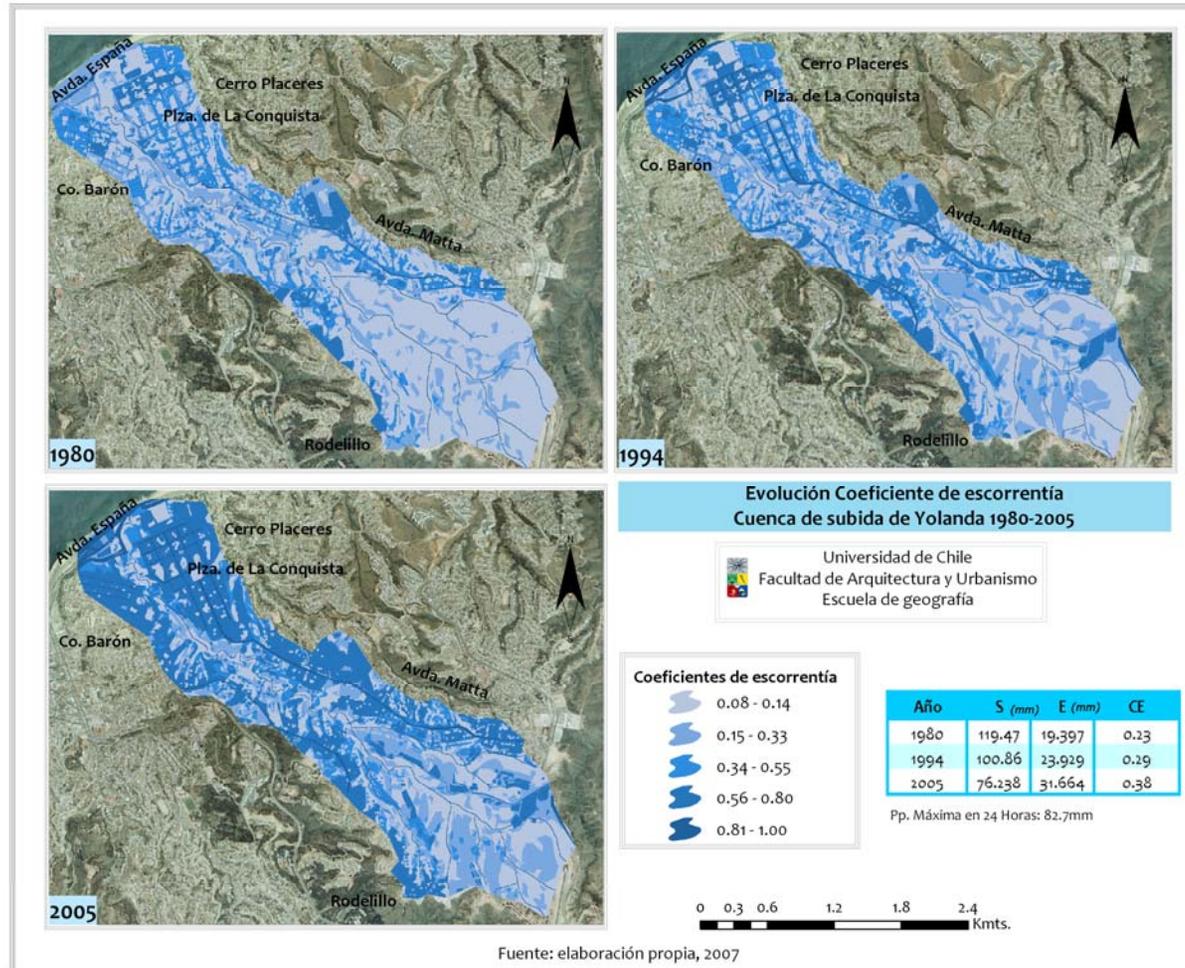
Fuente: elaboración propia, 2007

#### 15. Degradación de la cobertura de bosques en Miraflores Alto

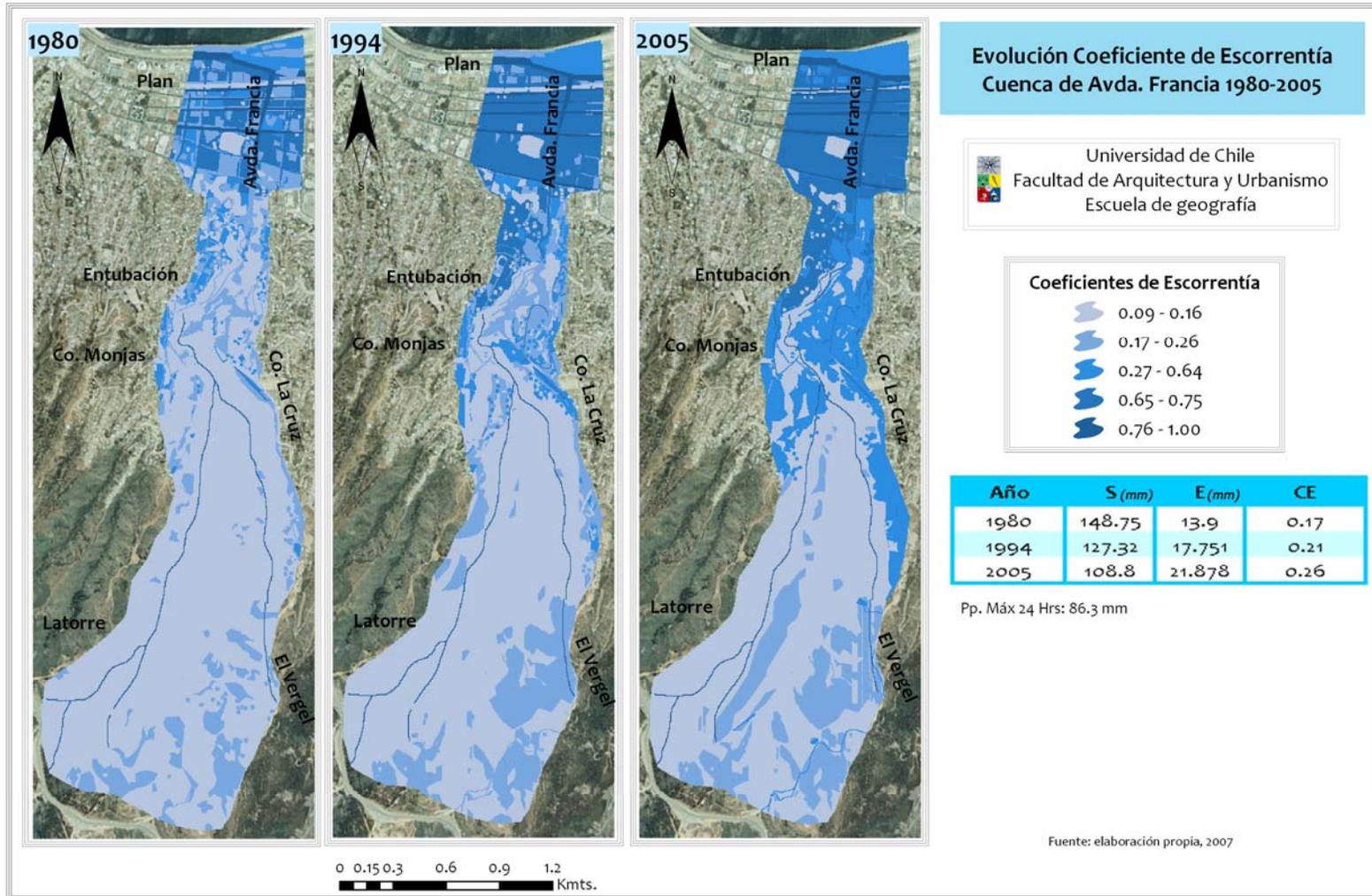


Fuente: elaboración propia, 2007

16. Imágenes del coeficiente de escorrentía por año, subida de Yolanda



17. Imágenes del coeficiente de escorrentía por año, Avda. Francia



**18. Usos y coberturas en las tres cuencas estudiadas, según su presencia en los distintos rangos de pendiente**

Cuenca de Miraflores Alto		1980		1994		2005		Cuenca de Subida de Yolanda		1980		1994		2005		Cuenca de Avda. Francia		1980		1994		2005		
Uso de suelo	Hás	%	Hás	%	Hás	%	Uso de suelo	Hás	%	Hás	%	Hás	%	Uso de suelo	Hás	%	Hás	%	Hás	%	Hás	%		
<b>Suelo Desnudo</b>																								
Pendiente A (0-8°)	1.432	0.87	2.444	1.49	1.427	0.87	Pendiente A (0-7°)	35.098	6.10	33.93	5.90	24.612	4.28	Pendiente A (0-9°)	11.142	3.45	11.969	3.70	8.44	0.647	0.20			
Pendiente B (8.1-21°)	1.387	0.85	2.057	1.26	2.454	1.50	Pendiente B (7.1-16°)	10.939	1.90	10.48	1.82	3.31	0.58	Pendiente B (9-16°)	4.202	1.30	2.398	0.74	2.555	0.79				
Pendiente C (21.1-33°)	0.161	0.10	1.463	0.89	0.421	0.26	Pendiente C (16.1-26°)	6.513	1.13	8.918	1.55	7.814	1.36	Pendiente C (16-28°)	6.262	1.94	8.849	2.74	6.434	1.99				
Pendiente D (34.1-64°)	0	0.00	1.005	0.61	2.037	1.24	Pendiente D (26.1-64°)	2.042	0.36	3.791	0.66	3.686	0.64	Pendiente D (28-65°)	12.951	4.01	5.567	1.72	12.89	3.99				
<b>Residencial de Alta Densidad</b>																								
Pendiente A (0-8°)	8.969	5.47	11.329	6.93	11.667	7.13	Pendiente A (0-7°)	16.917	2.94	31.1051	5.41	80.077	13.93	Pendiente A (0-9°)	4.402	1.36	13.867	4.29	9.941	3.07				
Pendiente B (8.1-21°)	3.994	2.44	7.574	4.63	13.574	8.29	Pendiente B (7.1-16°)	7.624	1.33	10.944	1.90	38.771	6.74	Pendiente B (9-16°)	1.1	0.34	1.215	0.38	1.619	0.50				
Pendiente C (21.1-33°)	2.412	1.47	4.437	2.71	3.558	2.17	Pendiente C (16.1-26°)	1.943	0.34	3.795	0.66	20.017	3.48	Pendiente C (16-28°)	0	0.00	1.689	0.52	7.747	2.40				
Pendiente D (34.1-64°)	0.412	0.25	0.001	0.00	0.145	0.09	Pendiente D (26.1-64°)	0.459	0.08	2.602	0.45	18.687	3.25	Pendiente D (28-65°)	0	0.00	1.854	0.57	6.714	2.08				
<b>Residencial de Baja Densidad</b>																								
Pendiente A (0-8°)	11.822	7.21	9.095	5.56	11.095	6.78	Pendiente A (0-7°)	48.477	8.43	49.496	8.61	23.338	4.06	Pendiente A (0-9°)	4.61	1.43	4.281	1.32	7.362	2.28				
Pendiente B (8.1-21°)	11.051	6.74	9.465	5.79	14.227	8.69	Pendiente B (7.1-16°)	18.692	3.25	19.474	3.39	6.017	1.05	Pendiente B (9-16°)	1.089	0.34	2.92	0.90	0.984	0.30				
Pendiente C (21.1-33°)	3.266	1.99	2.245	1.37	3.831	2.34	Pendiente C (16.1-26°)	12.58	2.19	14.829	2.58	16.59	2.89	Pendiente C (16-28°)	3.837	1.19	3.715	1.15	9.2103	2.85				
Pendiente D (34.1-64°)	0.068	0.04	4.068	2.49	5.998	3.67	Pendiente D (26.1-64°)	6.52	1.13	8.934	1.55	17.36	3.02	Pendiente D (28-65°)	2.245	0.69	2.881	0.89	8.051	2.49				
<b>Comercial</b>																								
Pendiente A (0-8°)	2.332	1.42	2.685	1.64	2.883	1.76	Pendiente A (0-7°)	1.572	0.27	3.406	0.59	5.852	1.02	Pendiente A (0-9°)	8.883	2.75	16.24	5.02	20.348	6.29				
Pendiente B (8.1-21°)	0.462	0.28	0.639	0.39	0.621	0.38	Pendiente B (7.1-16°)	0.547	0.10	1.812	0.32	2.577	0.45	Pendiente B (9-16°)	0	0.00	0.359	0.11	0.22	0.07				
Pendiente C (21.1-33°)	0	0.00	0.017	0.01	0.043	0.03	Pendiente C (16.1-26°)	0.123	0.02	0.127	0.02	0.243	0.04	Pendiente C (16-28°)	0	0.00	0.315	0.10	0.537	0.17				
Pendiente D (34.1-64°)	0	0.00	0.025	0.02	0.143	0.09	Pendiente D (26.1-64°)	0	0.00	0	0.00	0	0.00	Pendiente D (28-65°)	0	0.00	0.237	0.07	1.303	0.40				
<b>Industrial</b>																								
Pendiente A (0-8°)	0	0.00	0.004	0.00	0.004	0.00	Pendiente A (0-7°)	0.293	0.05	1.486	0.26	2.441	0.42	Pendiente A (0-9°)	3.509	1.09	4.891	1.51	5.185	1.60				
Pendiente B (8.1-21°)	0.003	0.00	0.274	0.17	0.274	0.17	Pendiente B (7.1-16°)	0	0.00	0.327	0.06	0.377	0.07	Pendiente B (9-16°)	0	0.00	0	0.00	0	0.00				
Pendiente C (21.1-33°)	0	0.00	0	0.00	0	0.00	Pendiente C (16.1-26°)	0	0.00	0.243	0.04	0.319	0.06	Pendiente C (16-28°)	0	0.00	0	0.00	0	0.00				
Pendiente D (34.1-64°)	0	0.00	0	0.00	0	0.00	Pendiente D (26.1-64°)	0	0.00	0.042	0.01	0.069	0.01	Pendiente D (28-65°)	0	0.00	0	0.00	0	0.00				

Fuente: elaboración propia, 2007

### 19. Sector de El Vergel



Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

### 20. Urbanización en la cabecera de la cuenca de Yolanda



Fuente: elaboración propia, 2007

### 21. Basureros ilegales, Subida de Yolanda



Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

### 22. Entubación cauce Miraflores Alto



Fuente: elaboración propia, 2007 (LABMYT)

### 23. Situación abovedamiento quebrada de Jaime



Fuente: elaboración propia, 2007