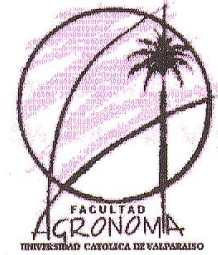




Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Fundación Isabel Caces de Brown
<http://www.agronomia.ucv.cl>



COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL (1986-2003) DE
PLANTACIONES FRUTALES EN LADERAS DE LA PROVINCIA
DE QUILLOTA MEDIANTE IMAGENERÍA SATELITAL Y SIG

Alumno: Ignacio Salgado V
Profesor guía: Dr. Marco Cisternas V
Profesor corrector: Ricardo Cautin M

Quillota, Junio de 2005

Agradecimientos

Quisiera comenzar agradeciendo profundamente a cada uno de los integrantes de mi familia por la amistad y el apoyo incondicional en todos los años de estudio. Sin ellos, los obstáculos del camino hubieran sido más grandes.

Un especial agradecimiento a Marcelo Lagos y su familia. A él, junto con su equipo de trabajo en el instituto de Geografía, PUC por la paciencia y dedicación en la introducción al mundo de la percepción remota y SIG.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Hipótesis	5
1.2	Objetivo general	5
1.3	Objetivos específicos	5
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Provincia de Quillota	7
2.1.1	Descripción de suelos	7
2.1.2	Descripción agroclimática	8
2.1.3	Cultivo del palto en la provincia	9
2.1.4	Necesidad de laderas	12
2.2	Escenario ambiental	13
2.2.1	Erosión	13
2.2.2	Biodiversidad	17
2.3	Antecedentes de estudios relacionados:	17
2.4	Geomática	18
2.4.1	Percepción remota	19
2.4.2	Procesamiento de imágenes	36
2.4.3	Sistemas de Información Geográfica, SIG	39
2.4.4	Sistemas de posicionamiento global, GPS	42
3.	MATERIALES Y METODOS	43
3.1	Antecedentes	43
3.2	Información de base	44
3.2.1	Imágenes Landsat	44
3.2.2	Cartografía de apoyo	46
3.3	Área de estudio	46
3.4	Modelo de elevación digital (<i>Digital Elevation Model; DEM</i>):	48
3.5	Delimitación del área de estudio	48

3.6	Procesamiento de imágenes	49
3.6.1	Corrección geométrica	49
3.6.2	Índice de vegetación	49
3.6.3	Clasificación de imágenes	53
4.	PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55
4.1	Resultados	55
4.1.1	Provincia de Quillota	55
4.1.2	Modelo de Elevación Digital, DEM	57
4.1.3	Delimitación del área de estudio	60
4.1.4	Índices de vegetación (NDVI)	63
4.1.5	Clasificación de imágenes	67
4.1.6	Evolución de los cultivos frutales	75
4.2	Consideraciones	80
4.2.1	Información de base	80
4.2.2	Provincia de Quillota	80
4.2.3	Delimitación del área de estudio	81
4.2.4	Corrección radiométrica	81
4.2.5	NDVI	81
4.2.6	Clasificación de imágenes	82
4.2.7	Expansión de los cultivos sobre la cota canal	83
4.2.8	Evolución de los cultivos frutales	83
5.	CONCLUSIONES	85
6.	RESUMEN	86
7.	SUMMARY	87
8.	LITERATURA CITADA	92

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, el tercio central de Chile ha experimentado una fuerte expansión de la superficie plantada con árboles frutales. La zona más representativa de este fenómeno ha sido la V Región, donde más del 20% de su superficie se destina a la producción frutal. De este total, el cultivo más importante es el palto (*Persea americana* Mill.), que ocupa un 70% (ODEPA-CIREN, 2002). Es así, que desde 1989 hasta el último catastro agrícola del 2002, la superficie con plantaciones de paltos creció en un 350%; aumentando de 4.000 a 15.000 ha (ROSENBERG, 1990; INIA, 2001; ODEPA-CIREN, 2002). Esta expansión, se explica por el alto precio que logra dicho fruto en mercados internacionales, convirtiendo esta producción en un negocio de alta rentabilidad. Es así como en el 2002 se exportó más del 60% de la fruta cosechada en la región (ODEPA-CIREN, 2002). Cifras más recientes indican que las exportaciones significaron US\$ FOB 77 millones (ODEPA, 2004). Sobre la base de lo anterior, y considerando además los últimos tratados de libre comercio firmados por Chile, se estima que la superficie plantada seguirá creciendo sostenidamente durante la siguiente década (PROCHILE, 2003).

Esta situación anterior, probablemente repercutirá en que se aumente la superficie plantada en la provincia de Quillota. Los modernos manejos agronómicos y avances tecnológicos, hacen posible que hoy se pueda plantar sobre suelos que anteriormente eran considerados marginales por su pendiente y por estar sobre la cota canal (UMAÑA, 2000). El icono impulsor que permitió cultivar en laderas de cerros fue la implementación de nuevas tecnologías de riego. Las laderas ofrecen algunas ventajas comparativas difíciles de superar por las áreas planas: i) existe menor riesgo a heladas invernales —el aire frío tiende a concentrarse en los sectores bajos; ii) bajo costo de la tierra —hace unos años atrás eran considerados sectores marginales, por lo que su precio alcanzaba un décimo del costo de los suelos agrícolas; iii) su

pendiente permite un buen drenaje —minimizando las enfermedades radiculares como *Phytophthora cinnamomi* (GARDIAZABAL, 2001).

A pesar del explosivo proceso expansivo de las plantaciones en laderas y su trascendencia económica, no se dispone de información fidedigna relativa a su localización geográfica, ni a la tasa de aumento de superficie plantada desde sus inicios, a mediados de los ochenta, hasta el presente.

Conocer estos antecedentes es de vital importancia tanto para la planificación y regulación del uso del territorio, como la toma de decisiones adecuadas por parte de entidades del Estado y privadas.

En base a lo anterior, se ha evidenciado que los suelos de laderas con altas pendientes han presentado un importante cambio de uso. Los huertos de palto están reemplazando a la vegetación silvestre, dejando el suelo descubierto durante al menos un par de años. Esta situación, junto al hecho de que se pierde la estructura original del suelo, aumentaría su vulnerabilidad a la erosión hídrica durante el invierno (SCHLATTER, GREZ y GERDING, 2003). Sumando todos los huertos establecidos sobre suelos frágiles, la cantidad de material que se estaría perdiendo anualmente por esta causa, es probablemente muy importante (CONAF, 2004). A pesar de lo anterior, la superficie plantada en laderas sigue aumentando de acuerdo al último catastro frutícola (ODEPA, 2002).

El primer paso necesario para establecer un huerto frutal en laderas, es la remoción de la vegetación silvestre. De este modo, el bosque esclerófilo silvestre estaría experimentando un fuerte retroceso debido al avance de estos cultivos. Esto ha generado una fuerte preocupación pública, reflejada en el proyecto de ley sobre bosque

nativo que se discute en el Parlamento desde hace más de 10 años. Además, se suman a la discusión pública, la comunidad científica y agronómica que se expresan a través de innumerables discusiones en diferentes medios de comunicación (UMAÑA, 2000; ARCE, 2002; CAUTIN, 2002; CISTERNAS 2002; CISTERNAS 2003; GARDIAZABAL, 2003). Como antecedente, en Chile existe un alto grado de endemismo de flora y fauna en comparación a otras partes del mundo, razón por la cual su deterioro acelerado resultaría en un detrimento severo del patrimonio genético del país. Se estima que por cada especie vegetal que se remueve en las laderas, hay otras 30 especies de flora o fauna que dejan de existir (DDBCH, 2005).

Con el objeto de evaluar el impacto de estos cambios vegetacionales, tanto desde el punto de vista del uso del suelo como del reemplazo del bosque esclerófilo por cultivos de palto, es indispensable cuantificar la superficie afectada. Actualmente, no se dispone de antecedentes cuantitativos ni geográficos que permitan definir con exactitud las áreas involucradas. Esto es información esencial para poder posteriormente estimar el impacto ambiental sobre los recursos naturales. Por otra parte, permitiría conocer la dinámica experimentada por estas plantaciones en los últimos años, además de contribuir a sustentar científicamente la discusión y debate público respecto al futuro del cultivo. Este problema se ha acentuado en las zonas con aptitudes agroecológicas para el cultivo del palto. En particular, el sector con mayor desarrollo del cultivo en ladera ha sido la provincia de Quillota (INIA, 2001).

La tecnología actual ofrece la posibilidad de interpretar la superficie terrestre a través de la percepción remota –imágenes satelitales y fotos aéreas. A través de este método, se puede obtener información confiable y certera de la actividad fotosintética que presentan las coberturas vegetales en un determinado momento (ROGAN, FRANKLIN & ROBERTS, 2001; CHUVIECO, 2002; HOFFHINE & SADER, 2002; CAPUC, 2004; CCRS, 2004; INRENA, 2004). Asimismo, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) están ampliamente descritos como una poderosa herramienta

que permiten almacenar, gestionar, manipular y representar gráficamente datos con componentes espaciales (BOSQUE, 1997; CEBRIAN, 1998; CHUVIECO, 2002; CAMPOS, 2004; CAPUC, 2004). Ambas técnicas combinadas tienen como objetivo final, integrar la información resultante con diversas variables, relacionándolas entre sí, y mostrando finalmente la información en formato gráfico. Sobre la base de lo anterior, el presente trabajo pretende utilizar ambas herramientas en el estudio del comportamiento espacio-temporal de las plantaciones frutales en laderas de la Provincia de Quillota.

Los censos realizados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) han sido la manera tradicional para obtener información del medio agropecuario. Así, en el último censo agropecuario de 1997 se caracterizó el escenario agrícola y pecuario de todo Chile. Para abarcar un área geográfica menor se han utilizado habitualmente los catastros. En este sentido, la información más reciente disponible para la V región, es el catastro frutícola del año 2002 (ODEPA-CIREN, 2002). Sin embargo, estos métodos no pueden generar datos absolutamente objetivos, debido a que se basan en la información que entrega cada entrevistado, dependiendo de esta forma de variables subjetivas.

La estrategia planteada en este trabajo tiene el propósito de incrementar la objetividad del análisis, y diferenciar los cultivos frutales en laderas de los cultivos en plano, la presente investigación compara el “antes” con el “después” de las plantaciones en laderas, mediante dos imágenes satelitales y SIG. Esta estrategia, a diferencia de las encuestas tradicionales, tiene la ventaja de obtener la información desde el espacio, sin depender de la información que quieran, o no quieran, dar los encargados de los predios.

1.1 Hipótesis:

Mediante la utilización de imágenes satelitales y SIG, es posible reconocer y cuantificar el cambio de uso del suelo generado por la expansión de los cultivos frutales en laderas.

1.2 Objetivo general:

Evaluar el comportamiento espacio-temporal (1986-2003) de las plantaciones frutales en laderas de la provincia de Quillota, mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat y la aplicación de SIGs.

1.3 Objetivos específicos:

- A través de la cartografía digital oficial y el SIG, delimitar el área de estudio y construir su modelo de elevación digital (DEM), para clasificar las pendientes del área de estudio.
- Mediante el procesamiento de las imágenes satelitales, determinar el índice de vegetación, en ambos periodos, para determinar el cambio de biomasa ocurrido.
- Mediante la interpretación digital de ambas imágenes (composición en falso color), determinar la expansión de las áreas bajo riego, en el área de estudio.

- Mediante el análisis comparativo entre las áreas regadas, en ambos periodos, determinar la expansión de los cultivos y así reconocer la evolución espacial del cambio de uso del suelo.
- Comparar la evolución espacial de los cultivos en ladera con la fragilidad del suelo (dada principalmente por el grado de pendiente) en el área de estudio.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Provincia de Quillota:

La Provincia de Quillota esta ubicada entre los 32°35' - 33°9' Lat. S y 71°27' - 71°0' Lon. O. Cuenta con una población de 203.726 hab concentrados en los suelos llanos, encontrándose en segunda posición después de Valparaíso a nivel regional (BANDA, GARCIA y MUÑOZ, 2001). Esta formada por siete comunas (Quillota, La Cruz, La Calera, Nogales, Hijuelas, Limache y Olmué), siendo Quillota la más poblada con 67.007 hab. Dicha provincia tiene una superficie de 164.000 ha, de las cuales 11.843 se utilizan en fruticultura con importancia económica nacional (ODEPA, 2002). Dentro de esta actividad se clasifica el cultivo del palto, que ha sido la especie frutal con mayor superficie de explotación en la provincia. Encuestas recientes la estiman en 7.228 ha representando un 61% de la superficie frutícola (ODEPA, 2002).

2.1.1 Descripción de suelos

Los suelos de la Provincia son en general de origen granítico, especialmente en la vertiente poniente de la Cordillera de la Costa, donde los suelos se han originado directamente a partir de esta roca (UNIVERSIDAD DE CHILE, 1999). Presentan tipologías aluviales, algunas de arrastre coluvial y en ciertos sectores de tipo cuenca de sedimentación. En los lugares llanos, están clasificados mayoritariamente como suelos arables, en Clase III y IV de capacidad de uso, limitados principalmente por su bajo drenaje (CNR, 1982). En contraste, los que se ubican en laderas de cerro han sido clasificados tradicionalmente como suelos no arables, en Clase VI de capacidad de uso (INIA, 2001). A pesar de algunas limitaciones para la explotación

agrícola en sectores locales de la provincia, presentan excelentes condiciones para la realización de esta faena (CNR, 1982).

En base a lo anterior se ha fundamentado el éxito que ha tenido el cultivo del palto en el sector. A pesar de que esta especie es una de las más exigentes en cuanto a condiciones de suelo, como: i) profundidades mayores a 80 cm; ii) con una alta capacidad de drenar los excesos de agua; y, iii) con gran capacidad de infiltración, los cuales reducen la posibilidad de asfixia radicular, se ha desarrollado con excelentes resultados productivos. Los modernos manejos agronómicos han permitido su establecimiento en variadas condiciones de suelo gracias a la utilización de los denominados “camellones” (GARDIAZABAL, 2001).

2.1.2 Descripción agroclimática

En rasgos generales, la provincia posee un clima Mediterráneo Marino caracterizado principalmente por presentar dos estaciones bien definidas durante el año. En relación a sus temperaturas, es representado por un régimen térmico subtropical; con una temperatura media anual de 13,5 °C. La estación cálida y seca tiene una duración de nueve meses, de septiembre a mayo. Se caracteriza por estar libre de heladas y presentar veranos cálidos, con rangos de temperatura entre 17 – 25 °C y una máxima media del mes más cálido (enero) de 27 °C. Por otro lado, la estación fría y lluviosa es suave, presentando rangos de temperatura entre 10 y 21 °C con una mínima media del mes más frío (julio) de 5,5 °C. Ocurren algunas heladas, con temperaturas de alrededor de -1 °C. Las precipitaciones anuales son del orden de 437 mm, siendo junio el mes más lluvioso. La evaporación media anual es de 1.361 mm, con la máxima en diciembre (INIA, 1989).

Las condiciones mencionadas anteriormente han sido otro factor crucial en el gran desarrollo que ha tenido el palto en la provincia. Por un lado se ve favorecida la época de cosecha de los frutos. La labor comienza, en algunos huertos incluso en los meses de julio – agosto, lo cual está definido como “fruta temprana” –se envía a los mercados internacionales prácticamente en una época en donde no hay gran oferta. Por otra parte, para esta especie uno de los eventos con mayor importancia es la polinización. Este proceso es mayormente exitoso cuando existe un diferencial térmico entre el día y la noche de 10 °C en primavera. Sobre este hecho recae que históricamente, es en la provincia de Quillota donde: “*mejor se desarrollan las paltas*” (GARDIAZABAL, 2001).

2.1.3 Cultivo del palto en la provincia

La evolución de la superficie de paltos en Chile central ha sido explosiva en los últimos 15 años, aumentando ésta en siete veces desde 1989 hasta el 2002 (Figura 1). (ODEPA–CIREN, 2002). Una de las zonas más productoras del fruto es la V Región, la cual tiene la mayor superficie plantada en Chile y a su vez la mayor tasa de expansión en las últimas dos décadas, demostrado en el Cuadro 1 (GARDIAZABAL, 2001). Es así como en el año 1989 la producción de huertos industriales de paltos se concentra principalmente en ésta, con 4.207 ha equivalente al 51% de la participación nacional (ROSEMBERG, 1990). En 1995, aumenta a 8.071,2 ha. Logrando en el 2002, 14.930 ha, equivalente a una participación nacional del 69,6%, de las cuales, 12.579,14 ha –84,25%– están bajo riego presurizado. A su vez, la provincia de Quillota aporta con la mayor participación de la región, con 7.230 ha, lo que representa un 48,5% (ODEPA–CIREN, 2002).

De la superficie plantada en la provincia, las variedades más cultivadas son: Hass, con la mayor importancia (12.783); Fuerte, Negra de la Cruz y Bacon (ODEPA, 2004).

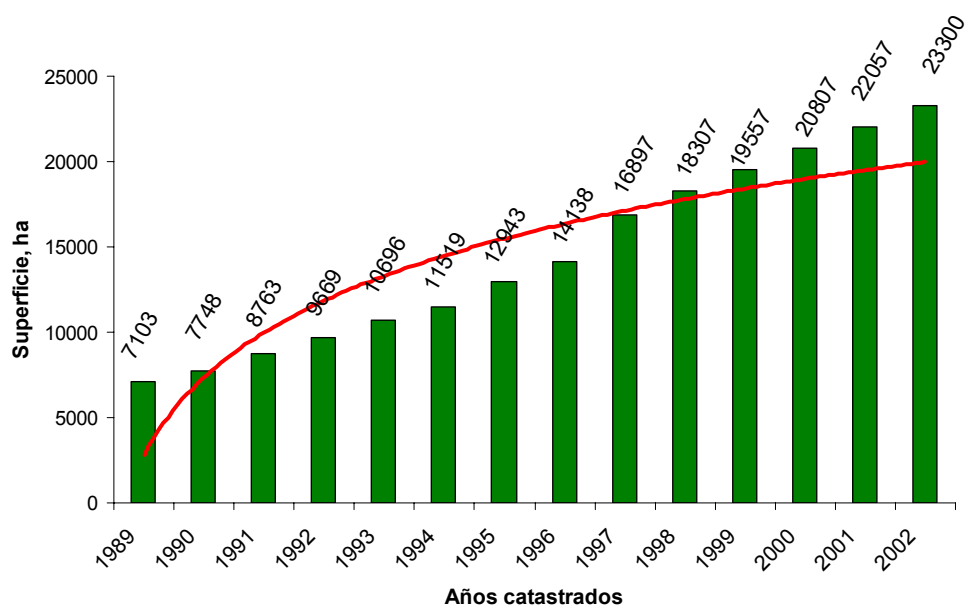


FIGURA 1. Evolución de la superficie, en hectáreas, del cultivo del palto en Chile (Fuente: ODEPA-CIREN, 2002).

CUADRO 1. Evolución del porcentaje de participación regional de la superficie plantada con paltos.

Región	1979–80	1989–90	2000–01
V	56,6	56,9	60,7
RM	14,8	23,3	22,5
VI	23,7	12,5	9,7
IV	2,4	5,6	6,5
Otras	2,6	1,7	0,6

Fuente: Gardiazabal, 2001

2.1.4 Necesidad de laderas

La provincia de Quillota ofrece algunas ventajas comparativas, con respecto a otras zonas, para cultivar paltos. Esta situación se da especialmente en el valle de Quillota –zonas libres de heladas, regadas con agua de buena calidad. Asimismo, el alto precio que alcanza el fruto en los mercados internacionales, por la fecha de comercialización; además de la cercanía con Valparaíso, el principal centro de embarque para los productos agrícolas de exportación (GARDIAZABAL, 2001). Dado el presente escenario nace el fuerte estímulo de aumentar la superficie plantada con paltos en la zona. Sin embargo, en gran parte de la provincia, los terrenos con aptitudes agrícolas ya están utilizados tanto con actividades agropecuarias como además están siendo convertidos a sitios urbanos –expansión urbana (CONAMA, 2005; UNIVERSIDAD DE CHILE, 2005).

Gracias a los avances tecnológicos y al bajo costo del terreno los que hicieron posible cultivar industrialmente sobre los suelos de laderas de cerro, por sobre la cota de canal. Es así, que a mediados de la década de los ochenta, el Estado subvencionó proyectos de riego tecnificado promoviendo la optimización del agua y de esta manera abarcar mayores superficies regadas. Por otra parte, al contar con sistemas de riego presurizado se hace posible transportar el agua por sobre la cota canal (BANDA, GARCIA y MUÑOZ, 2001). Anterior a estos cultivos, los suelos de laderas eran consideradas no cultivables tanto por su fuerte pendiente como la pobre calidad que tienen, y limitados por la profundidad.

Algunas encuestas realizadas recientemente en la provincia de Quillota, estiman que hasta el año 2001 existen 2.500 ha de cultivos sobre ladera. De las encuestadas, la especie predominante es el palto, con un 88,5% de participación, seguido por cítricos 7,5% y chirimoyos 3% (INIA, 2001).

2.2 Escenario ambiental:

2.2.1 Erosión

Actualmente en Chile existe una gran discusión pública sobre las plantaciones en suelos frágiles (UMAÑA, 2000; ARCE, 2002; CAUTIN, 2002; CISTERNAS 2002; CISTERNAS 2003; GARDIAZABAL, 2003). Entendiéndose por tales, aquellos susceptibles de sufrir erosión severa debido a factores limitantes intrínsecos, tales como pendiente, textura, estructura, profundidad, drenaje, pedregosidad u otros, según las variables y los criterios de decisión señalados en el artículo 22 del D.S. N° 193, de 1998, del Ministerio de Agricultura (CONAF, 2004). Es así como en algunos sitios se ha visto, luego de las lluvias invernales, vestigios de un gran arrastre de

materiales del suelo, incluso en casos más críticos, se han manifestado importantes daños sobre la infraestructura; erosión de caminos, colmatación de tranques, derrumbes, etc. (CISTERNAS, 2002; CISTERNAS 2003). Éste es un fenómeno complejo determinado por varios factores, tales como la lluvia, erodabilidad del suelo, factores topográficos, uso del suelo y medidas de conservación. En una condición natural, aunque el suelo se encuentra en un estado de equilibrio es muy frágil y mientras mayor sea la pendiente aumenta la complejidad. Para estos casos, existe una degradación del suelo mucho mayor que en los suelos planos, situación que en la mayoría de los casos es irreversible (OYARZUN, 1997; SCHLATTER, GREZ y GERDING, 2003).

Ya han sido descritos los impactos de erosión provocados por la agricultura tradicional en los suelos, tales como incorporación de cultivos y sus labores asociadas, como se muestra en la Figura 2 (CROVETTO, 2002; HONORATO, 2004). Asimismo, los cambios de uso de suelo en las laderas provocan, en el corto plazo una serie de procesos que aumentan el deterioro acelerado, tales como: i) exposición del suelo a los efectos mecánicos de la lluvia, lo que en presencia de material suelto, amplifica su probabilidad de escorrentía; ii) alteración negativa de las propiedades físicas del suelo, evidenciado por su intensivo laboreo; y, iii) transporte de material reflejado en sedimentos presentes en algunos canales y ríos (FRANCKE, BARRÍA y PINTO, 1999; CROVETTO, 2002).

A partir de resultados de algunas investigaciones realizadas en Europa demuestran como los suelos aumentan considerablemente su fragilidad al estar desnudos. Al no tener ninguna cubierta vegetal, estos quedan expuestos a la lluvia y al viento aumentando su probabilidad de ser erosionados. Hecho que incide sobre las capas más productivas –las que se encuentran en las capas más superficiales (FRANCKE, BARRÍA y PINTO, 1999; MARTÍNEZ-CASASNOVAS Y PORTA, 1999; CRIE, 2004). En los cultivos dispuestos en pendientes moderadas a fuertes, entre 5 y 20 % el

fenómeno aumenta su intensidad, como lo señalan MARTÍNEZ-CASASNOVAS Y PORTA, (1999).

Dentro de las causas más importantes en el aumento de la fragilidad sobre los suelos son: i) la quema no controlada; ii) la intensiva deforestación de los ecosistemas autóctonos; y, iii) el sobrepastoreo, que merma ostensiblemente la biodiversidad del ecosistema asociado a las praderas naturales (GASTÓ, GALLARDO y CONTRERAS, 1987). Al respecto, existen antecedentes de una degradación acelerada del paisaje en la cordillera de la costa de Chile central a causa de procesos erosivos (OYARZUN, 1997; CONAMA, 2005). De los cuales, solo en la V región se encuentran muchas localidades afectadas por este fenómeno (CONAMA, 2005; UNIVERSIDAD DE CHILE, 2005).

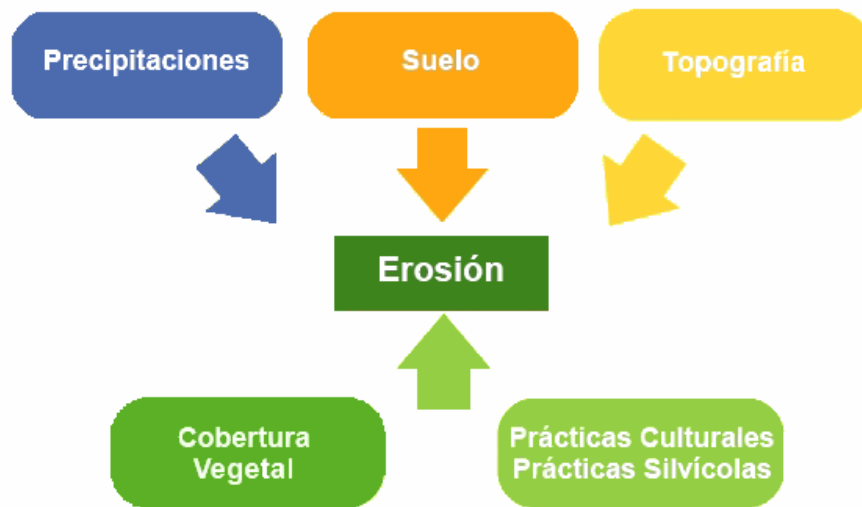


FIGURA 2. Factores de sitio que afectan la erosión del suelo (Fuente: Honorato, 2004).

2.2.2 Biodiversidad

Con respecto a lo señalado anteriormente, la pérdida de los recursos naturales no solo se basa en el suelo de las laderas, sino también en la biodiversidad de todo el ecosistema asociado a éste ambiente (BANDA, GARCIA y MUÑOZ, 2001; DDBCH, 2005). El retroceso experimentado por el bosque esclerófilo en los últimos años ha sido explosivo. Según ecólogos expertos, en Chile los 2 ecosistemas con mayor biodiversidad son: i) el bosque esclerófilo o de hojas duras, con especies como boldo (*Peumus boldus*), maitén (*Maitenus boaria*), Arrayán (*Luma piculata*), entre otros; y, ii) los arbustos de zona mediterránea, que contiene especies tales como espino (*Acacia caven*) y tebo (*Trevoa trinerva*). Estos ecosistemas no cuentan con regulaciones legales de protección. En este sentido, los únicos sitios con estos privilegios son los parques nacionales (DBCH, 2005). Al respecto, la provincia de Quillota posee 14.997 ha protegidas, las cuales representan los terrenos de alta pendiente ($s > 45^\circ$, según Ley de Bosques, 1931) (BANDA, GARCIA y MUÑOZ, 2001).

Dado a los motivos señalados en el párrafo anterior, el parlamento chileno, a través del proyecto de ley de bosque nativo que lleva en trámite desde 1992 hasta la fecha, pretenderá regular y preservar el sistema natural que compone el bosque nativo como también fomentar su explotación adecuada (DBCH, 2005).

2.3 Antecedentes de estudios relacionados:

Hasta el momento se han realizado trabajos que han intentado aproximar alguna información relevante al problema que se plantea en este estudio. Un intento reciente lo realizó el INIA-La Platina, en el año 2001. El trabajo consistió en un diagnóstico denominado "Situación de las plantaciones frutales en cerro en la Provincia de Quillota" (INIA, 2001). El estudio se centró, principalmente en encuestar 28 predios,

incluyendo 1000 ha cultivadas sobre laderas. Superficie que ocupa un 42% de la total plantada sobre este sistema hasta entonces. En el estudio se describen todas las metodologías utilizadas en plantaciones en laderas, de los cuales concluye que: el camellón a favor de la pendiente es usualmente es el mayormente utilizado y dado al arrastre de material que provoca este sistema las consecuencias erosivas serán severas al largo plazo. No obstante, el sistema utilizado para la cuantificación de la superficie plantada presenta una importante falencia. La información se generó en base a encuestas realizadas '*persona a persona*', la cual no siempre es la representación exacta de la realidad dado que en muchas ocasiones son estimaciones o comunicaciones personales de las cuales no se tiene certeza cierta.

Otro método tradicional utilizado para responder el problema en estudio son los censos y catastros agrícolas realizados (INE, 1997; ODEPA-CIREN, 2002). El objetivo de éstos es lograr una gran cantidad de datos a nivel nacional o de alguna localidad específica sobre el ambiente agropecuario. Sin embargo, la obtención de la información es igual a la descrita en el párrafo anterior. Por otra parte, ésta carece de localizaciones geográficas asociadas a los datos generados.

De lo anterior se desprende la urgente necesidad de generar información fidedigna respecto a la cuantificación de los efectos del uso agrícola de las laderas junto a la variabilidad de su impacto a través del tiempo.

2.4 Geomática:

Una de las tecnologías modernas disponibles para el estudio de la superficie terrestre es la geomática. Esta disciplina, cuyo origen se encuentra en la unión de ciencias de la tierra y de la informática, consiste en una integración de datos, métodos y

tecnologías para estudios del espacio geográfico. Las actividades realizadas en este ámbito, constituyen todos los medios para adquirir y manejar datos espaciales. Éstos, son interpretados y procesados con variados fines, tales como estudios científicos y planificación territorial (CCRS, 2004).

Dentro de la geomática, existen variados conceptos interrelacionados que permiten entender la manera de obtener y procesar, para finalmente representar la información obtenida. En el marco conceptual de este trabajo se abordan tres conceptos esenciales que introducen en grandes rasgos, al mundo de esta disciplina: i) Percepción remota; ii) Sistemas de Información Geográfica (SIG); y, iii) Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

2.4.1 Percepción remota

Proviene del inglés, *Remote Sensing*. Ideado a principios de los sesenta como concepto para designar cualquier medio de observación remota (CHUVIECO, 2002). Científicamente definido como “la ciencia (para algunos, arte) de conseguir información relativa a la superficie de la tierra sin necesidad de estar en contacto con ella” (CCRS, 2004). Primeramente, se le atribuía este nombre a la fotografía aérea y a la videografía. Hoy en día, el término es un concepto amplio y está asociado a la detección de una superficie u objeto sin estar en contacto físico con ella, acción similar a la que realiza el ojo humano. Éste recibe un haz energético de los objetos por reflejo de la luz solar o artificial. La señal es transmitida al cerebro humano, el cual es capaz de procesar la información e interpretarla a través de imágenes del mundo real. El mismo principio se aplica en la obtención de imágenes satelitales, estos reciben la energía solar reflejada desde la tierra, registrando así la información tanto de la atmósfera como la superficie terrestre (SAG, 2004). Entonces, para esta revisión se entenderá como Percepción Remota a todo lo relacionado con la adquisición de imágenes satelitales de la superficie terrestre desde sensores instalados

sobre plataformas espaciales y su posterior tratamiento, manipulación y análisis por parte de los usuarios finales (CHUVIECO, 2000; CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004).

Esta herramienta ha sido ampliamente utilizada tanto para estudios atmosféricos como estudios de los recursos naturales sobre la superficie de la tierra. Es así como, a través de datos obtenidos desde el espacio se ha logrado una magnífica experiencia en la comunidad meteorológica, que utiliza rutinariamente imágenes satelitales en las tareas de predicción y prevención. Por otra parte, se han realizado muchas investigaciones sobre el monitoreo de problemas ambientales o de la dinámica de los recursos naturales. Finalmente, el método entrega información de manera rápida, confiable y a un bajo costo relativo (PRADOS, 1995; CHUVIECO, 2002; SAG, 2004; CCRS, 2004; NASA, 2004).

La metodología presenta numerosas ventajas con respecto a otras técnicas de percepción remota, como la fotografía o videografía aérea. Dentro de las cuales se mencionan las siguientes: i) cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre, la información satelital es una de las pocas fuentes homogéneas y absolutas –el mismo satélite sirve para cubrir todos los países y todo el territorio del planeta. Esto resulta de vital trascendencia para ayudar a entender algunos procesos medioambientales como el calentamiento de la tierra, deforestación o la pérdida de la capa de ozono (CHUVIECO, 2002; FOODY & BOYD, 2005; LIU, KAFATOS & GOMEZ, 2005). ii) perspectiva panorámica, la altura a la que orbitan los satélites permite detectar grandes extensiones en variados niveles de detalle. Un ejemplo de esto es el siguiente: una fotografía aérea de escala 1:18.000, capta en una sola imagen una superficie de 16 km², en contraste con una imagen de un sensor satelital –Landsat TM– permite contemplar 34.000 km² de una sola vez (CHUVIECO, 2002). iii) observación multiescala, relacionado con la diversa oferta de imágenes satelitales obtenidas por distintos satélites artificiales. A pesar de las diferencias en cuanto a la adquisición o formato, son compatibles entre si para su posterior comparación (CHU-

VIECO, 2002; CCRS, 2004). iv) información sobre regiones no visibles del espectro, los sensores espaciales facilitan imágenes en variadas longitudes de onda no perceptibles por el ojo humano, por ejemplo las del infrarrojo medio y térmico o las microondas. Estas bandas del espectro proporcionan valiosa información para estudios ambientales, que no sería posible sin ésta (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004; NASA, 2004). v) cobertura repetitiva y transmisión inmediata, los satélites al estar en órbita adquieren imágenes con una frecuencia de tiempo determinada, según el sensor. Por ejemplo, el sensor Landsat pasa por un mismo punto cada 16 días. Por otro lado, la transmisión de datos desde la plataforma espacial a estaciones terrestres, es realizada cada vez que el satélite pasa por algún centro de recepción en distintos países. En Sudamérica hay uno en Brasil y otro en Argentina. vi) formato digital, el cual permite una manipulación veloz de la información y además eficiente. En muchas ocasiones es una gran cantidad de información la que se maneja, sin embargo hoy en día existen formatos como el CD-ROM o el DVD-ROM que son capaces de almacenar bastante información en un reducido espacio (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004).

2.4.1.1 Sistemas involucrados en la percepción remota

a) Fuente de energía (Figura 3, etapa 1)

Es el origen de la radiación electromagnética detectada por el sensor. Principalmente la fuente de energía más grande es el sol, lo que se conoce como percepción remota pasiva. También existen sensores que emiten un ondas hacia la tierra, generalmente de microondas. Método conocido como percepción remota activa (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004).

b) Cubierta terrestre (Figura 3, etapa 2)

Esta conformada por las distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones hechas por el hombre. Estas reciben la señal de la fuente de energía y reflejan una parte de ésta de acuerdo a sus características (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004).

c) Sistema sensor (Figura 3, etapa 3)

Está compuesto por el sensor propiamente tal y la plataforma que lo alberga. Este es el encargado de captar la energía reflejada de la cubierta terrestre, codificarla y enviarla a un sistema de recepción terrestre (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004).

d) Sistema de recepción – comercialización (Figura 3, etapa 4)

La información captada por el sensor es directamente transmitida a estaciones de recepción terrestre. A medida que el satélite orbita, hay momentos en que esta en vista por alguna estación. Cuando esto ocurre, la data es enviada a la tierra. Luego, los datos son almacenados y grabados en formatos de distribución comercial para los usuarios interesados (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004).

e) Intérprete (Figura 3, etapa 5)

Es uno o varios profesionales expertos que a través de sucesivos procesos matemáticos y computacionales, convierten estos datos en información temática común para la facilitar la visualización por parte de los usuarios finales (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004).

f) Usuario final (Figura 3, etapa 6)

Compuesto principalmente por las entidades científicas, privadas o de administración pública, las cuales utilizan esta información para entender algunas conductas o patrones desde un punto de vista global (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004).

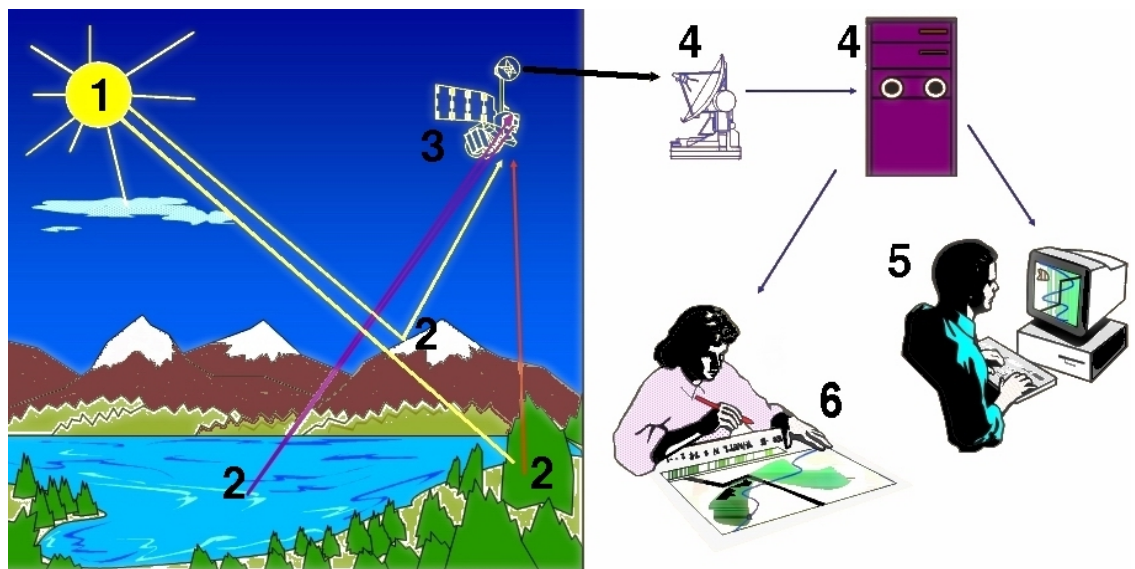


FIGURA 3. Diagrama de las etapas de la percepción remota (Fuente: Chuvieco, 2002).

Aplicaciones concretas en este medio están siendo cada vez recurrentes. Un claro ejemplo de ello son los numerosos estudios realizados sobre el comportamiento de la vegetación en todo el mundo (CHUVIECO, 2000; ROGAN, FRANKLIN y ROBERTS, 2001; CHUVIECO, 2002; GARCÍA, 2005; INRENA, 2004; LUNETTA, *et al.*, 2004; FOODY y BOYD, 2005). Particularmente, el método presenta un gran número de ventajas con respecto a estas materias (CCRS, 2004). Mediante la utilización de imágenes obtenidas con sensores destinados especialmente para el estudio de los recursos naturales (Landsat, spot, IKONOS, entre otros) es posible, entre otras acciones: reconocer y discriminar áreas con cubiertas vegetales (PRADOS, 1995; HOFFHINE y SADER, 2002), midiendo tanto cuantitativa como cualitativamente la biomasa vegetal (FOODY y BOYD, 2005; LIU, KAFATOS y GOMEZ, 2005), medir indirectamente el vigor de una superficie cubierta con vegetación (PRINS y KIKULA, 1996; ROGAN, FRANKLIN y ROBERTS, 2001; GARCÍA, 2005).

Las alternativas del material a procesar en la percepción remota, eran hasta hace algún tiempo atrás las fotografías y videografías aéreas obtenidas por cámaras montadas en aviones especialmente destinados para éste propósito (CHUVIECO, 2000; CHUVIECO, 2002). Conforme al desarrollo de nuevas tecnologías espaciales fue posible la disposición a nivel de usuario, de imágenes captadas por sensores satelitales hacia mediados de los años sesenta (NASA, 2004).

2.4.1.2 Imágenes satelitales

A medida que los satélites con sensores pasivos avanzan en su órbita “barren”, la superficie terrestre captando la energía del sol reflejada por ésta en distintas longitudes de onda (Figura 3). Éstas son agrupadas en distintos rangos a los que se les conoce como “bandas espectrales”. Los sensores, al codificar esta información para cada banda en un formato posible de interpretar por los expertos, generan verdade-

ras matrices digitales de píxels –*elementos pictóricos*– (del inglés, *Picture x element*) que en su conjunto constituyen una imagen ó también denominados como “raster”. Éstos están íntimamente relacionados entre si y cada uno de ellos posee un valor numérico propio que es interpretado por los sistemas computacionales especialistas como una mayor o menor respuesta en una longitud de onda determinada, de acuerdo a las características que presenta cada cuerpo en la superficie terrestre. En el lenguaje del procesamiento de imágenes son denominados ND (*Nivel Digital*) (CHUVIECO, 2002; NASA, 2004).

Posteriormente, los raster son transmitidos a una estación receptora en la tierra, como se señaló anteriormente, donde se verifica que la información esté debidamente decodificada y se ordena de manera tal, que se obtiene la imagen completa (NASA, 2004). Todas las imágenes captadas por la gran gama de satélites comercialmente disponibles requieren de ciertas correcciones sistemáticas, las cuales son algoritmos que rectifican la imagen recién captada o “cruda”, aplicados automáticamente en la estación de recepción. Para ello se utilizan parámetros espaciales contenidos en los archivos descriptores de imagen –datos de posicionamiento y efemérides del satélite (CHUVIECO, 2002; NASA, 2004). Estos ajustes consiguen minimizar las variaciones espaciales presentes en la imagen en su estado bruto tales como, correcciones del ángulo de curvatura terrestre, variaciones de velocidad y altura del satélite, desplazamientos orbitales, etc. Luego de realizada esta operación la imagen esta lista para su distribución comercial en los formatos que requiera el usuario (CD-ROM o cintas magnéticas) (NASA, 2004).

Los raster poseen una resolución (R) de acuerdo al sensor satelital que los adquiere, interpretado gráficamente en la Figura 4. Estará en función de: i) la frecuencia de tiempo con que el satélite pase por el mismo punto en la tierra, dentro de su órbita (R. temporal); ii) las bandas espectrales que permita captar el sensor (R. espectral); iii) el área real que representa un píxel en la superficie terrestre (R. espacial) y, iv) la

cantidad de niveles digitales (ND) que permita captar el sensor (R. radiométrica). En relación a lo anterior, existen sensores de baja resolución, como es el caso de los enviados en las primeras misiones al espacio, que captan una gran superficie de una sola vez utilizados para el estudio de los fenómenos meteorológicos y algunos fenómenos naturales como lo son, METEOSAT, GOES y NOAA-AVHRR. Luego, sensores de una resolución intermedia dedicados específicamente para la observación de los recursos naturales, como los del programa LANDSAT; en sus versiones 1, 2, 3, 4, 5 y 7. Y finalmente, los hay de alta resolución los cuales son destinados para estudios con alto nivel de detalle, como los son EARTHWATCH, IKONOS y QUICKBIRD (CHUVIECO, 2002; NASA, 2004). En la Figura 4 se esquematizan los tipos de resolución con respecto a algunos sensores satelitales.

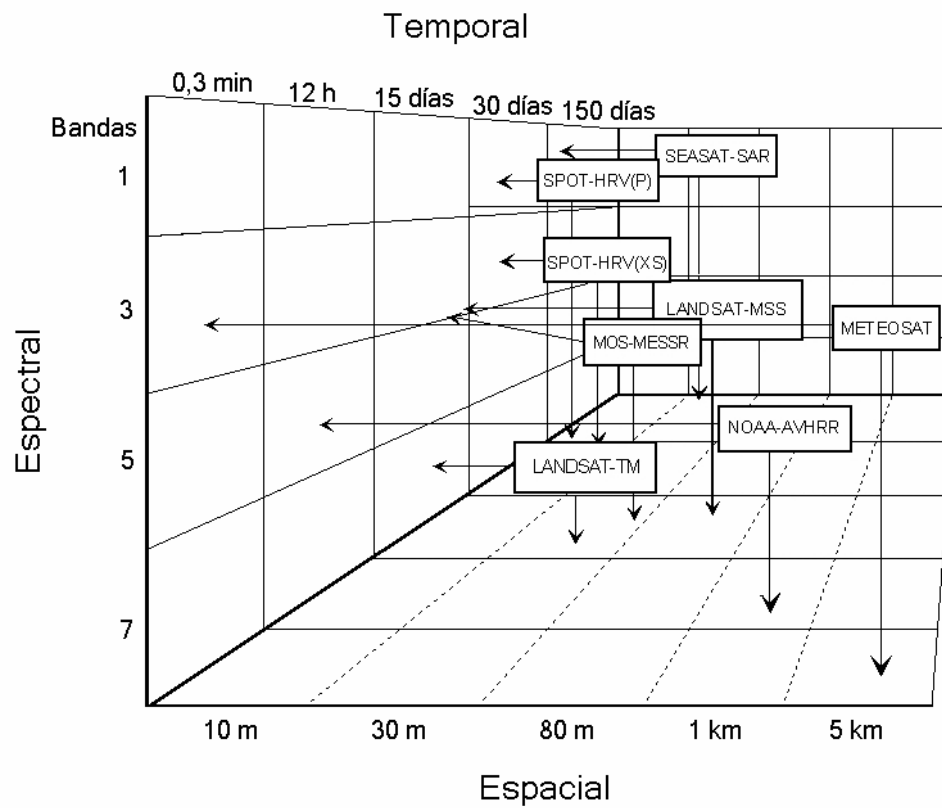


FIGURA 4. Sensores satelitales y sus diferentes resoluciones según su propósito (Fuente: Chuvieco, 2002).

El proceso de selección de una imagen con una resolución determinada por algún usuario dependerá de las necesidades que éste tenga, según su variable de estudio y el nivel de detalle requerido. No obstante, una de las principales ventajas que ofrece el estudio de la superficie terrestre mediante estos métodos, es su alto costo-beneficio respecto a otros, como son los censos y catastros. Cabe señalar que mientras mayor sea la resolución de estas imágenes, mayor es el costo que representa para el usuario (CHUVIECO, 2002).

Las plataformas –satélites– donde están montados los sensores pueden ser “móviles”, conocidas como las que tienen una órbita heliosíncrona. Su movimiento es de Norte a Sur, perpendicular a la línea del ecuador tomando como referencia los polos. Los cálculos de altura y velocidad de éstas, son ajustados para que ellos “observen” una porción de la tierra a una hora solar fija. En general, están representados por los de resolución media y alta. Además existen los satélites “no móviles” o geoestacionarios, los que se ubican en órbitas muy alejadas del ecuador, con el objetivo de sincronizarse con la velocidad de rotación de la tierra y además tener un gran campo de observación (CHUVIECO, 2002).

2.4.1.3 Programa espacial Landsat

A fines de la década de los sesenta la agencia espacial de los EE. UU., NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), diseña el primer proyecto dedicado a la cartografía y evaluación de los recursos naturales terrestres mediante satélites artificiales desde el espacio, llamado Landsat. El primer satélite de la serie ETRS (*Earth Resources Technology Satellite*) fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972 (CHUVIECO, 2002; NASA, 2004). Sin duda alguna, ha sido el programa satelital más fructífero hasta el momento, manteniendo la vigencia actual con su séptima versión, la más reciente, enviado el 15 de abril de 1999 –Landsat 7 (NASA, 2004). Las plataformas de la familia Landsat son originalmente siete, de los cuales la versión número 6 se perdió poco después de su lanzamiento, razón por la cual nunca fue utilizado (NASA, 2004). El éxito del programa se debe principalmente por la alta resolución que presentan las imágenes y el carácter tanto global como periódico que representa la adquisición de la información. Solo hasta el año 1980 las imágenes adquiridas por usuarios eran alrededor de 385.000 y las recibidas por las estaciones terrestres, en distintos lugares del mundo ascendían a más de 550.000 ejemplares (CHUVIECO, 2002). Su operación es administrada por NASA y la producción tanto como la comercialización de imágenes, depende del USGS (*United States Geological Survey*) (NASA, 2004).

Los satélites Landsat han observado la tierra y recolectado información por más de 30 años para el estudio del ambiente y sus cambios (NASA, 2004). Estudios de la cubierta terrestre mediante esta tecnología demuestran que las imágenes de estos sensores son de mucha utilidad y confiabilidad al momento de identificar áreas (PRINS & KIKULA, 1996).

Ya que en la metodología propuesta por esta investigación se utilizan como base del análisis imágenes de satélites Landsat 5 y 7, se describirán en detalle los sensores montados en éstas plataformas:

i) Landsat 5. Puesto en órbita el 1 de marzo de 1984. Transporta un sensor multiespectral pasivo de barrido, denominado TM (*Thematic Mapper* ó mapeador temático) con una captura de datos en siete bandas. Fue diseñado, como su nombre lo indica para la cartografía temática. Las imágenes captadas presentan algunas modificaciones con respecto a sus antecesores, como la altura de vuelo (705 Km), comparado con el anterior que tenía 200 Km más de altura. Esto permitió disminuir el periodo orbital a 98,9 minutos, lo que mejora el ciclo de recubrimiento a 16 días, de 18 que demoraba el Landsat 4 (CHUVIECO, 2002).

ii) Landsat 7. Lanzado en abril del 1999. El principal avance que presenta este con respecto al anterior, es la incorporación de una banda pancromática de 15 metros de resolución. Por esta razón el sensor, también de barrido, es denominado ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper plus*). El resto de las bandas tiene la misma resolución del sensor anterior (CHUVIECO, 2002).

2.4.1.4 Bandas espectrales

Es necesario destacar las longitudes del espectro electromagnético relevantes en la percepción remota. Estas son las siguientes: Espectro visible (0,4 a 0,7 μm); Infrarrojo cercano (IRC, 0,7 a 1,3 μm); Infrarrojo medio (1,3 a 8 μm); Infrarrojo lejano o térmico (IRT, 8 a 14 μm); Microondas (M, por encima de 1 mm) como lo muestra la Figura 5 (CCRS, 2002).

El instrumento TM en el Landsat 5 y el ETM+ 7, observan la tierra mediante siete bandas espectrales en común. Cada una de éstas es sensible a una parte de la energía solar reflejada de la superficie terrestre en forma de luz –rango de longitud de onda. En el Cuadro 2, se muestran las primeras siete bandas comunes entre los sensores TM y ETM+ y sus características.

CUADRO 2. Bandas espectrales comunes en los sensores Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+.

Banda / long. onda	Nombre	Utilización
1 / (0,4-0,5 μ m)	Azul	Se usa para discriminar suelo de vegetación, mapeo de zonas costeras.
2 / (0,5-0,6 μ m)	Verde	Utilizada para la identificación de centros poblados.
3 / (0,6-0,7 μ m)	Rojo	Discriminación entre vegetación y otro tipo de coberturas; límites de tipologías de suelos y delimitaciones geológicas.
4 / (0,7-1,2 μ m)	Infrarrojo cercano	Detectar y analizar vegetación en un área. Enfatiza el contraste de zonas de agua – tierra (suelo – vegetación). Sensible al agua.
5 / (1,55-1,75 μ m)	Infrarrojo de onda corta	Discriminar entre especies de vegetación, nubes, nieve y hielos. Gran sensibilidad al agua.
6 / (5,0-14,0 μ m)	Termal Infrarrojo	Observaciones de temperatura y sus efectos, densidad de vegetación, humedad y tipo de cobertura.
7 / (2,08-2,35 μ m)	Infrarrojo medio	Discriminación de tipos de rocas y suelos, así como el contenido de humedad en los suelos y en la vegetación.

Fuente: NASA, 2004

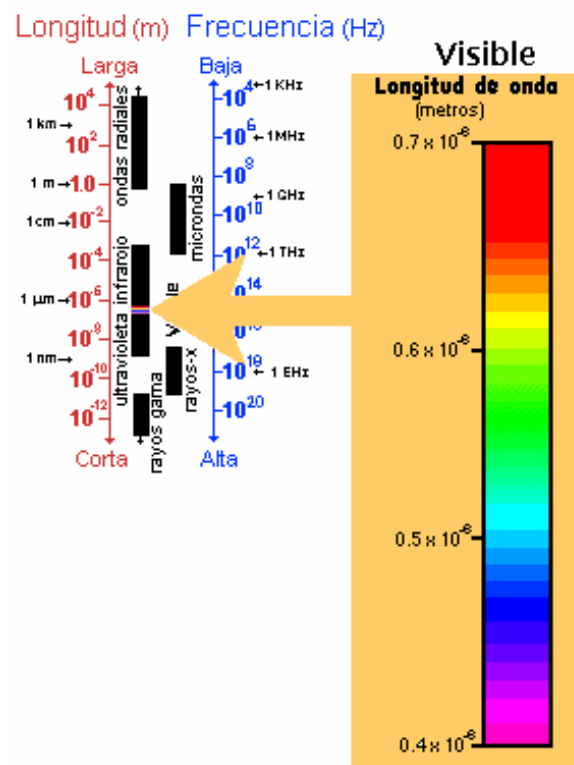


FIGURA 5. Espectro electromagnético (Fuente: CCRS, 2004).

Los distintos elementos de la superficie terrestre tienen distintas respuestas energéticas frente a una fuente de mayor de ésta, como el sol. A éstas se les conoce como firmas espectrales y cada elemento tiene uno propio. Un ejemplo es la vegetación, la cual refleja con mayor intensidad en las longitudes de onda del infrarrojo cercano (IRC) y menor en longitudes de onda roja (R), como se observa en el gráfico de la Figura 6. En el caso contrario, el agua, las nubes y la nieve reflejan con mayor intensidad en las longitudes de onda de la banda R y menor en la IRC. Otro caso, son las áreas pedregosas y suelo desnudo en que las respuestas de reflectancia son similares en las dos bandas (NASA, 2004). Es así como, no solamente se puede interpretar algún elemento mediante una sola banda, sino también a través de la combinación de éstas. Es el caso del vigor de la vegetación, que se puede interpretar adecuadamente mediante una relación o cociente entre las bandas R e IRC.

Por intermedio las relaciones señaladas anteriormente, es posible estimar diversos parámetros de la cubierta vegetal, tales como: el contenido de clorofila en las hojas, el contenido de agua en las hojas, flujo neto de CO_2 , radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta, productividad neta de la vegetación, índice de área foliar, cantidad de lluvia recibida por el dosel vegetal, dinámica fenológica, evapotranspiración potencial, etc. Para la medición directa en las imágenes es necesario utilizar una relación determinada de acuerdo a la variable en estudio (CHUVIECO, 2002; FOODY y BOYD, 2005).

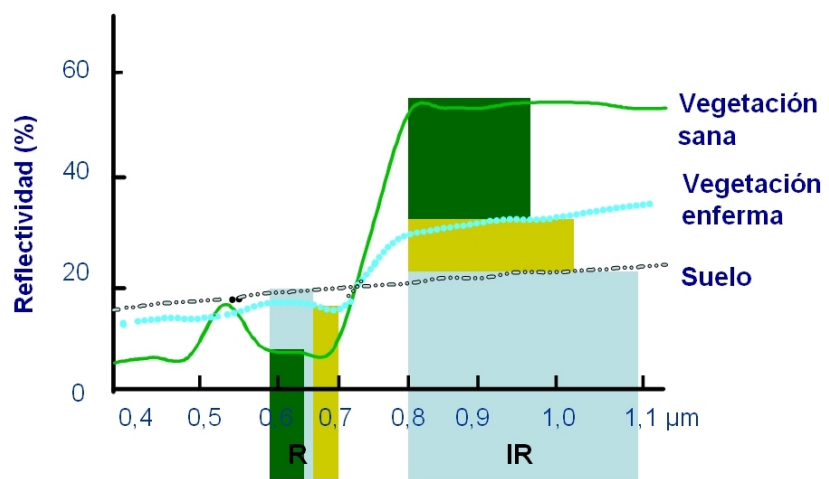


FIGURA 6. Porcentaje de reflectividad versus bandas R e IR (Fuente: Chuvieco, 2002).

2.4.2 Procesamiento de imágenes

2.4.2.1 Correcciones geométricas y radiométricas

Uno de los requisitos previos al análisis de cualquier imagen, y más aun, de distinta fecha de adquisición, es eliminar en la medida de lo posible cualquier distorsión ajena a la variable en estudio de la escena. Estos inconvenientes se resuelven principalmente mediante dos tipos de ajustes: i) geométrico y, ii) radiométrico (CHUVIECO, 2002; TARDIE, 2004; JENSEN y JACKSON, 2005).

i) *Ajuste geométrico*: Consiste básicamente en verificar la georeferencia espacial de la información a utilizar. Así, ésta tendrá una proyección y un sistema de referencia estandarizado lo que permite compararla. Por otra parte, si se esta comparando dos o más imágenes, estas deberán ser iguales en cuanto a su tamaño y número de píxels, de tal manera que se este comparando, por ejemplo, exactamente el mismo sitio en ambas imágenes. Esta labor es vital, ya que mientras mejor sea el ajuste, la comparación será de mayor fidelidad.

ii) *Ajuste radiométrico*: Este procedimiento se realiza con el objeto de homogenizar los elementos dentro de las imágenes, ya sea para el procesamiento individual o de distintas fechas de adquisición. Consiste en eliminar de la imagen cualquier “ruido” atmosférico o propio de la lectura del sensor. Los cuales pueden ser: nubosidad, humo o neblina local en el momento de adquisición de la imagen. De esta manera la comparación ofrecerá mayor certeza.

Posteriormente a la corrección, ya están listas para los procesos que requiera el usuario final. De los cuales existen muchos y para distintas utilidades. Dentro de las

más comunes se encuentra el mapeo de la vegetación, para lo cual las imágenes multiespectrales son muy convenientes a la hora de reconocer los distintos tipos de esta. En esta revisión se destacan dos tipos de procesamiento, utilizadas comúnmente para el reconocimiento y caracterización de la vegetación (CHUVIECO, 2002).

2.4.2.2 Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index, NDVI*)

No obstante, existen muchos índices para el estudio de cubiertas vegetales, uno de los más comunes, por su facilidad de interpretación y cálculo es el NDVI. Éste modelo logra diferenciar las conductas espectrales entre la vegetación vigorosa, bajo vigor, muerta y suelo desnudo; realizando un cociente entre la diferencia de las bandas R - IRC y la sumatoria de ambas (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004). Los cálculos para cada píxel de las imágenes, siempre producen un valor que va de menos uno (-1) a más uno (+1). Donde, las áreas de vegetación darán generalmente los valores positivos; el agua, las nubes, y la nieve los negativos del índice; y, las áreas pedregosas y suelo desnudo tienen los valores cercanos a cero. Este último valor significa que no hay ninguna vegetación presente y cerca de +1 (0.8 - 0.9) indica probablemente una alta densidad de hojas verdes (NASA, 2004).

2.4.2.3 Clasificación digital de imágenes

Consiste principalmente en obtener una nueva imagen con distintos temas, a partir de la multibanda obtenida por el sensor. La información de cada píxel es el resultado de una composición de múltiples bandas y muestran una clasificación de algún(os) elemento(s) en particular, con una característica determinada. El procesa-

miento propiamente tal se realiza mediante rutinas de computador, el cual compara todos los píxels de variadas bandas y mediante relaciones estadísticas agrupa los similares de acuerdo a su firma espectral.

Los clasificadores se dividen en dos grupos: i) con supervisión; y, ii) sin supervisión. Los primeros son clasificaciones basadas en algoritmos realizados por un programa, previa información entregada por el operario. Esto se realiza mediante la elaboración de “sitios de entrenamiento”, los cuales son zonas delimitados en la imagen, en donde se tiene la certeza de lo que realmente existe in-situ y en el momento de adquisición. Posteriormente el sistema computacional es capaz de relacionar esta información y reconocerla en la imagen completa. Los segundos realizan la misma operación matemática que los anteriores, sin embargo no es necesario ingresar previa información al sistema. Ambas rutinas realizan una clasificación en base a modelos estadísticos, agrupando la información en distintas clases.

Los criterios más comunes para establecer estas fronteras estadísticas entre clases son: i) mínima distancia, donde al píxel se le asigna el valor de la clase más cercana; ii) paralelepípedos, que agrupan las clases en los rangos máximos y mínimos de acuerdo al tipo de clasificación; iii) máxima probabilidad, en donde al píxel se asigna a la clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia.

Dentro de la percepción remota, el proceso de clasificación digital, es ampliamente conocido para la confección de cartografía o inventarios temáticos de la superficie terrestre. La clasificación digital no busca una definición absoluta de cada cubierta, sino una caracterización relativa válida para una determinada imagen y una cobertura en concreto (CHUVIECO, 2002).

2.4.2.4 Detección de cambios

Este es un concepto basado principalmente en el estudio de los cambios ocurridos en una cubierta terrestre en el tiempo. Como cada banda de las imágenes son un conjunto de píxels con valores propios conformando una matriz, estas pueden ser manipuladas con procesamientos matemáticos básicos. Una simple resta entre imágenes permite discriminar zonas que han experimentado algún cambio. Las zonas estables presentaran un valor cercano al cero, mientras que las que hayan experimentado algún cambio serán valores positivos o negativos. Fruto del cálculo se obtiene una imagen con valores positivos (tonos claros), negativos (tonos oscuros) y estables, que no representan gran cambio (CHUVIECO, 2002)

2.4.3 Sistemas de Información Geográfica, SIG

Junto con el procesamiento de imágenes satelitales se asocia directamente el uso de los SIG, los cuales permiten el manejo de datos con una referencia espacial o denominada en el lenguaje específico 'georeferencia' (CHUVIECO, 2002). Estos sistemas operan mediante modelos, los cuales permiten relacionar diferentes variables espaciales además de representarlas gráficamente (CAPUC, 2004). Una de las aplicaciones más importantes que tienen los SIG es la creación de grandes bases de datos con georeferencia. Esto permite, entre otras funciones, identificar geográficamente un atributo temático en particular de alguna localización en específica (BOSQUE, ESCOBAR, GARCÍA y SALADO, 1994; CEBRIAN, J. 1998; SAG, 2004).

Como información esencial los SIG trabajan con "coberturas o, estratos o *layers*" de información. Estas, contienen información geográfica de algún sector como cartografía, puntos determinados o mapas temáticos de algún elemento. Generalmente asociado a estos se encuentra una base de datos en un formato tabulado la cual

contiene atributos identificados. Los *layers* pueden ser de dos tipos: i) modelo de datos vectorial, el cual interpreta un objeto geográfico de la realidad, a través de sus límites o fronteras con el exterior mediante polígonos, líneas o puntos. Las distintas unidades temáticas se definen por las coordenadas de sus vértices; y, ii) modelo de datos raster, como se señaló anteriormente en el capítulo 3.4.1, en términos simples, son una codificación que realiza un computador de una cobertura vectorial, asignando las fronteras mediante un código en la matriz de datos (BOSQUE *et al.*, 1994).

La utilidad más importante de los SIG es la relación que se puede hacer entre las distintas coberturas de información. Esto es realizado por intermedio de intersecciones entre ellas y sus bases de datos respectivas. Mediante éstas se genera una nueva información que contiene las variables en estudio, representada gráficamente como se muestra en la Figura 7 (BOSQUE, ESCOBAR, GARCÍA y SALADO, 1994; KORTE, 2001).

La integración de los SIG con la percepción remota tiene una gran posibilidad de aplicación en la agricultura, desde niveles prediales, regionales hasta nacionales (PRADOS, 1995). A modo de ejemplo se puede identificar el área exacta de un suelo cubierto por vegetación en una fecha determinada, mapeo de áreas temáticas como la salinidad (METTERNICHT, 2001), cartografía de caminos entre otras diversas aplicaciones para el estudio del ambiente (CHUVIECO, 2000). Estas aplicaciones son de vital importancia al momento de planificación y gestión del territorio.

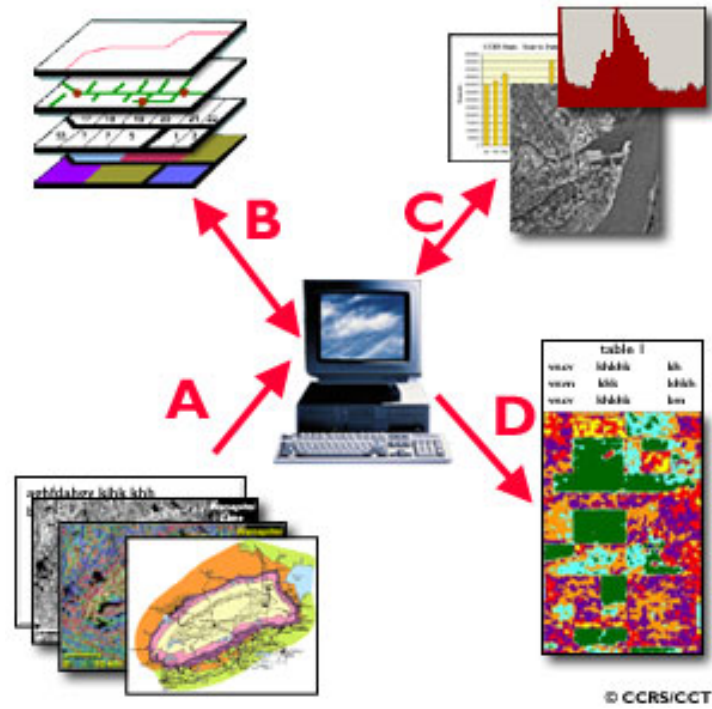


FIGURA 7. Funcionamiento del SIG. A y B son entradas de información independiente (*layers*). Luego, mediante procesos computacionales que relacionan dichos *layers*, se logra nueva información. Esta puede ser vectorial (B), tabulada (C) o raster (D) (Fuente: CCRS, 2004).

2.4.4 Sistemas de posicionamiento global, GPS

GPS es la abreviatura de NAVSTAR GPS (*Navigation System with Time And Ranging Global Positioning System*), lo que significa Sistema de Posicionamiento Global con Sistema de Navegación por Tiempo y Distancia. Es un concepto de ubicación geográfica que permite determinar en cualquier momento y bajo cualquier condición atmosférica una posición precisa en cualquier punto de la superficie terrestre. Se compone de un sistema basado en una constelación de 24 satélites artificiales en seis planos orbitales a 20.000 km de altitud. A través de una triangulación de ellos, envían la información a un receptor terrestre. La 'precisión' de los datos dependerá del tipo de receptor que se utilice y la actividad que se realice, como esta herramienta fue concebida para fines militares del gobierno de los EE. UU., solo ellos tenían la precisión exacta de la ubicación. Con el tiempo se fueron desarrollando opciones para aplicaciones civiles tales como excursión, topografía, medición de áreas, navegación marina, construcción y otras actividades que contemplen la necesidad de ubicación geográfica (LEICA, 1999). Existen diferentes métodos para obtener una posición empleando este sistema:

Navegación Autónoma, empleando un receptor simple. La precisión de la posición es mejor que 100 m para los usuarios civiles y alrededor de 20 m para usuarios militares (LEICA, 1999).

Posicionamiento Diferencial de Fase, en que la precisión aumenta a 0,5 – 20 mm. Utilizada principalmente para trabajos de topografía (LEICA, 1999).

Posicionamiento Diferencial Corregido, conocido como DGPS, éste proporciona precisiones del orden de 0,5 – 5 m. Se utiliza principalmente para la adquisición de datos para los SIG (LEICA, 1999).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Antecedentes:

La percepción remota y la aplicación de los SIG esta abarcando cada vez más posibilidades de aplicaciones en el estudio de procesos naturales. Uno de estos, ampliamente descrito por la comunidad científica es el reconocimiento y el mapeo de la vegetación, entre ellas por ejemplo se han empleado para estimar los niveles de biomasa de diferentes cultivos y praderas, para estimar el crecimiento de bosques, para la ubicación y estimación de áreas más susceptibles a incendios, en la obtención de estadísticas agrícolas, para evaluar el manejo y crecimiento del maíz (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max*) o trigo (*Triticum aestivum* L.), situaciones de sequía, incidencia de enfermedades, determinar la fenología de bosques y cultivos, estimar la humedad de la zona radicular, evaluar la fotosíntesis y eficiencias estomáticas, medir índice foliar y fracción de radiación fotosintética activa que es interceptada, monitoreo de la evapotranspiración y la biomasa, entre otros (NOVOA y HERRERA, 2001).

Dentro de las técnicas más utilizadas se encuentra la detección de cambios mediante imágenes Landsat, ya que por su globalidad ha permitido entender la gran dinámica de las coberturas vegetales en los últimos 20 años de todo el planeta (ROGAN, FRANKLIN y ROBERTS, 2001; BEKTAS, F y GOKSEL, 2004). Algunos autores señalan que esta tecnología es de gran utilidad para el seguimiento de sectores bajo regadío en grandes extensiones (PRADOS, 1995). En el mismo marco, investigaciones de mayor envergadura han mostrado resultados excelentes en la evaluación del cambio del uso del suelo, como es el caso de un proyecto boliviano en donde se utilizaron 56 imágenes Landsat. Las conclusiones manifiestan que en 23 años la deforestación en ese país se triplicó (LA PRENSA, 2005).

Aunque, ciertos autores señalan que los resultados no han sido lo suficientemente satisfactorios dado el detalle requerido por alguno de ellos, el problema podría ser resuelto aumentando la resolución espacial de las escenas, mediante la utilización de otras imágenes disponibles (RIDD y LIU, 1998; CAPRIOLI y TARANTINO, 2004). Por otra parte, hay otros que mencionan la necesidad de un rango mínimo de años para la comparación entre dos imágenes, utilizando ‘detección de cambios’. Los que no deberían pasarse de entre 10 y 15. Sin embargo, este concepto es muy reciente aun y no se tienen suficientes referencias (LUNETTA *et al.*, 2004).

3.2 Información de base:

3.2.1 Imágenes Landsat

En la selección de imágenes a utilizar en el presente, se tomó en cuenta una importante consideración descrita por algunos autores, la cual permite mayor exactitud en el análisis de detección de cambios entre dos o más de estas. Ellos coinciden que la época –estación del año– de adquisición de las anteriores por el sensor espacial debe ser similar entre las distintas fechas a estudiar. Lo que permite reducir efectos temporales, que producirían falsa información en la comparación de imágenes (*i.e.* nubosidad, humedad en el suelo, vigor vegetacional y el efecto provocado por el ángulo solar en distintas estaciones del año) (ROGAN, FRANKLIN y ROBERTS, 2001; TARDIE, 2004).

Como la variable en estudio considera la superficie de cultivos bajo riego, la característica estacional de las imágenes es muy favorable. Se produce un gran contraste de los cultivos regados versus los que no lo están, dado por la respuesta espectral que presenta la clorofila en las bandas R (Rojo) e IR (Infrarrojo). Los cloroplastos en

las hojas absorben la luz roja por las características propias de pigmentación de estas. En contraste el mesófilo en las mismas refleja hacia el sensor, luz infrarroja dado a la sensibilidad al agua que presentan (CHUVIECO, 2002; CCRS, 2004; FARIAS y NUÑEZ, 2004). Estudios anteriores señalan que la mejor época para realizar este tipo de monitoreos es la estación seca, ya que la tasa fotosintética de los cultivos bajo riego es alta (PRINS & KIKULA, 1996).

Se utilizó una imagen de 1986 y otra del 2003. En el Cuadro 3 se destacan las principales características de cada una.

CUADRO 3. Comparación de los principales elementos contenidos en los sensores Landsat 5 y Landsat 7.

	1986	2003
Tipo de sensor	TM	ETM+
Satélite	LANDSAT 5	LANDSAT 7
Resolución espacial	30 m	30 m
Resolución temporal	16	16
Número de Bandas	7	8
Rango espectral	0,45 – 12,5 μm	0,45 – 12,5 μm
Altitud	705 kms	705 Km
Tamaño imagen	185 x 172 Km	183 x 170 Km
Código Escena (Path/Row)	233/083	233/083
Fecha de la imagen	22 de Abril de 1986	19 de Enero del 2003

3.2.2 Cartografía de apoyo

La cartografía utilizada en el estudio, como base para la georeferencia de imágenes a un sistema de coordenadas definido, así como para la delimitación del área de estudio y la generación de un modelo de elevación digital representación cartográfica del área de estudio fue:

- 1) Cartografía Nacional IGM 1:50.000 en formato digital con sus temas: vías, hidrografía, curvas de nivel, elevación y límites.

- 2) Cartografía de Canales de la Provincia de Quillota en formato digital, obtenida la Comisión Nacional de Riego.

3.3 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la provincia de Quillota, V región de Chile. En la Figura 8 A, se observa la V región ubicada en la zona centro. La región limita al este con Argentina y al este con el océano pacífico Figura 8 B. En la provincia de Quillota, que se ubica en centro de la región, se destacan las mayores altitudes hacia el oeste y las menores al suroeste Figura 8 C.

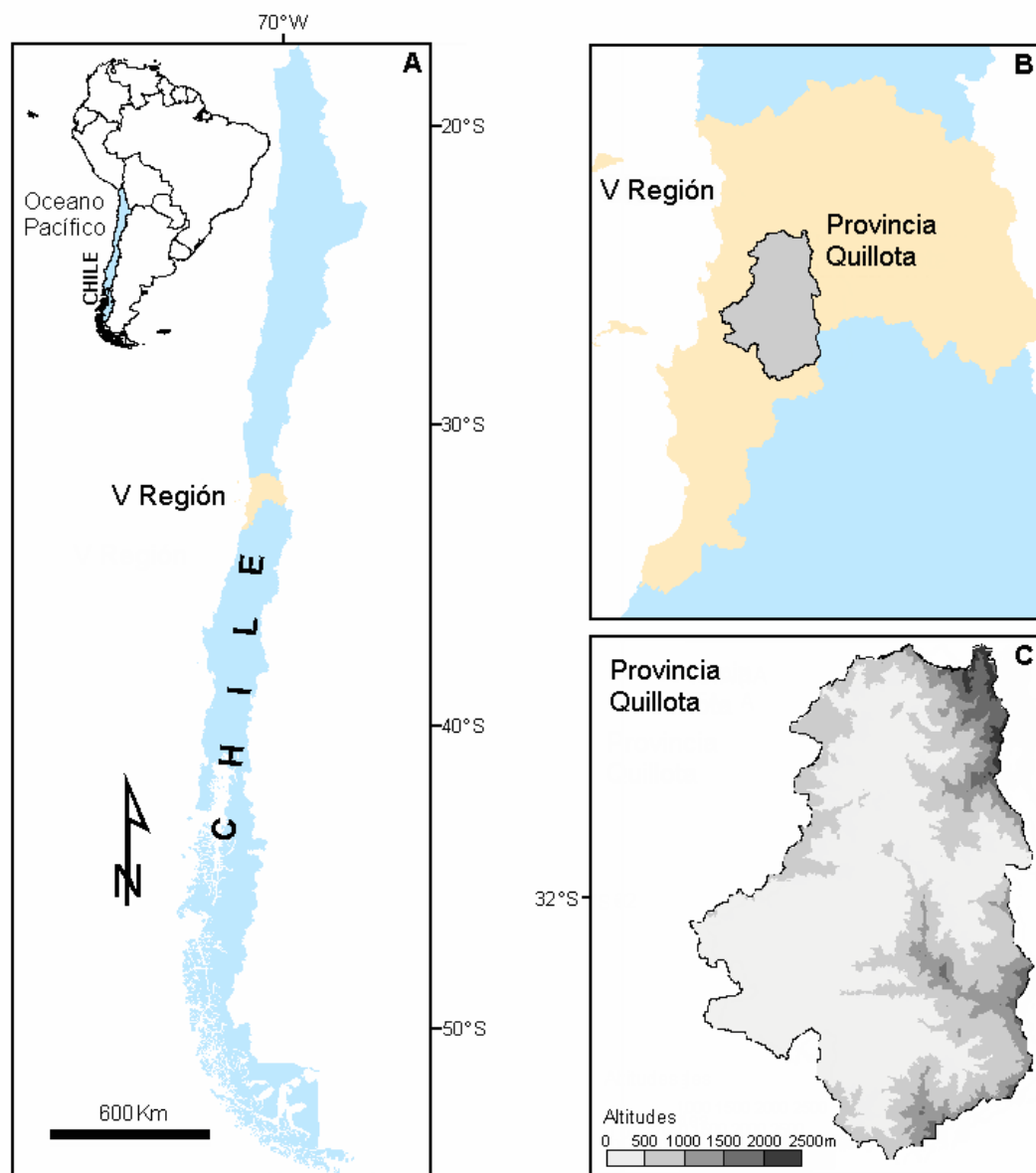


FIGURA 8. Presentación del área de estudio. A) Chile B) V Región C) Altitudes de la provincia y cuenca de Quillota.

3.4 Modelo de elevación digital (*Digital Elevation Model; DEM*):

Como el estudio, en este caso involucra zonas con altitudes y pendientes, se generó un DEM de la cuenca de Quillota, basado en cartografía de curvas de nivel y puntos de elevación. Éste fue realizado mediante interpolación espacial a partir de curvas de nivel cada 25 m.

Mediante el DEM, se generó una carta de pendientes de acuerdo a las variables de fragilidad de suelo según capacidad de uso y normativas actuales (SCHLATTER, GREZ y GERDING, 2003). Según la clasificación de capacidad de uso del suelo los suelos arables son de la clase I a IV, la cual considera pendientes aproximadas al 8 %. Por otra parte, normas jurídicas (D.S. 193, de 1998, del Ministerio de Agricultura; Ley de bosques) mencionan que un suelo es catalogado como frágil cuando tiene una valor igual o superior al 15 % de pendiente (CONAF, 2004).

3.5 Delimitación del área de estudio:

Utilizando la cartografía oficial y la imagen de 1986, se digitalizó la provincia y cuenca de Quillota. Así mismo, con la cartografía de la red de canales se digitalizó la cota de canal más alta. Para ambas operaciones, se utilizó el SIG TNT mips.

Posteriormente, al relacionar estas dos capas de información se obtuvo la carta que contiene el área de estudio, que comprende desde la cota de canal más alta, en la provincia de Quillota, hasta el límite de la cuenca, el cual corresponde a la línea divisoria de aguas. En otras palabras, el área de estudio esta conformado por la superficie de la cuenca excluyendo el área bajo cota canal.

3.6 Procesamiento de imágenes:

Para todo el procesamiento de las imágenes se contó con el apoyo del departamento de geomática del Instituto de Geografía, PUC.

La información original se transformó a un formato compatible con los programas disponibles. Para el procesamiento vectorial se utilizó el SIG TNTmips y para el tratamiento digital de las imágenes el SIG Idrisi. (TARDIE, 2004). Estos se pueden separar en dos:

3.6.1 Corrección geométrica

Utilizando como base cartografía digital IGM de drenajes y caminos, en coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator), se georeferenció la imagen de 1986. A partir de esta, se georeferenció la del 2003, proceso llamado georeferencia *raster to raster*. Con el fin de homogenizar el tamaño de ambas imágenes, se remuestrearon mediante una rutina del SIG Idrisi según el modelo del vecino más cercano.

3.6.2 Índice de vegetación

3.6.2.1 Corrección radiométrica

El proceso de corrección radiométrica se realizó exclusivamente para las bandas tres y cuatro, las cuales se utilizaron para el cálculo de NDVI. Para eliminar la dispersión atmosférica, dada principalmente por la interacción de gases y partículas en

suspensión, se utilizó el método del píxel más oscuro. El proceso se realizó mediante interpretación visual del histograma de las bandas tres y cuatro de cada año. El histograma muestra gráficamente la frecuencia (nº de celdas) que poseen los distintos valores contenidos en la imagen. En el eje X, están los valores posibles de los píxels (0-255; 0-1024), y en el eje Y, se encuentra la cantidad de celdas con los valores anteriores. Al ser desplegado, en cualquier imagen satelital, los valores nunca comienzan desde el cero (0), como deberían. Por lo tanto, se estima que los valores mínimos contenidos en esta son representados por la dispersión atmosférica (FARIAS y NUÑEZ, 2004).

Para comprobar la eficacia del procedimiento se compararon los valores eliminados con el modelo de dispersión atmosférica teórica a distintas longitudes de onda realizado por Campbell en 1987, como se muestra en la Figura 9 (CHUVIECO, 2002).

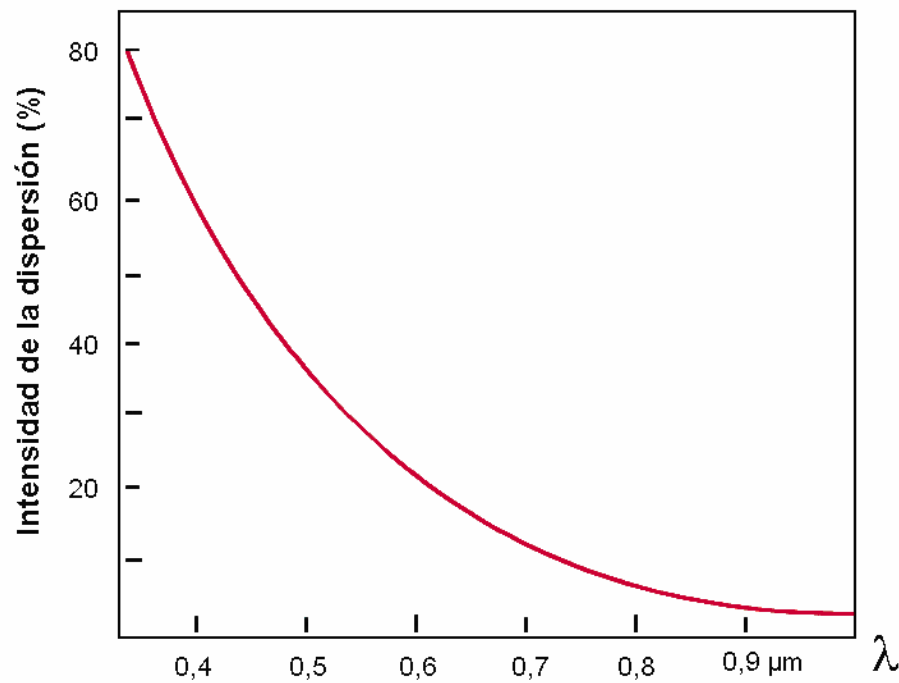


FIGURA 9. Dispersión atmosférica teórica en el rango de las longitudes de onda de los sensores Landsat. (Fuente: Chuvieco, 2002).

Para reducir los efectos de temporalidad de las bandas, y con el fin de hacerlas comparativas entre ellas, se estandarizaron convirtiendo los ND (Niveles Digitales) en valores absolutos de reflectancia solar mediante el método COST descrito por Chavez en 1988 (CHUVIECO, 2002; TARDIE, 2004). Es decir que los valores de cada píxel fueron transformados en unidades energéticas que realmente reflejan los objetos desde la tierra. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho_{BandN} = \frac{\pi((L_{BandN} * Gain_{BandN} + Bias_{BandN}) - (H_{BandN} * Gain_{BandN} + Bias_{BandN})) * D^2}{E_{BandN} * (COS((90 - \theta) * \pi / 180)) * \tau}$$

Donde,

ρ_{BandN}	=	Valor de reflectancia para la banda N
L_{bandN}	=	Valor de nivel digital para la banda N
H_{bandN}	=	Banda N obtenida luego de eliminación de dispersión atmosférica
D	=	Distancia Normalizada entre la tierra y el sol
E_{bandN}	=	Irradiancia solar para la banda N
τ	=	Tramitancia atmosférica expresada como $(COS((90 - \theta) * \pi / 180))$

Los datos para ejecutar la fórmula se obtuvieron de la información auxiliar contenida en cada imagen (pendiente, intercepto y ángulo solar) y del sitio WEB del sensor respectivo (distancia tierra-sol e irradiancia solar) (NASA, 2004).

3.6.2.2 Cálculo de NDVI

Existen numerosos índices para evaluar la condición vegetal mediante imágenes satelitales, entre éstos se conocen: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), GVI (*Green Vegetation Index*), PCR (*Plant Cell Radio*), PVR (*Photosynthetic Vigour*

Ratio), PPR (*Plant Pigment Ratio*) y el DVI (*Difference Vegetation Index*). A pesar de ello, numerosos autores coinciden que el NDVI es el más utilizado (PRADOS, 1995; JENSEN, 1996; NOVOA y HERRERA, 2001; ROGAN, FRANKLIN & ROBERTS, 2001; CHUVIECO, 2002). Para el cálculo del NDVI, de cada año, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{Banda 4} - \text{Banda 3}) / (\text{Banda 4} + \text{Banda 3})$$

3.6.2.3 Detección de cambios

Se utilizó el método de la diferencia de imágenes, el cual es muy recurrente detectar los cambios en grandes extensiones de territorio y provee menores errores cuando se compara con otros métodos (TARDIE, 2004; JENSEN & JACKSON, 2005). Para este caso, se restó la imagen de NDVI de 1986 a la del 2003.

3.6.3 Clasificación de imágenes

Dentro de las técnicas de clasificación existen i) sin supervisión y ii) con supervisión. La primera es completamente automática, donde un sistema computacional genera categorías basado en la agrupación de valores espectrales; mientras que la segunda, que es parcialmente automatizada, permite seleccionar categorías seleccionadas por un especialista (FARIAS y NUÑEZ, 2004).

Para este caso se utilizó el método de clasificación supervisada identificando cinco elementos, los cuales constituyeron las clases: agua, cultivos bajo riego, vegetación nativa, sombra, suelo desnudo.

Para la identificación de los sitios de entrenamiento se utilizó una composición de bandas espectrales que destaca la vegetación regada de la no regada. Para ambas imágenes se desplegaron las bandas cuatro (infrarrojo cercano), tres (rojo) y dos (verde) compuestas. Esta composición de bandas es denominada falso color, la cual resulta muy útil para el mapeo de la vegetación bajo riego, por el contraste que se aprecia en ellos con respecto a los otros tipos de vegetación (CHUVIECO, 2002).

Se aplicaron los modelos de clasificación i) de la mínima distancia y, ii) de máxima probabilidad para ambas imágenes.

4. PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados:

4.1.1 Provincia de Quillota

En la Figura 10, se muestran los límites de la cuenca de Quillota, los cuales coinciden con el límite administrativo de la provincia homónima. También, se observan los centros poblados con mayor importancia. Estos se relacionan estrechamente al río Aconcagua, el que provee la principal fuente de agua para la agricultura de la provincia.

Asociado al río se observan las zonas con mayor cantidad de vegetación, en la Figura 10, las cuales corresponden mayoritariamente a predios agrícolas. Se visualiza que la ciudad de Quillota es la que presenta una mayor superficie con sitios destinados a la producción agrícola.

La superficie resultante del área delimitada, calculada mediante procesos digitales del SIG Idrisi, es de 164.000 ha.

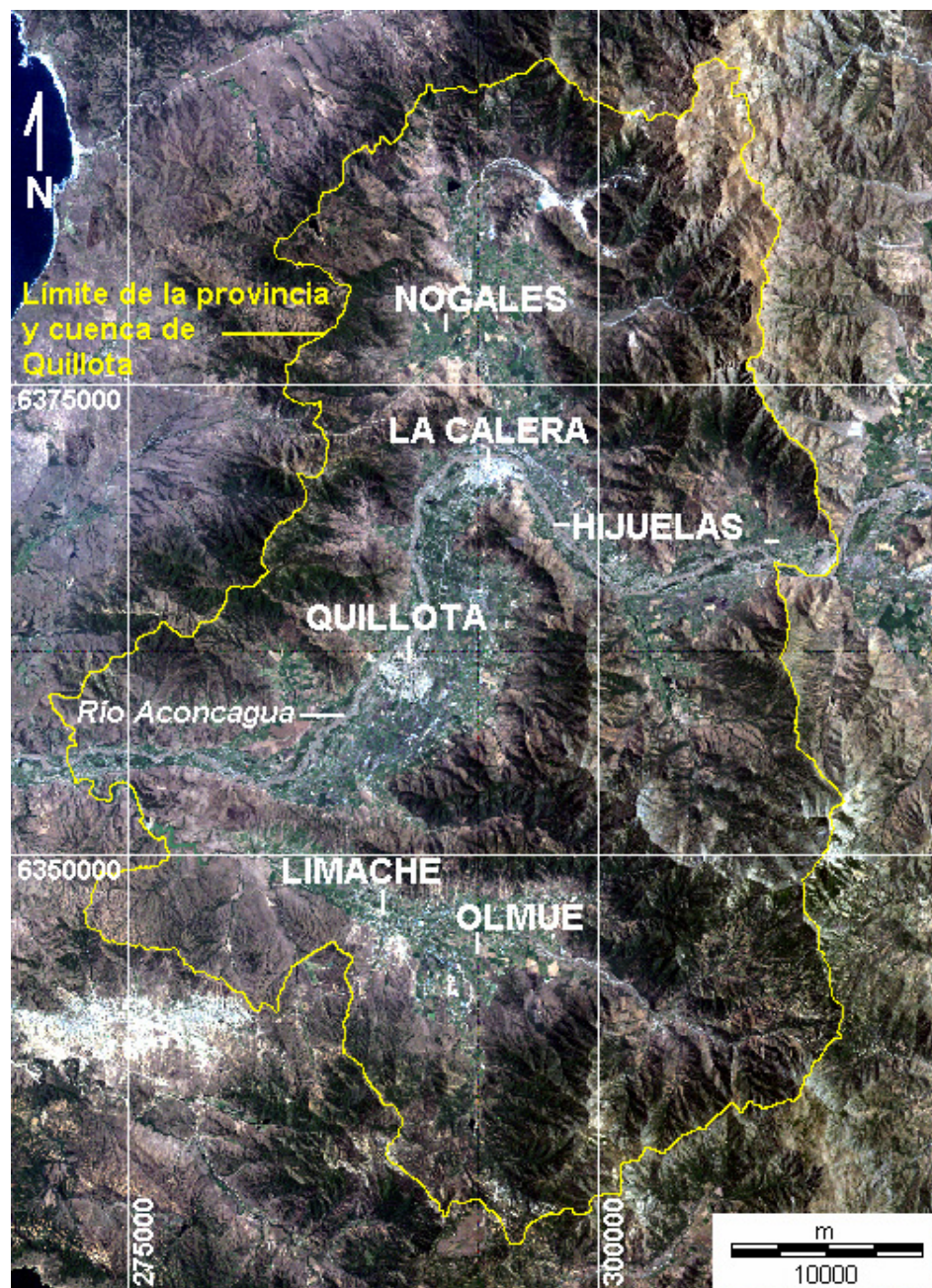


FIGURA 10. Límite de la provincia y cuenca de Quillota, sobre bandas del espectro visible (Landsat 5). Localización de los principales sectores urbanos (coordenadas UTM).

4.1.2 Modelo de Elevación Digital, DEM

En la Figura 11, se muestra el DEM de la cuenca de Quillota, generado mediante el SIG TNT mips, utilizando la misma imagen satelital de la Figura 10. En el modelo logrado se ilustran las altas cumbres montañosas que delimitan la cuenca por las líneas divisorias de aguas.

Como se aprecia en la Figura 11, hacia el este hay una gran cadena montañosa donde se encuentran las mayores alturas de la provincia. Las cuales se encuentran específicamente al suroeste, donde están los cerros i) El Roble, con la mayor altura de la provincia (2.215 m) y ii) La Campana, el segundo en altitud (2.000 m). Este último, es el principal componente del Parque Nacional La Campana. Hacia el oeste, se aprecian cordones montañosas más bajos que separan a la cuenca de Quillota del secano costero.

En general, se aprecia que sobre las zonas llanas se emplazan los principales asentamientos urbanos. Del mismo modo, se observa que los planos son los que contienen a los principales ejes agrícolas (Figura 11).

En la Figura 12 se muestra la carta que ilustra las pendientes de acuerdo a las variables de fragilidad de suelo según capacidad de uso y normativas actuales (SCHLATTER, GREZ y GERDING, 2003).

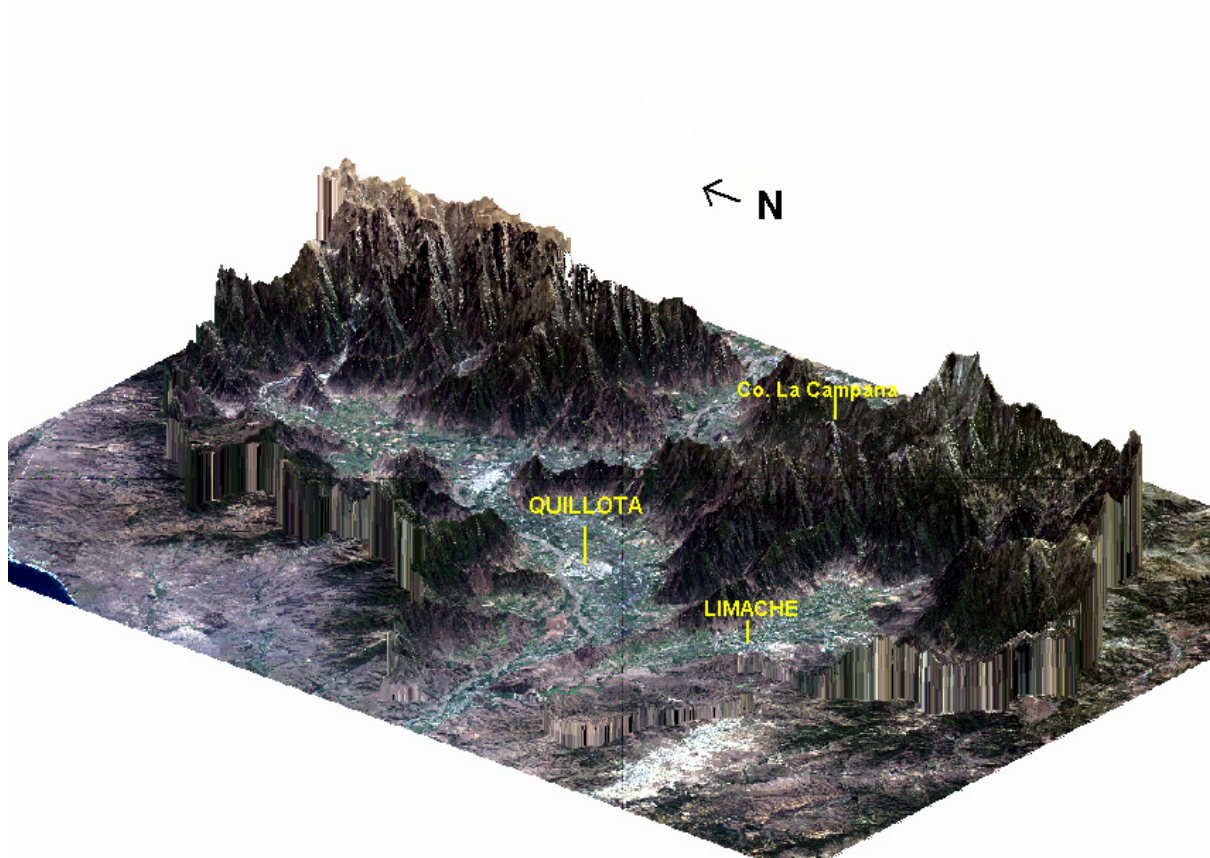


FIGURA 11. Modelo de elevación digital de la cuenca de Quillota (vista NE, 35° respecto a la horizontal), sobre bandas del espectro visible (Landsat 5).

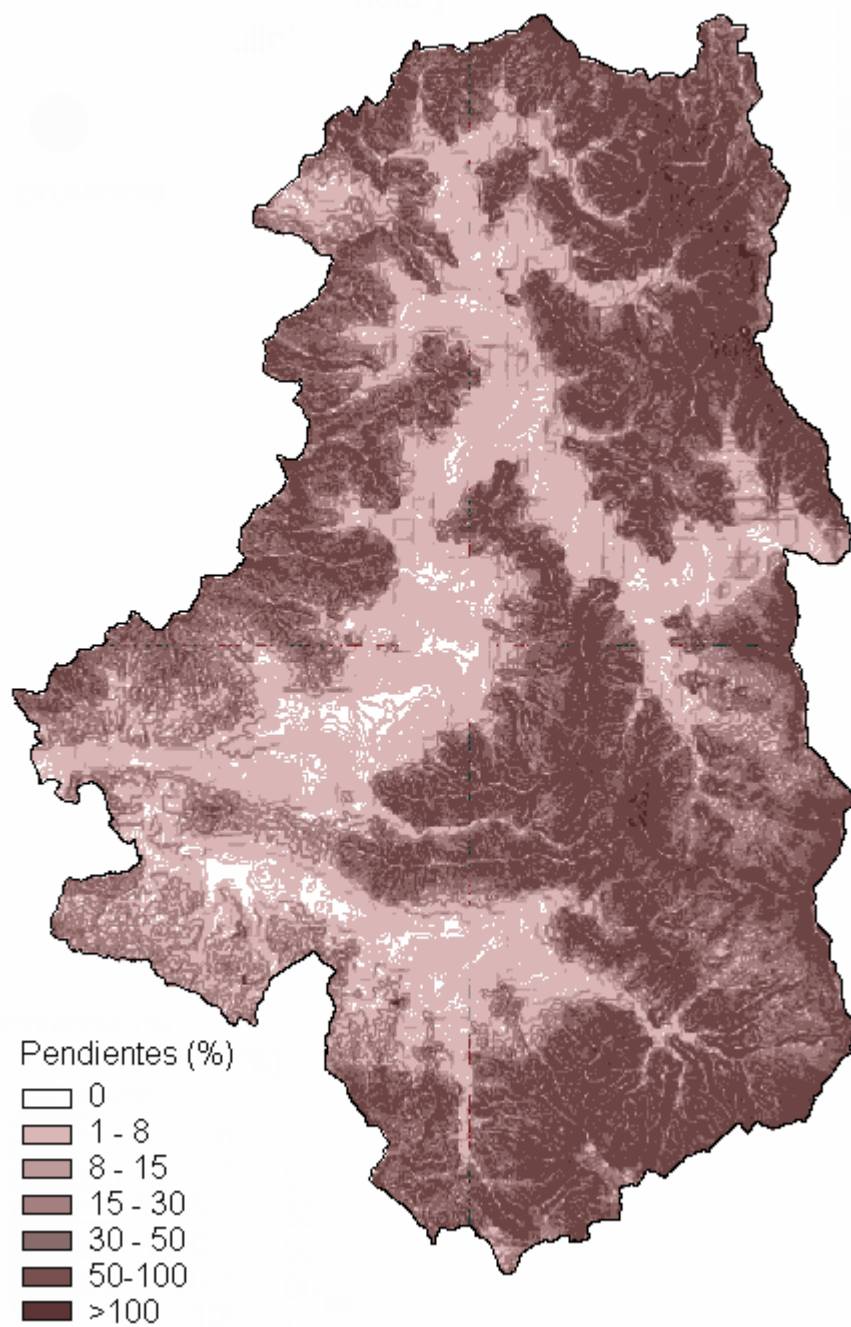


FIGURA 12. Rangos de pendientes de la cuenca de Quillota.

4.1.3 Delimitación del área de estudio

La Figura 13 muestra la red de canales destinados a riego en la provincia de Quilota. Se puede observar su íntima asociación al lecho del río Aconcagua. La excepción sólo la generan de algunos pequeños canales ubicados en sureste de la provincia.

La Figura 14 representa el área de estudio. En general, se aprecian dos grandes polígonos, de similar tamaño, divididos por el lecho del río Aconcagua. La superficie total del área de estudio, calculada mediante SIG totaliza 118.000 ha.

Delimitación del área
de estudio

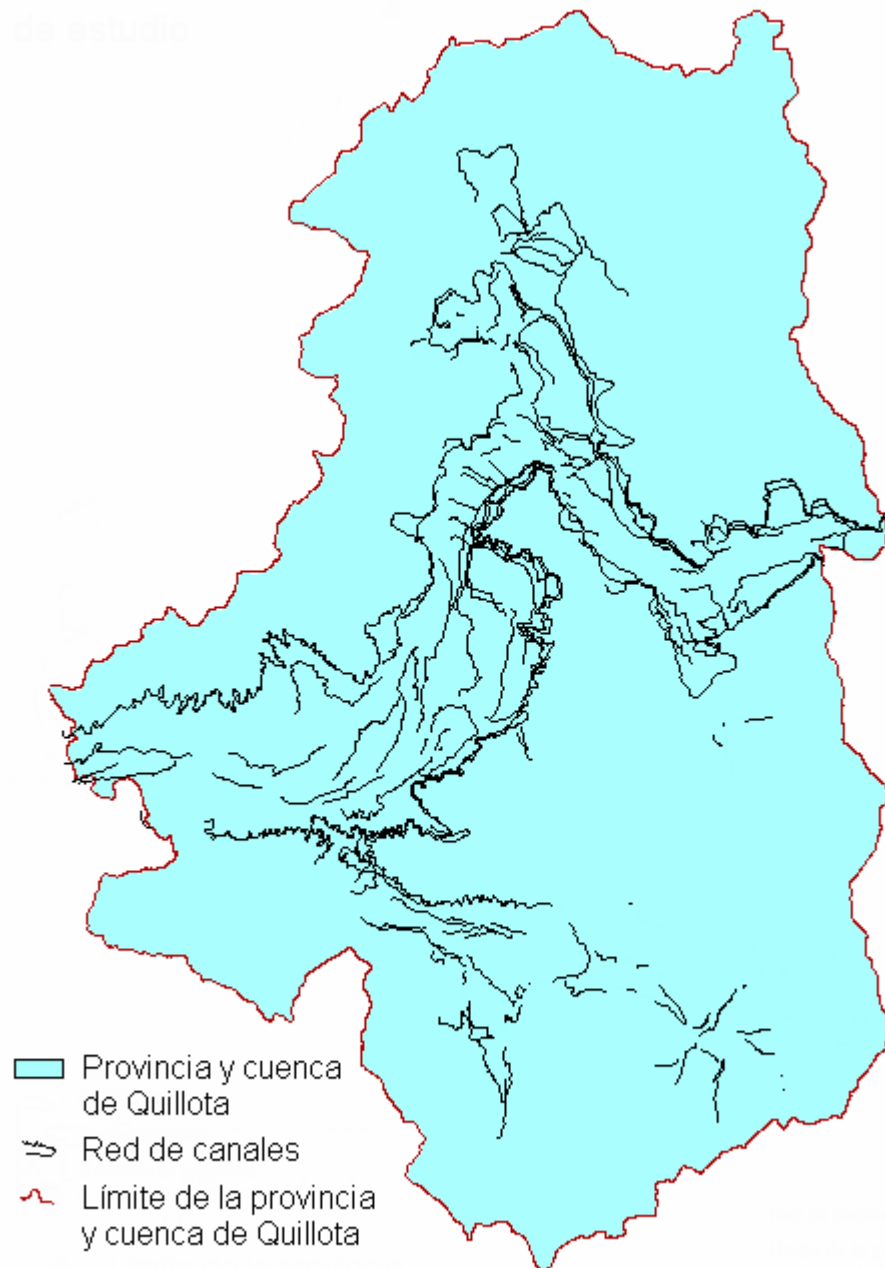


FIGURA 13. Variables utilizadas para la delimitación del área de estudio. Red de canales de riego y divisoria de aguas (límite de la subcuenca).

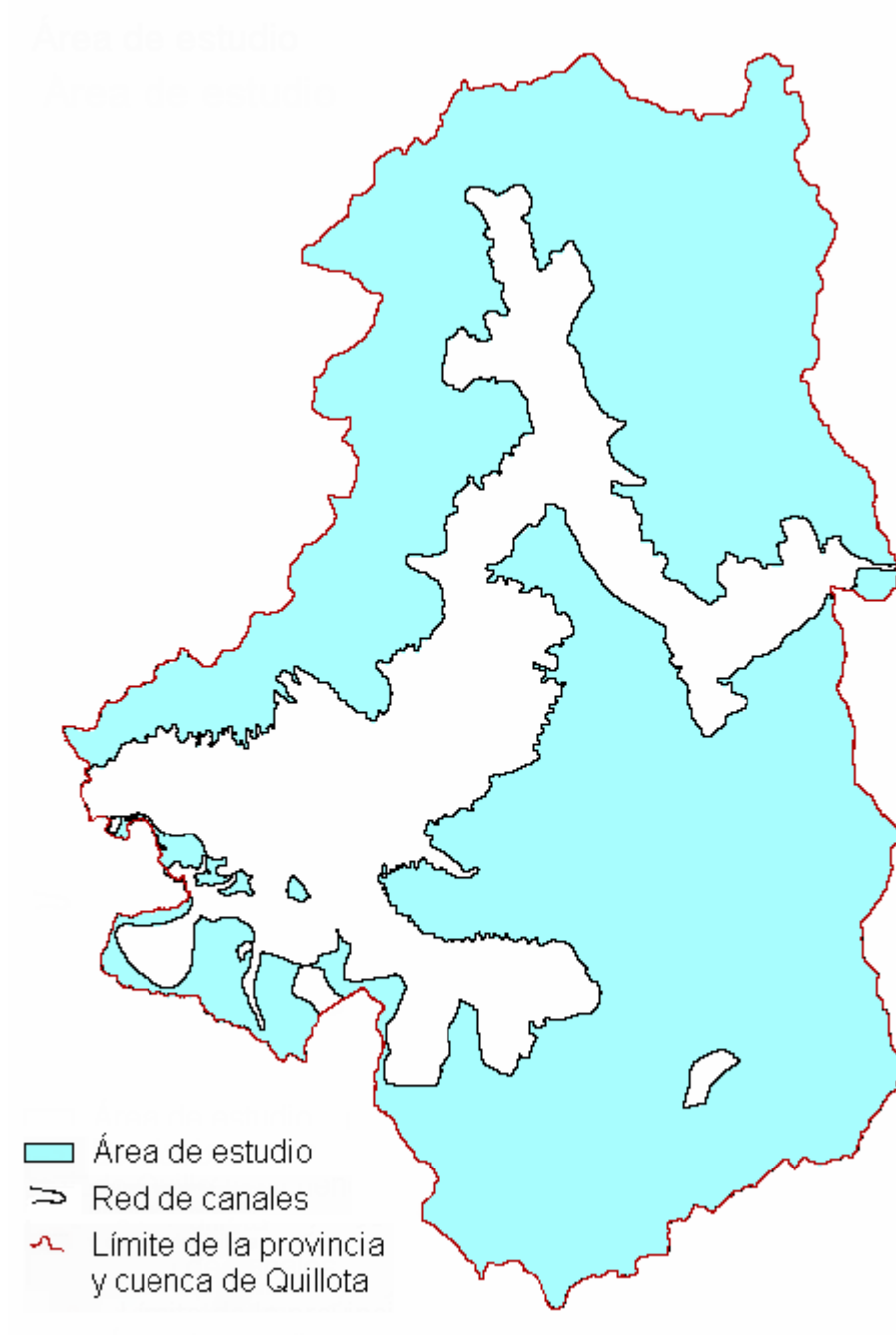


FIGURA 14. Área de estudio obtenida mediante la delimitación de la superficie comprendida exclusivamente entre la cota canal más alta y la divisoria de aguas.

4.1.4 Índices de vegetación (NDVI)

4.1.4.1 Cálculo de NDVI

La Figura 15 muestra los índices de vegetación (NDVI) de cada período estudiado, en tres condiciones representando el vigor de la biomasa vegetal presente en la época estival. Donde el blanco representa zonas en donde no hay vegetación, el verde pálido vegetación rala y el verde intenso representa zonas con altos niveles de biomasa.

Comparando ambos períodos de la Figura 15, se observa la similitud que presentan en cuanto a la distribución de la biomasa y las condiciones de vigor en el momento de adquisición de la imagen.

En el área de estudio, se observa que en general las laderas de exposición sur de la cuenca presentan mayor biomasa, diferenciándose de las del norte. Las laderas Sur corresponden a quebradas que se mantienen húmedas en la temporada estival por estar menos expuestas a la radiación solar.

Contrariamente, las zonas planas presentan mayor exposición, por lo tanto se observan con vegetación rala.

Por otra parte, en la zona noreste se observan sitios sin vegetación. Estas corresponden a zonas elevadas donde la vegetación es escasa o inexistente.

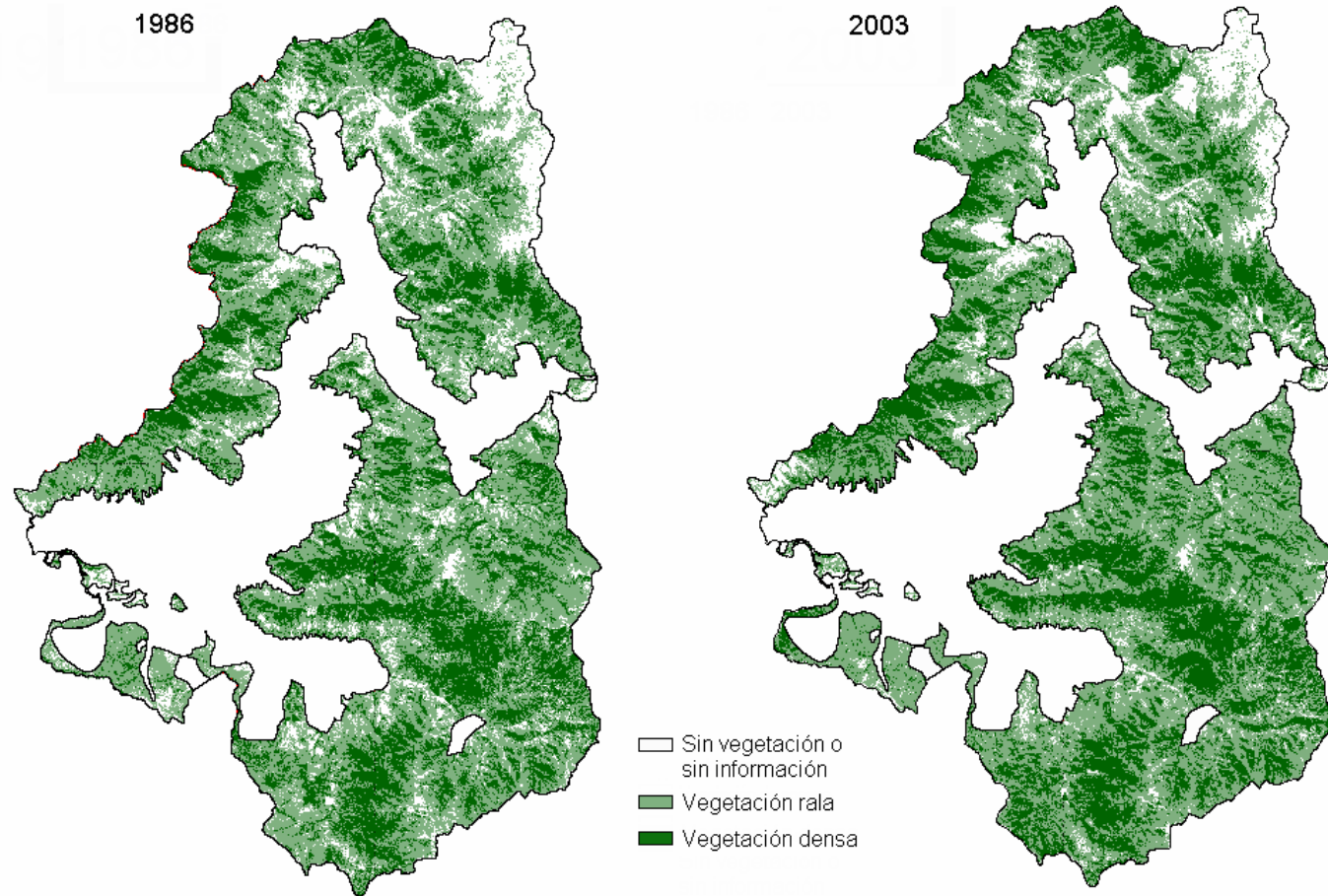


FIGURA 15. Comparación del índice de vegetación obtenido, para los años 1986 y 2003, en el área de estudio.

4.1.4.2 Detección de cambios

A partir de las imágenes anteriores, y como resultado de la técnica de detección de cambios se generó la carta en la Figura 16, la cual refleja los cambios vegetacionales ocurridos entre 1986 y 2003.

En la Figura 16, se observa que las principales macro zonas que presentaron cambios se localizan en el sector sur y centro oeste de la provincia. Justo por sobre el límite inferior del área de estudio, se observan cambios en el centro del área de estudio. De acuerdo al análisis, 47.000 ha sufrieron cambios de uso entre 1986 y el 2003.

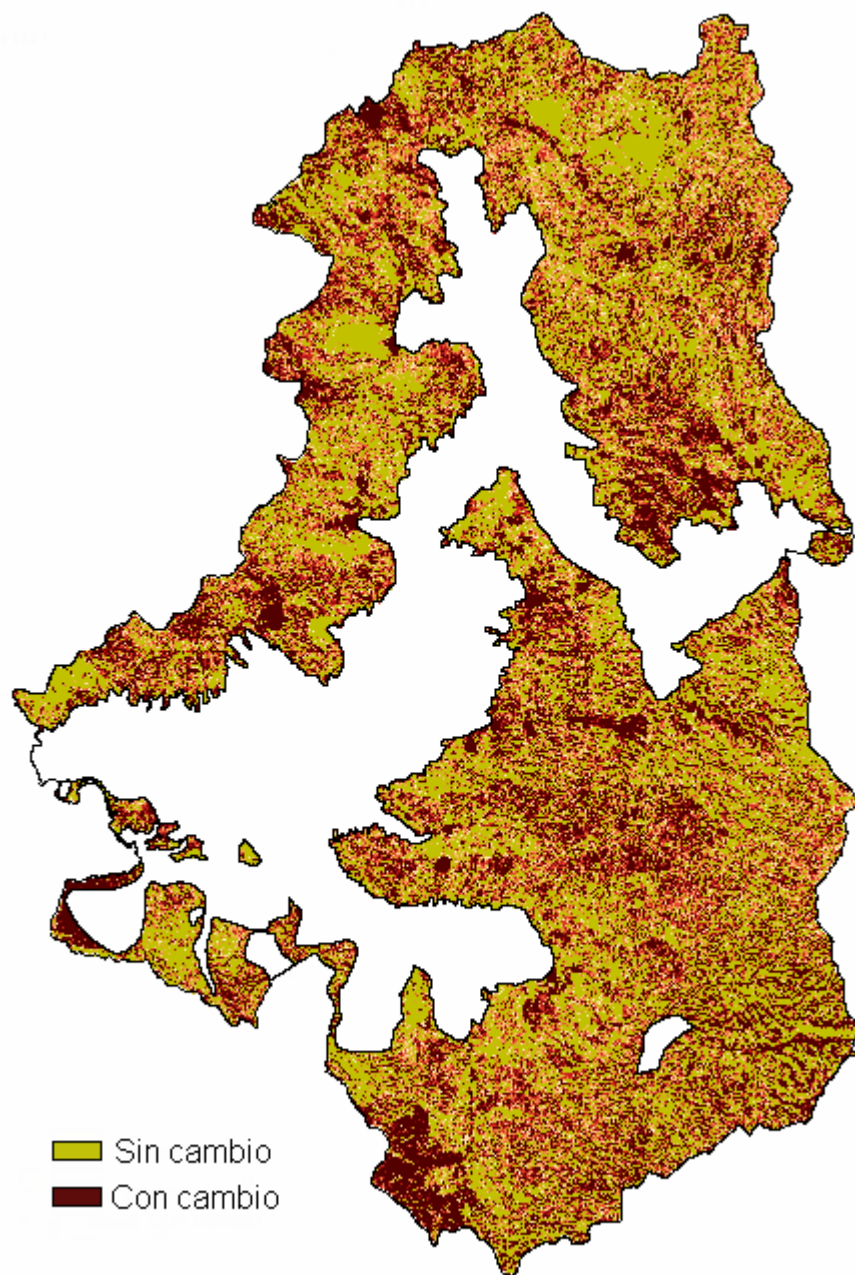


FIGURA 16. Cambios de vigor vegetacional entre los años 1986 y 2003.

4.1.5 Clasificación de imágenes

4.1.5.1 Composición falso color

En la Figura 17, se muestra el resultado de la composición falso color para la imagen del año 1986 en la cuenca de Quillota. En ella, se destaca notoriamente la vegetación regada con tono rojo pálido, en contraste de la que no es regada en un rojo intenso. Esto se confirma con reconocimientos empíricos de las zonas agrícolas de la cuenca de Quillota.

Se observa que la vegetación silvestre se concentra en el cordón montañoso sureste. Este sector coincide con el Parque Nacional La Campana, donde se comprueba en terreno la existencia de abundante vegetación silvestre. En el extremo noroeste se pueden observar roqueríos sin vegetación (suelo desnudo, en tono claro), correspondientes a altas cumbres.

En la vertiente oeste de la cuenca se observa menor cantidad de vegetación silvestre respecto a la ladera Este. En este caso, se evidencia la vegetación regada, que en esos años se concentraba en las zonas planas, por debajo de la cota de canal.

En la Figura 18, se compara el área de estudio, en falso color, entre los dos periodos estudiados. En el 2003 se visualizan claramente sectores con vegetación regada por sobre la cota de canal.

Composición falso color
para vegetación
con negro, 1986

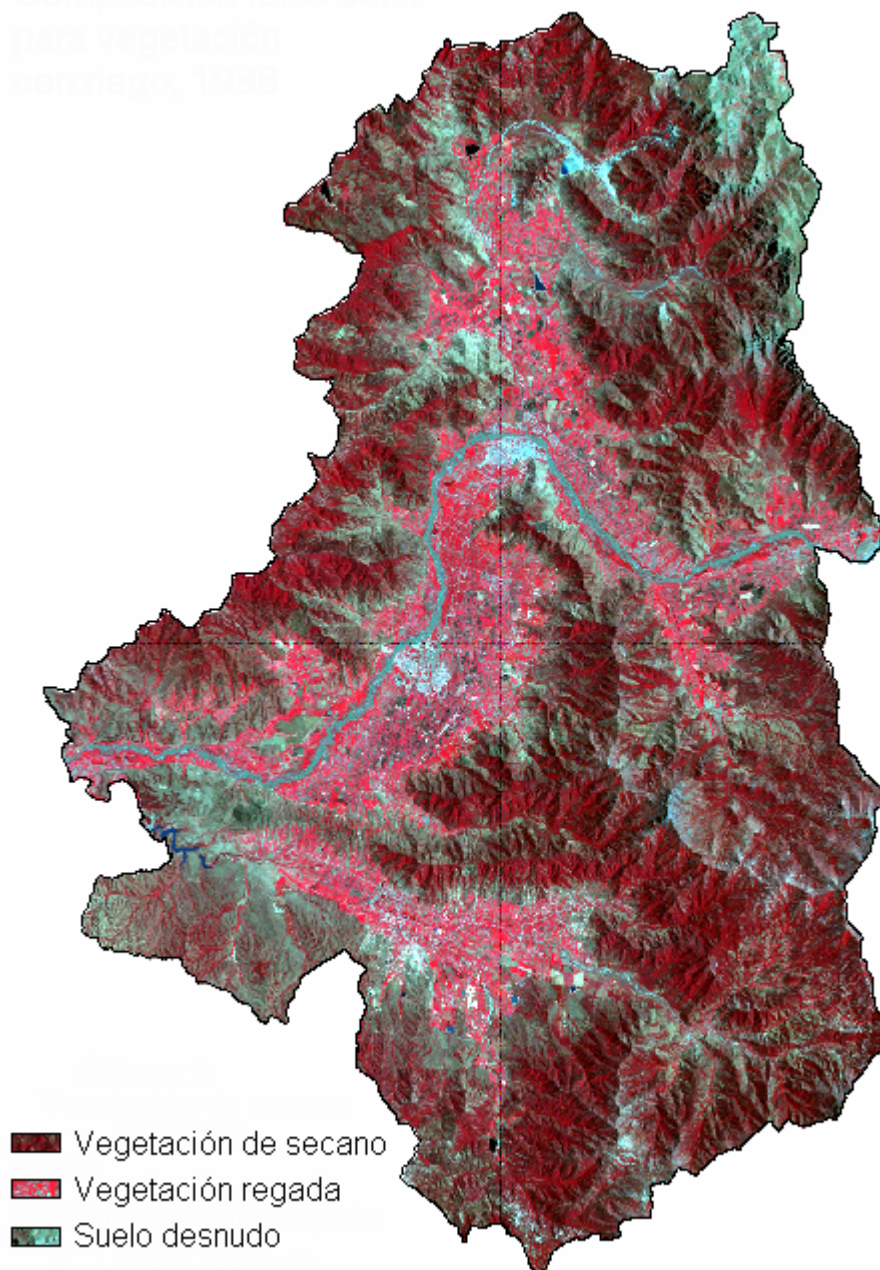


FIGURA 17. Composición falso color mediante las bandas 4, 3 y 2, de la imagen del año 1986. La composición destaca en rojo pálido la vegetación regada.

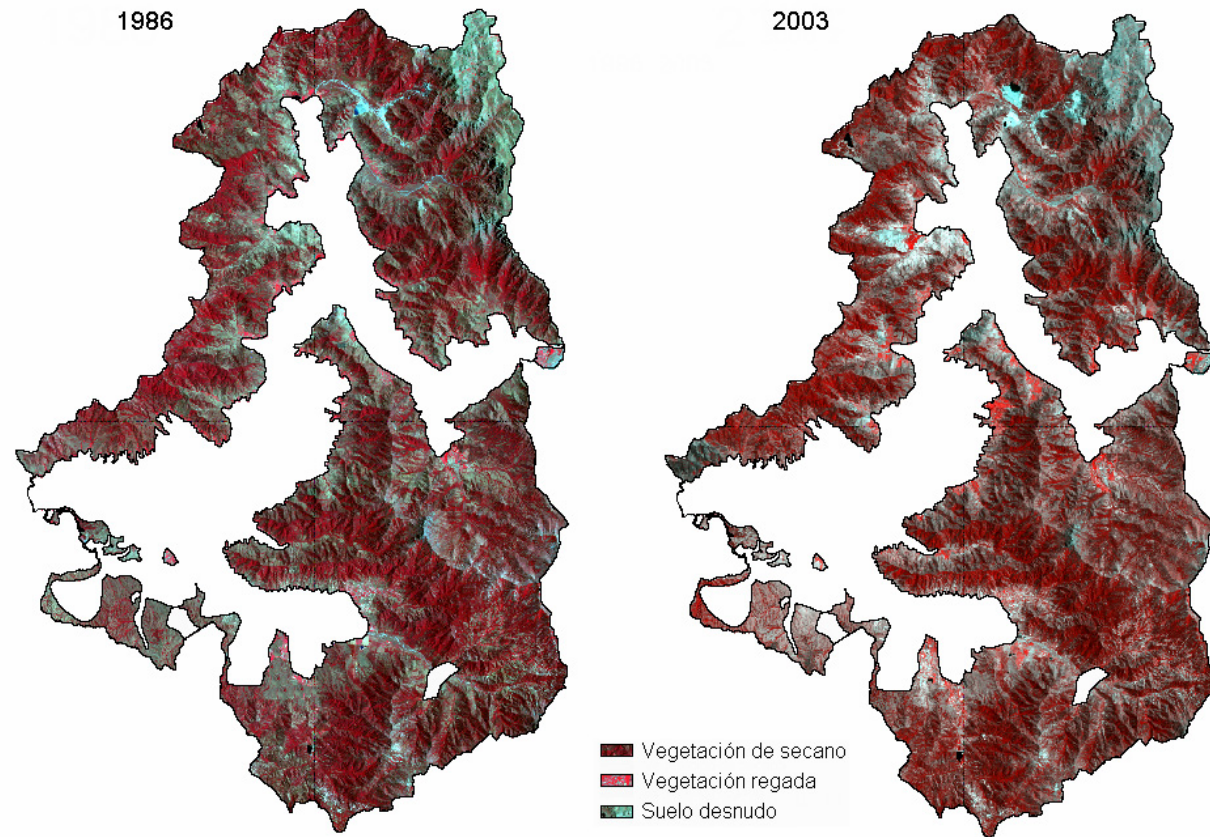


FIGURA 18. Comparación entre las áreas con cultivos regados en los años 1986 y 2003.

4.1.5.2 Clasificación temática

Como resultado de la clasificación supervisada, mediante sitios de entrenamiento, se obtuvo una carta para cada año, con los distintos elementos señalados en la metodología. Al compararlas visualmente (Figura 19) se destaca claramente que de una situación inicial, 1986 y su análogo moderno del 2003 existe un cambio dado por cultivos regados.

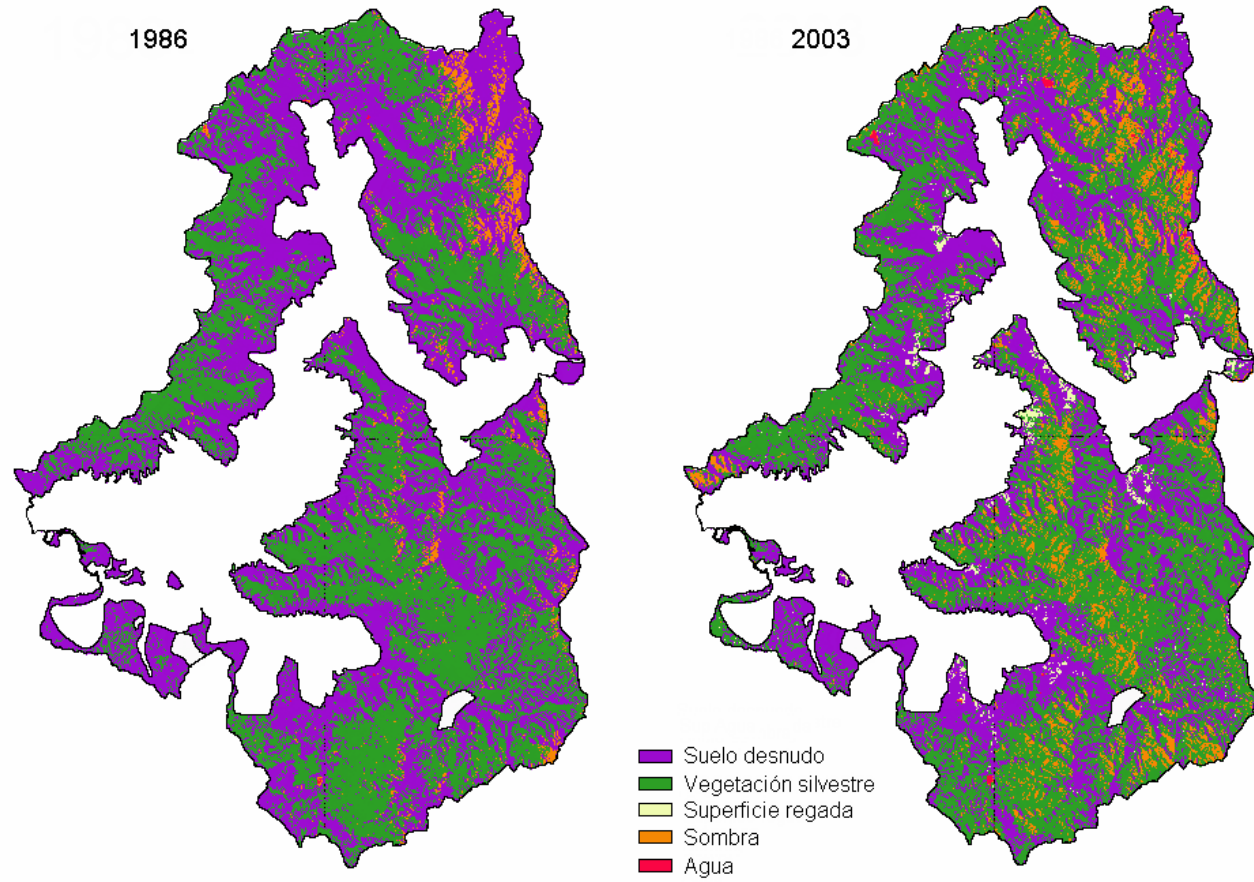


FIGURA 19. Expansión de los cultivos regados desde una línea de base hasta el presente.

4.1.5.3 Expansión de los cultivos sobre la cota de canal

La Figura 20 muestra la expansión de los cultivos regados en el área de estudio entre 1986 y 2003. Se puede observar que las zonas regadas se concentran justo por sobre del límite inferior del área de estudio.

Considerando que no se cuantificó superficie para la línea de base, la superficie regada para el 2003 en el área de estudio es de 1.550 ha.

En la Figura 21, se observa el resultado de la comparación entre los sectores en los cuales hubo cambio de uso del suelo (Figura 16) y la carta de expansión de superficie regada. En términos simples, señala la expansión de los cultivos frutales sobre ladera, ya que señala la superficie que cambió, dado por cultivos regados.

El área de expansión de los cultivos frutales en el área de estudio es de 1.150 ha con respecto a 1986, que no presenta ningún tipo de plantación en ladera.

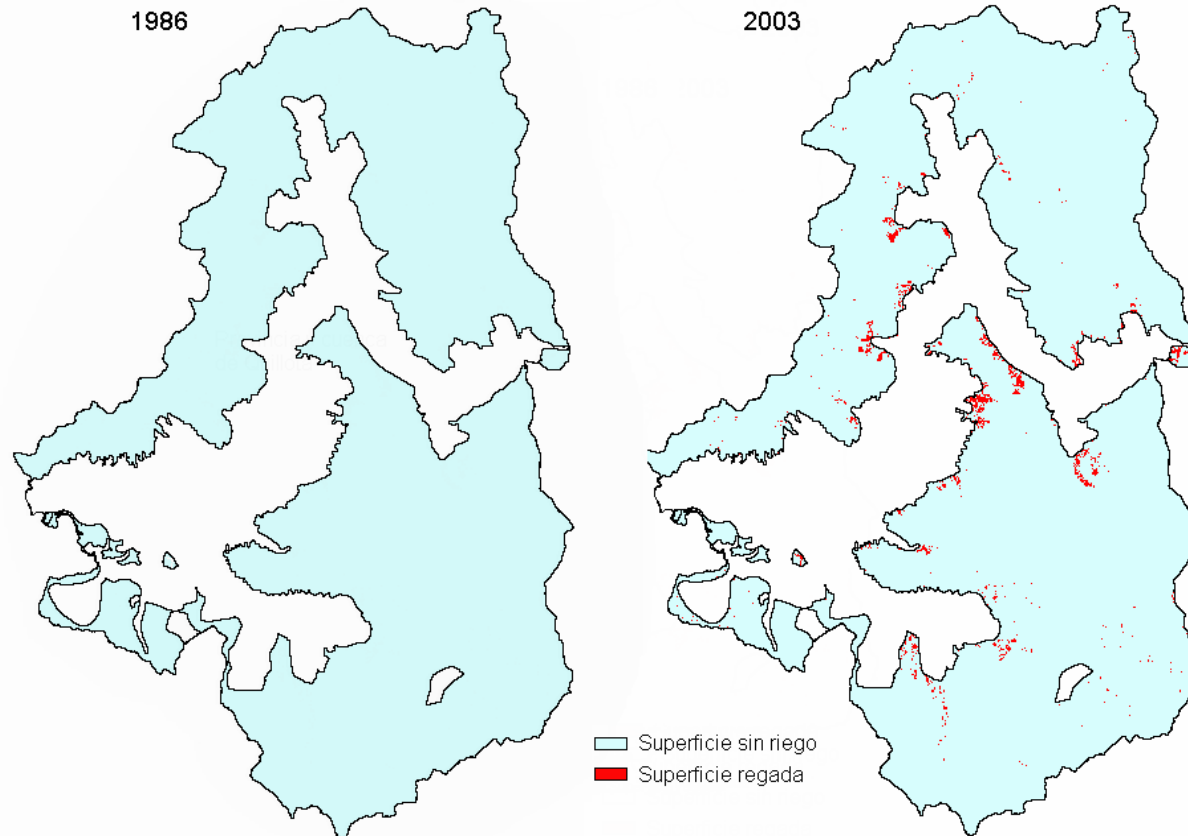


FIGURA 20. Expansión de los cultivos en laderas del área de estudio (1986–2003).

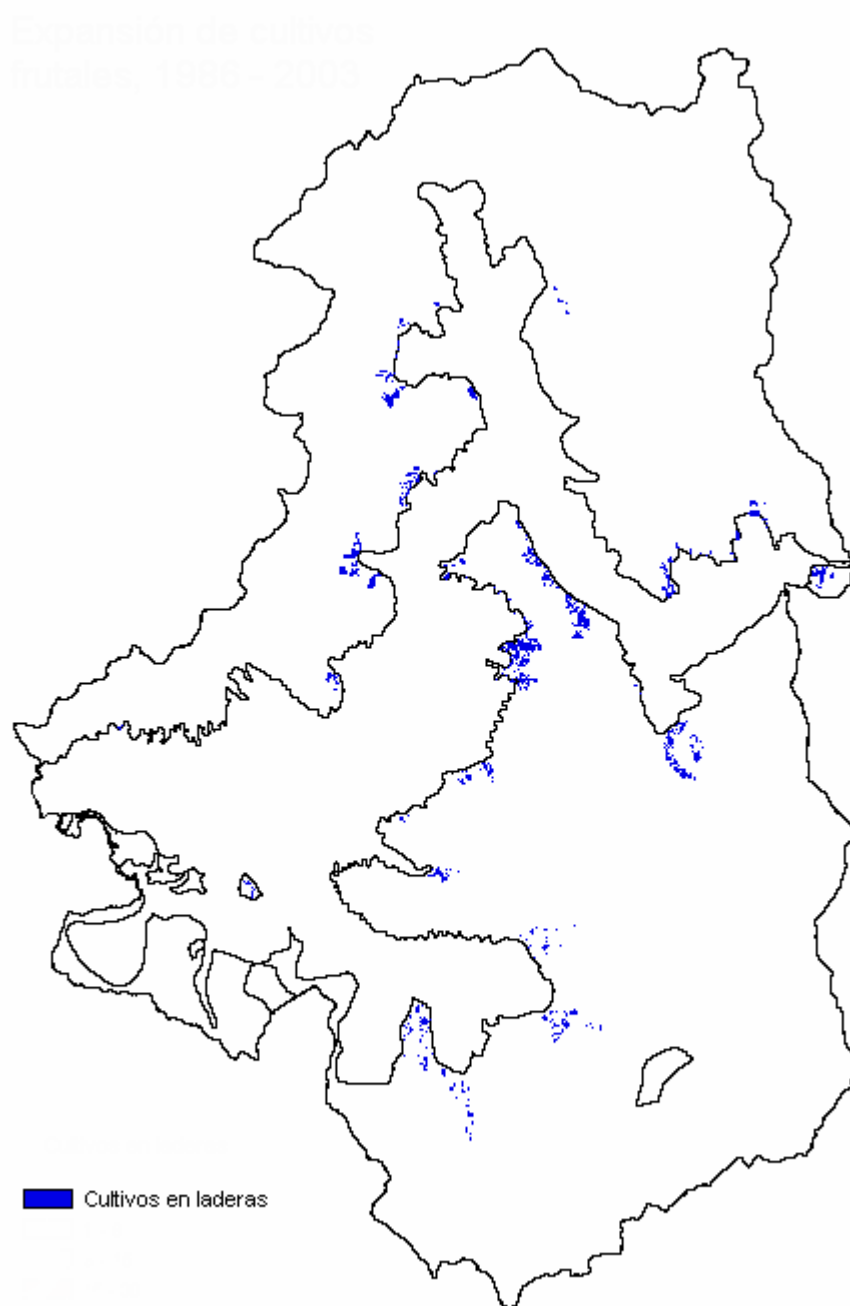


FIGURA 21. Expansión de los cultivos bajo riego, en laderas del área de estudio (1986–2003).

4.1.6 Evolución de los cultivos frutales

La Figura 22 representa los cultivos frutales que se expandieron en los rangos de pendientes establecidos anteriormente. En ella se destacan tanto las zonas de expansión con pendientes bajas como la de altas pendientes.

En la Figura 23 D, el sector de Pochocay es donde se encuentra la mayor extensión de cultivos. Asimismo, ellos están ubicados en los mayores rangos de pendiente.

Otro sector con pendientes pronunciadas se encuentra al sur del sector de La Cruz (Figura 23 C), el cual de norte a sur, va disminuyendo paulatinamente las pendientes de la superficie cultivada.

Hijuelas también ha sido un centro de gran expansión, ilustrado en la Figura 23 B. Éste se compone de un sector con pendientes pronunciadas, hacia el suroeste, y hacia el noreste, las pendientes disminuyen a valores que permiten el cultivo, según la clasificación de suelos.

En Nogales, (Figura 23 A) se aprecia una zona de menor expansión de los cultivos. La importancia de este sector es que muestra una forma geométrica de predio frutal. Esta información se comprobó mediante la interpretación de fotografías aéreas en escala 1:20.000.

En el análisis de la Figura 24, se observa que los cultivos frutales representan sólo el 1 % del área de estudio con respecto a la vegetación nativa y suelo desnudo.

Además se observa que más del 50 % de estos se encuentra dentro de las normativas determinadas para plantaciones frutales.

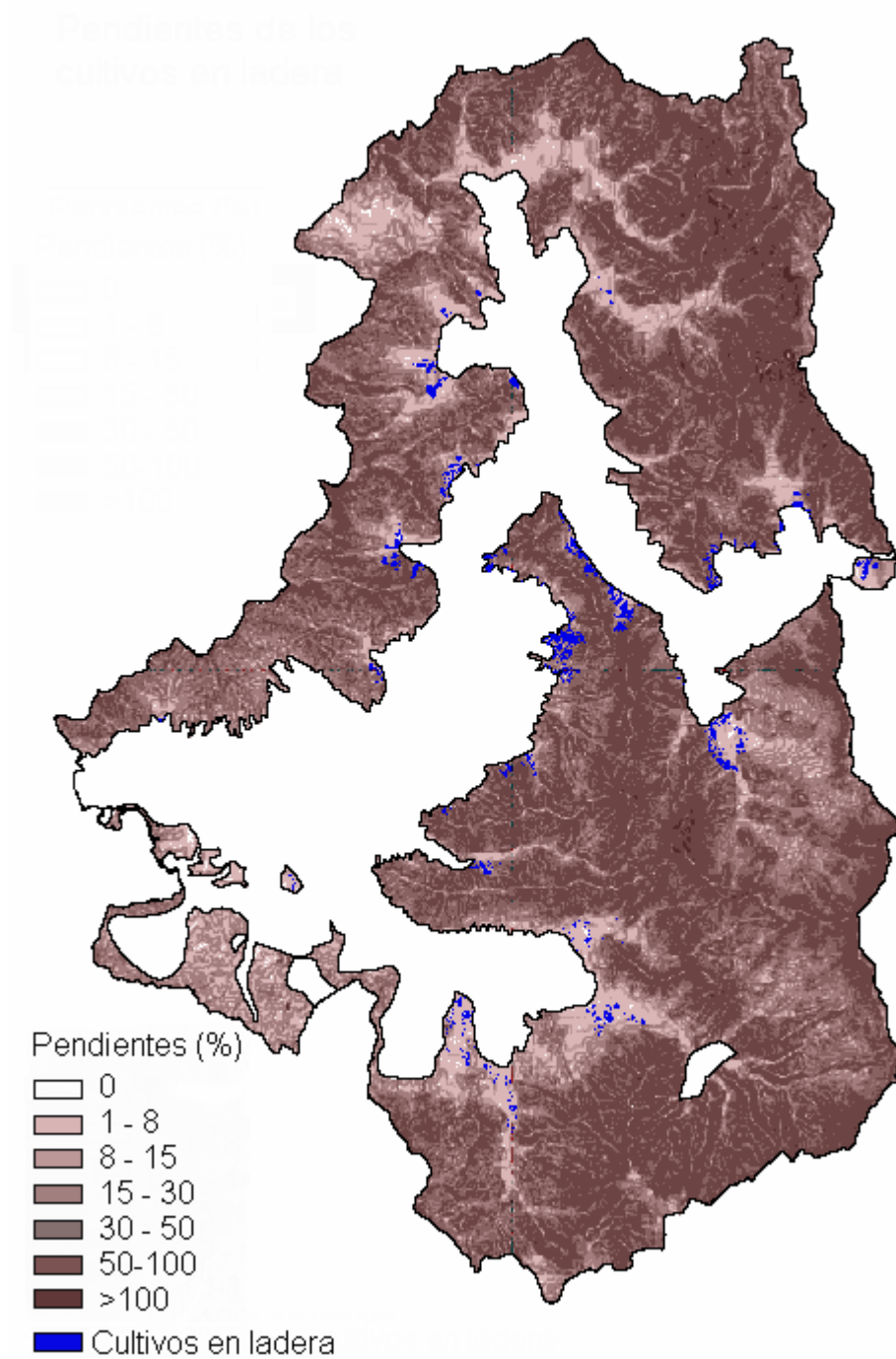


FIGURA 22. Pendientes en que se encuentran los cultivos frutales en el área de estudio, 2003

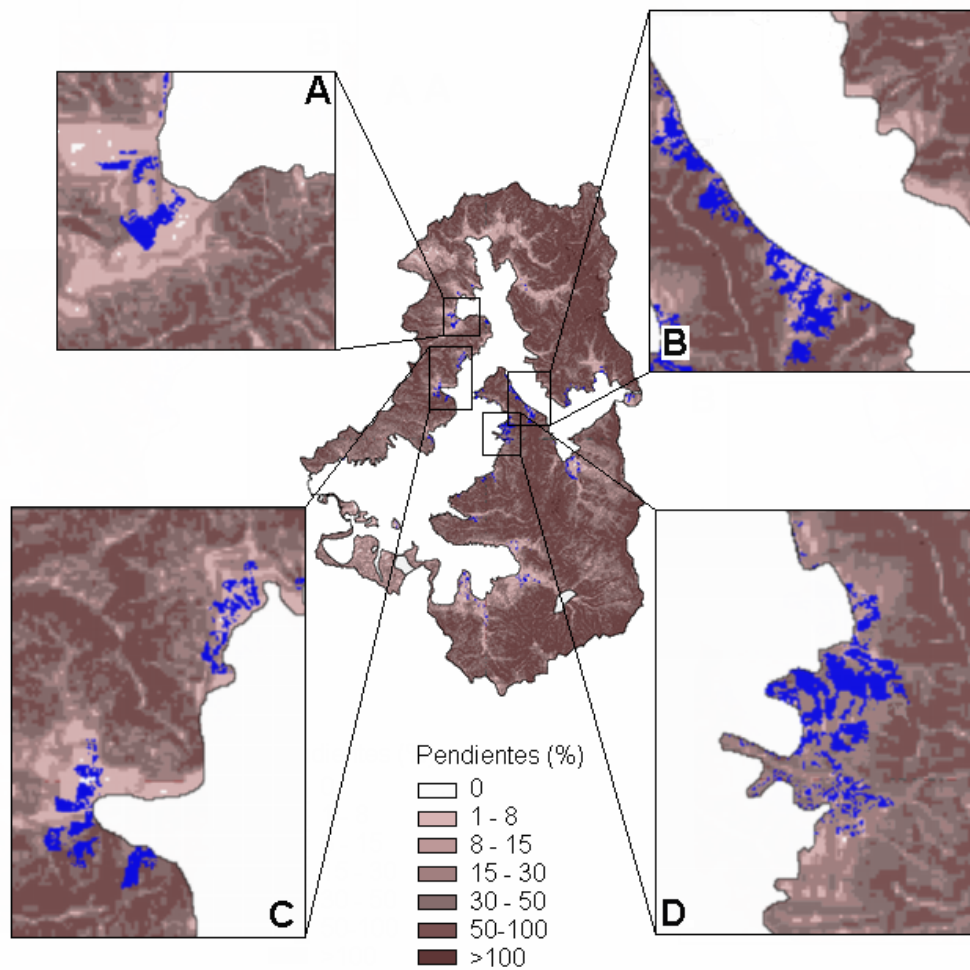


FIGURA 23. Sectores representativos de la expansión de cultivos en ladera. A Nogales, B Hijuelas, C La Cruz, D Pocochay.

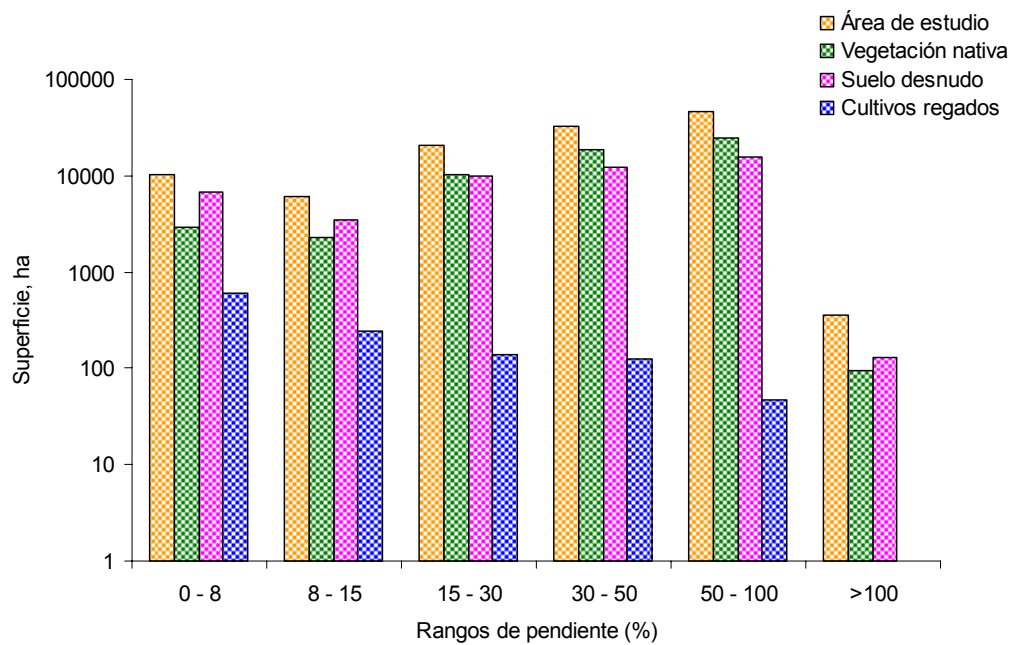


FIGURA 24. Distribución de distintos elementos analizados según la fragilidad de suelo dada por la pendiente.

4.2 Consideraciones:

4.2.1 Información de base

En ambas imágenes Landsat, se comprobó una adecuada corrección geométrica, al registrarse un error medio cuadrático inferior al tamaño de los píxeles de las imágenes ($RMS < 28,5$), según estándares matemáticos (CHUVIECO, 2002), en todos los casos. Toda la información se basó en el sistema de referencia mundial (WGS) del año 1984.

4.2.2 Provincia de Quillota

El fondo de la Figura 10 corresponde a la imagen Landsat del año 1986. Esta imagen constituye la línea de base en el estudio de la evolución de las plantaciones sobre ladera, con respecto a su análogo moderno (imagen de 2003), en donde sí se han descrito empíricamente plantaciones sobre laderas (UMAÑA, 2000; ARCE, 2002; CAUTIN, 2002; CISTERNAS 2002; CISTERNAS 2003; GARDIAZABAL, 2003).

De acuerdo a ODEPA-CIREN (2002), en ese año las únicas plantaciones en ladera se localizaban en el sector de Hijuelas, con una pequeña superficie de sólo 30 ha.

4.2.3 Delimitación del área de estudio

La decisión de utilizar la cota de canal más alta, como el límite inferior del área de estudio, se fundamenta en que para establecer una plantación sobre esta cota es necesario impulsar el agua de riego con tecnología hidráulica, por lo tanto, es en esta área donde existen con cierta certeza plantaciones frutales intensivas en laderas de cerro.

4.2.4 Corrección radiométrica

Para este estudio, existe una adecuada concordancia con las metodologías propuestas por PRINS y KIKULA (1996); ROGAN, FRANKLIN & ROBERTS (2001); FARIAS y NUÑEZ (2004); TARDIE (2004). Por lo tanto, según lo esperado, las imágenes de ambos periodos son comparables digitalmente entre ellas, minimizando al máximo las distorsiones de temporalidad.

4.2.5 NDVI

La utilización del índice NDVI, resultó ser adecuado en grandes extensiones, como lo indican HOFFHINE y SADER (2002). Sin embargo, debido a la calidad de las imágenes no es posible discriminar entre las distintas especies presentes, como lo describe MOSTAGHIM (2004) para el valle del Aconcagua. Para esta tarea es necesario aumentar la resolución espacial de las imágenes.

Si se compara esta apreciación visual con el resultado digital entregado por la técnica de detección de cambios, y considerando el 'error' posible, se puede afirmar que en realidad el cambio ocurrido es propio de situaciones puntuales, como es el caso

de los sectores por sobre el límite inferior del área de estudio (sobre la cota de canal). En los otros casos, donde el cambio se muestra disperso, sin una agrupación definida, se atribuye a efectos temporales o pequeñas oscilaciones estacionales (ROGAN; FRANKLIN & ROBERTS, 2001).

En cuanto a la técnica utilizada para detectar los cambios, se muestra consistente con las metodologías propuestas por RIDD y LIU (1998) y ROGAN; FRANKLIN y ROBERTS (2001), donde los autores demuestran que la sustracción de imágenes es el más indicado a la hora de detectar cambios entre dos o más periodos.

Es importante considerar que la imagen resultante no solamente ilustra los cambios, sino también puede contener algún tipo de error tanto en la lectura por el sensor como el mismo cálculo.

4.2.6 Clasificación de imágenes

La información entregada en la Figura 18, respecto a la vegetación regada en el 2003, se sustenta en observaciones empíricas de algunas zonas en la temporada estival del 2005, donde se comprueba la presencia de plantaciones de paltos. Del mismo modo, se aprecia que algunas formas de los sectores con vegetación regada coinciden con las geometrías típicas de predios agrícolas.

En el análisis de la clasificación temática (Figura 19), se puede deducir que en ambos periodos, la distribución de los elementos, excepto la superficie regada, se distribuye de manera similar. Esto confirma que el cambio a gran escala ha sido pe-

queño, no tan solo en cuanto a la biomasa vegetal, sino también respecto a otros elementos.

4.2.7 Expansión de los cultivos sobre la cota canal

En cuanto a la expansión de la superficie regada en la provincia (Figura 20), no solamente se atribuye a los cultivos frutales, esta situación puede estar dada por sectores donde la vegetación presenta elevadas condiciones de humedad en forma natural, por esta razón se hace mayormente aceptable la comparación de esta carta con la de cambio de vigor en la biomasa vegetal.

En cuanto al resultado obtenido, de la expansión de los cultivos propiamente tal (Figura 21), se puede contrastar con las 1.000 ha cultivadas en ladera de cerro catastradas por el INIA en el año 2001. Esto significa que el crecimiento entre 2001 y el 2003, fue de 70 ha anuales. A diferencia de las 2.500 ha que estima la encuesta anterior para el año 2001.

Esta información fue comprobada mediante interpretación de fotografías aéreas de sectores localizados.

4.2.8 Evolución de los cultivos frutales

Se puede apreciar de forma visual que, contrariamente a lo que supondría la comunidad agronómica de la zona, la superficie cultivada en laderas al menos sobre la cota de canal, representan el 1% de la superficie en estudio.

Por lo tanto, contrariamente a la opinión popular, el fenómeno de las plantaciones sobre laderas de cerro estaría recién en sus inicios, considerando la superficie disponible para potencialmente ser plantada.

Cabe destacar que el 52 % de las plantaciones frutícolas sobre la cota de canal se encuentra en suelos Clase IV, siendo la pendiente su limitante. Por otra parte, el 21 % de la superficie plantada se encuentra en pendientes entre 8 a 15 %. Si se considera un subtotal entre ambos rangos de pendiente se observa que un 73 % de las plantaciones cumple con las normativas de fragilidad de suelo, considerando la pendiente como el factor limitante.

En contraste, sólo un 27 % de los cultivos se encuentra en un rango de pendientes entre 15 a 100 %, equivalente a 311 ha. De estos, la mayoría se concentra entre 15 a 30 % (140 ha).

Finalmente, es importante mencionar que en los rangos entre 30 a 50 % de pendiente no existe ningún cultivo frutal, en el área de estudio.

5. CONCLUSIONES

- La superficie de la provincia de Quillota, se compone mayormente de altas pendientes. Sin embargo, las principales zonas agrícolas se concentran en los sectores planos.
- La biomasa total en el área de estudio, se ha mantenido relativamente estable entre 1986 y el 2003.
- Considerando una tasa de aumento constante, entre 1986 y el 2003, es posible afirmar que los cultivos en ladera han aumentado a una tasa de 68 ha por año.
- Sorprendentemente, más del 50 % de los cultivos frutales en ladera se encuentran ubicados en rangos de pendientes adecuados, desde el punto de vista de la conservación del suelo.
- Las laderas de la provincia de Quillota presentan baja superficie plantada respecto a la superficie disponible. Habrían más de 15.000 ha potencialmente utilizables para este tipo de cultivo.

6. RESUMEN

Durante las dos últimas décadas, la superficie plantada con cultivos frutales en el tercio central de Chile ha experimentado una fuerte expansión, como el caso del palto (avocado) (*Persea americana* Mill.). Tanto es así que se han utilizado suelos de ladera de cerro considerados no aptos para su plantación, siendo la pendiente su principal factor limitante. Este fenómeno se explica por la alta rentabilidad del fruto. Este nuevo tipo de plantaciones fue posible gracias a la implementación de tecnologías de riego que permitieron impulsar el agua sobre la cota de canal. A pesar de la situación, no existe información tanto de la superficie plantada como de la localización geográfica, desde sus inicios hasta la actualidad en la provincia de Quillota. Por lo tanto, no se tiene conocimiento de su dinámica.

Para determinar la superficie frutal plantada entre la cota de canal más alta y el límite de la cuenca de Quillota, se utilizó el análisis del NDVI y clasificaciones temáticas de dos imágenes Landsat entre una situación “anterior” y una “posterior”. Para determinar los rangos de pendiente se utilizó un Modelo de Elevación Digital. En el proceso se integró el uso de tres plataformas SIG.

Se detectaron cambios de vegetación en la temporada estival, entre 1986 y 2003. Éste cambio se comparó con la expansión de superficies regadas en el área de estudio. Los resultados muestran que ha existido una expansión de cultivos frutales en ladera, entre los periodos analizados, a razón de 70 ha anuales. Se cuantificaron 1.150 ha cultivadas en ladera en el año 2003. El 50 % de estos, se encuentran ubicados en los rangos de pendientes aptas para su cultivo, según su pendiente. La superficie sin cultivar sobre las laderas de la cuenca de Quillota superan en más 100 veces a las que lo están.

7. SUMMARY

A grate expansion of avocado (*Persea americana* Mill.) cultivars has occurred during the last two decades. It is so, that even hill slope grounds, considered non apt for plantation had been used. This situation is explained by the high profitability of its fruits. This new plantation system was possible thanks to improved irrigation technologies that allowed impelling water over the channel level. In spite of situation, little information of the location and the amount of surface planted over the channel level in the province of Quillota from the beginning to the present. Therefore, it is not known its dynamics.

In order to determine the avocado surface over the highest channel level and its basin boundaries two Landsat images were used. NDVI combined with thematic classification were used to compare a past situation with a modern analogue in the summer season. To determine slope categories a Digital Elevation Model was used. Three GISs were used in the whole process.

Change in vegetation was detected, between 1986 and 2003. The change was compared with the surface expansion of irrigated surfaces in the study area. There has been a expansion of cultivated crops in hill sides, in the analyzed period in a reason of 70 ha per year. 1.150 ha of crops cultivated on hillsides was recognized in 2003. 50 % of these are situated in a slope range permitted for plantation. The crop surface on hillsides of the Quillota basin is 100 times less, compared with non irrigated hillsides.

GLOSARIO

Absorción: (1) Es la medida de la habilidad que presenta una superficie de absorber energía incidente, a menudo a determinadas longitudes de onda. (2) Es la reducción de fuerza en una onda electromagnética propagada a través de un medio.

Absorción atmosférica: Es la eliminación de distintos tipos de energía que realiza la atmósfera en función de sus propios componentes, principalmente el ozono, el oxígeno atómico y el vapor de agua.

Acimut: Ángulo horizontal, medido en el sentido de las manecillas del reloj, a partir de una dirección (como el Norte).

Albedo: Es la tasa de la radiación reflejada desde un objeto hacia una cantidad total incidente sobre él, para una porción parcial del espectro.

Ángulo Cenital: Ángulo vertical con valor de 0° sobre el horizonte y 90° directamente sobre la superficie terrestre.

Banda: (1) una selección de longitudes de onda. (2) banda de frecuencia. (3) banda de absorción. (4) un rango de frecuencias de radar como banda-X o banda-Q.

Banda espectral: Es el término utilizado para mencionar una selección de longitudes de onda con comportamientos electromagnéticos similares.

Barrido multiespectral, Equipos de: Son equipos sensores que permiten explorar secuencialmente la superficie de la Tierra, dividiendo la radiación captada por diversas bandas espectrales.

Bosque Nativo: Según la propuesta chilena de la ley de bosque nativo, se entiende como un ecosistema cuyas funciones y relaciones tales como los flujo de nutrientes, la generación de suelo, la biodiversidad, la protección y retención del recurso agua, la producción de oxígeno, maderas, frutos y fibras, además de otras funciones ambientales.

Clasificación digital: Proceso por el que se asigna un píxel de una imagen multiespectral a una de las categorías de la leyenda, sobre la base de similitudes entre los valores numéricos que las definen.

Coordenadas Geodésicas: Coordenadas que definen un punto en relación a un elipsoide. Las coordenadas geodésicas pueden emplear valores de latitud, longitud y altura elipsoidal o coordenadas cartesianas.

Contraste: Es la diferencia de valor o tono entre las áreas más claras y más oscuras de una imagen.

Correcciones: Son las operaciones digitales tendientes a eliminar errores en la adquisición de las imágenes, ya sea radiométricos y geométricos.

Datos Crudos: Datos originales, registrados y grabados por un receptor.

Datum Geodésico: Modelo matemático diseñado para ajustarse lo mejor posible a una parte o a la totalidad del geoide. Se define por un elipsoide y la relación que existe entre este y un punto sobre la superficie topográfica, establecido como el origen del datum. Dicha relación se establece por medio de seis cantidades, generalmente (aunque no necesariamente): la latitud y longitud geodésica y la altura del origen, los dos componentes de la deflexión de la vertical en el origen y el acimut geodésico de una línea que va desde el origen hacia cualquier otro punto.

DEM (Modelo de Elevación Digital): Del inglés, *Digital Elevation Model*. Es una representación de la topografía de la Tierra en un formato digital, esto se realiza mediante coordenadas y descripciones numéricas de altitud.

Detección de cambios: Es cualquier técnica que permita señalar sobre dos o más imágenes multi-temporales aquellas zonas que han experimentado transformaciones.

Día Solar: Intervalo de tiempo entre dos tránsitos superiores sucesivos del sol.

Digitalización: Es un concepto que refiere a cualquier conversión de un documento analógico en formato numérico.

Elevación: Se refiere a datos de altura representados en el eje cartesiano como valores z. También se le denomina a la altura sobre el Geoide para los instrumentos que la miden.

Elipsoide: En Geodesia, a menos que se especifique otra cosa, es una figura matemática formada al hacer girar una elipse alrededor de su eje menor (a veces se le denomina también esferoide). Dos elementos definen un elipsoide: generalmente se dan a conocer como la longitud del semi-eje mayor y el achatamiento.

Emisividad: Proporción de la energía propagada a través del espacio o de otro medio material en un modelo armónico ondulatorio con un componente magnético y otro eléctrico.

Espectro electromagnético: Se trata de la agrupación de la radiación electromagnética en distintas bandas, definidas por la longitud de onda o la frecuencia, que presentan un comportamiento radiométrico similar.

Geoide: Superficie equipotencial que coincide con el nivel medio del mar, el cual se extendería imaginariamente a lo largo de toda la superficie terrestre de no existir los continentes. Esta superficie es perpendicular en todos los puntos a la fuerza de gravedad.

Imagen: Cualquier forma de representación pictórica de los datos obtenida no por medios fotográficos.

Latitud: Ángulo entre la normal al elipsoide y el plano ecuatorial. Tiene un valor de cero sobre el ecuador y de 90° en los polos.

Longitud: Es el ángulo que se forma entre el meridiano de Greenwich y el meridiano que pasa por el punto en cuestión. Por lo tanto, tendrá un valor de 0° en Greenwich y se mide hacia el este o el oeste, con valores máximos de 180° en un sentido y otro.

Longitud de onda: Es la medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre sucesivas ondas.

Meridiano: Línea imaginaria que une el polo sur con el polo norte y pasa por el ecuador a los 90° .

Proyección Transversa de Mercator: Proyección cilíndrica conforme basada en un cilindro que envuelve a la Tierra.

Transformación de proyección: Proceso de transformar coordenadas de un sistema a otro.

UTM: Proyección Universal Transversa de Mercator. Es una variante de la proyección Transversa de Mercator. Se divide en diferentes zonas, cada una de 6° de ancho, con un factor central de escala de 0.996. La zona a emplear dependerá de la posición del usuario sobre la Tierra.

WGS 84: Siglas de World Geodetic System 1984. Sistema al cual están referidas todas las mediciones y resultados GPS.

NDVI: Índice de Vegetación de la diferencia Normalizada (*Normalized Vegetation index*). Es un índice calculado de las reflectancia medida en las longitudes de onda Roja e Infrarrojo cercano. Esta relacionado con una fracción de la radiación fotosintéticamente activa.

Nivel digital: Valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor óptico electrónico.

Píxel: Viene de las palabras en inglés "pictoric" x "element". Constituye la unidad mínima de una imagen.

Puntos de control: Son elementos geográficos que pueden ser localizados precisamente en una imagen y en un mapa para ser empleados en la corrección cartográfica de dicha imagen.

Radiación: Es el proceso en que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre.

Radiancia: Es el total de la energía radiada por unidad de área y por un ángulo sólido de medida.

Reflectividad: Es el porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie bidimensional.

Ruido de la escena: Concepto que refiere a la variabilidad espectral hallada en el interior de las distintas clases temáticas.

Ruidos atmosféricos: Se refiere a las interferencias imprevistas y más o menos aleatorias que introducen una degradación en los datos originales.

Sensor: Cualquier instrumento que detecta energía electromagnética, la convierte en una señal y la presenta de manera gráfica para su estudio.

Sensoramiento Remoto: También conocida como percepción remota o Teledetección. Es la ciencia de adquirir información sobre la superficie de la tierra sin estar en contacto con ella.

SIG: Es un sistema basado en tecnología informática diseñada para ingresar, almacenar manipular y representar datos con georeferencia espacial.

Signatura espectral: También llamada firma espectral. Es la forma peculiar de emitir energía de un determinado objeto o cubierta. Es afectada por las características físicas o químicas del objeto que interactúan con la energía electromagnética y varía según las longitudes de onda.

Suelo frágil: Se entenderá como aquel susceptible de sufrir erosión severa debido a factores limitantes intrínsecos, tales como pendiente, textura, estructura, profundidad, drenaje, pedregosidad u otros, según las variables y los criterios señalados en el artículo 22 del D.S. N° 193, de 1998, del Ministerio de Agricultura que modifica el DL 701 donde menciona que para certificar que un suelo es frágil debe cumplir al menos uno de los siguientes requisitos:

- Suelos en pendientes superiores a 15%
- Suelos de textura arenosa o no estructurados
- Suelos de profundidad efectiva menor o igual a 0,5 metro
- Suelos con pedregosidad superficial sobre 10% y/o el perfil sobre 30%

8. LITERATURA CITADA

- ARCE, R. 2002. No comparto el uso de camellones en cerros. *Revista Avance Agrícola*. 12 (106): 2 – 3
- BANDA, C; GARCIA, M y MUÑOZ, J. 2001. Información sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sustentable. Santiago, FAO. 69p. (Documento de campo N° 5, FAO).
- BEKTAS, F and GOKSEL, C. 2004. Remote sensing and GIS integration for land cover analysis, a case study: gokceada island, (On-line). www.isprs.org/istanbul2004/comm4/papers/441.pdf
- BOSQUE, J; ESCOBAR, F; GARCÍA, E y SALADO, M. 1994. Sistemas de información geográfica: prácticas con PC ARC-Info e IDRISI. Delaware, Iberoamericana. 478p.
- CAMPOS, L. 2004. Aplicación de los Sistemas de Información Geográficos y de Percepción Remota para la Determinación de Areas de Fragilidad de Suelos y Posterior Aplicación de Técnicas Conservacionistas en el Secano de la VI Región de Chile, (On-line). <http://espejos.unesco.org.uy/simplac2002/Ponencias/Geom%E1tica%202002/GE144.doc>
- CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING. 2004. Fundamentals of remote sensing, (On-line). http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/chapter1/chapter1_1_e.html
- CAPRIOLI, M and TARANTINO, E. 2004. Accuracy assessment of per-field classification integrating very fine spatial resolution satellite imagery with topographic data, (On-line). http://www.lsgj.polyu.edu.hk/stAFF/zl.li/vol_3_2/06_caprioli.pdf
- CAUTIN, R. 2002. Camellones en cerros: se debe estudiar más este tema. *Revista Avance Agrícola*. 12 (107): 17

- CEBRIAN, J. 1998. Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones de la Informática a la Geografía y Ciencias Sociales. Madrid. 140p.
- CENTRO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN UNIVERSIDAD CATÓLICA. 2004. Sistemas de Información Geográfica, (On-line). <http://www.capuc.puc.cl/SIG.htm>
- CENTRO RURAL DE INFORMACION EUROPEA. 2004. Evolución de la agricultura, (On-line).<http://www.criecv.org/es/ae/evolucion/evolucion.html>
- CHUVIECO, E. 2002. Teledetección Ambiental. Barcelona, Ariel. 586p.
- _____ 2000. Fundamentos de teledetección espacial. 3ª Edición. Madrid, Rialp. 570p.
- CISTERNAS, M. 2003. Lamentablemente los suelos son hechos por la naturaleza y no por el hombre, y los productos de la naturaleza son siempre complejos. Avance Agrícola. Especial Paltos
- _____ 2002. En los cerros tenemos que hacer estudios, porque la idea no es dejar de plantar. Avance Agrícola. 12 (107): 14 – 15
- COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO. 1982. Estudio Integral de Riego de los Valles Aconcagua, Putaendo y Petorca. Santiago, CRC. (Tomo 2).
- COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIOAMBIENTE. 2005a. Capítulo V: Medio Ambiente Urbano, (On-line). www.conama.cl/certificacion/1142/articles-28830_recurso_7.pdf
- _____ 2005b. Capítulo IV: Medio Ambiente Rural, (On-line). http://www.conama.cl/certificacion/1142/articles-28830_recurso_5.pdf
- _____ 2005c. Principales Problemáticas Ambientales. (On-line). http://www.conama.cl/portal/1255/article-26175.html#h2_2

- CORPORACION NACIONAL FORESTAL. 2004. Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental, (On-line). http://www.conaf.cl/?page=home/contents&seccion_id=fa27e4408346cf28a20fb4872bb958cb&unidad=0&
- CROVETTO, C. 2002. Cero Labranza. Talcahuano, Trama impresiones. 225p.
- DEFENSORES DEL BOSQUE CHILENO. 2005. Ahora los parlamentarios tienen la palabra, (On-line). <http://www.elbosquechileno.cl/35leybosque.html>
- ESSER, A y ORTEGA, R. 2005 Uso de percepción remota o teledetección para el manejo sitio-específico de viñedos, (On-line). www.faif.puc.cl/extension/agroforuc/Revista20/rortega1.pdf
- FARÍAS, M y NUÑEZ, R. 2004. Manual Laboratorio de Percepción Remota Software Idrisi. PUCCH. Instituto de Geografía. Santiago, CHILE. 41p.
- FOODY, G and BOYD, D. 12 de febrero de 2005. Mapping tropical forest biophysical properties from coarse spatial resolution satellite sensor data: applications of neural networks and data fusion, (On-line). http://divcom.otago.ac.nz/sirc/geocomp/geocomp98/45/gc_45.htm
- FRANCKE, S; BARRÍA, B y PINTO, M. 1999. Alcances y perspectivas de la recuperación de suelos degradados en el marco del nuevo estatuto de fomento forestal chileno. (In: CONAF). Recuperación de Suelos Degradados en el Marco de la nueva Ley de Fomento Forestal. CONAF, Santiago. pp. 11 – 40
- GARCÍA, M. 2005. Respuesta de la Vegetación a variaciones climáticas en praderas y sistemas adehesados Mediterráneos. Metodología de Análisis utilizando datos hiperespectrales y multispectrales, (On-line). <http://www.aeet.org/ecosistemas/articulo2.htm>
- GARDIAZABAL, F. 2003. 45° de inclinación, y no hay problema. Avance Agrícola. 13 (118): 10 – 11
- _____. 2001. Historia y Desarrollo del Palto en Chile. California Avocado Society 2001 Yearbook. (85): 93 – 112

- GASTÓ, J; GALLARDO, S y CONTRERAS, D. 1987. Caracterización de los pastizales de Chile: reinos, dominios y provincias. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. 292p.
- HOFFHINE, E and SADER, S. 2002. Detection of harvest type using dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*. (80): 385 – 396
- HONORATO, R y BONOMELLI, C. 2002. Suelos degradados y agricultura sustentable. *Revista Agronomía y Forestal UC*. (15): 20 – 24
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICAS. 1998. Sexto censo nacional agropecuario año 1997: total nacional. Santiago, Chile. 214p.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS. 2001. Situación de las Plantaciones de Frutales en Cerro, Provincia de Quillota, Quillota. Ministerio de Agricultura. 26p.
- NOVOA, R; VILLASECA, S; DEL CANTO, P; ROUANET, L; SIERRA, C y DEL POZO, A. 1989. Mapa Agroclimático de Chile. Santiago, INIA. 221p.
- INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL. 20 de marzo de 2004. Teledetección, (On-line). España. http://www.mfom.es/ign/teledeteccion/teledeteccion_presentacion/presentacion.htm
- INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES Proyecto Algarrobo. 2004. Detección de Cambios en los Bosques Secos del Norte del Perú, (On-line). <http://www.proyectoalgarrobo.org.pe/detnor.pdf>
- JENSEN, J and JACKSON, M. 2005. The Remote Sensing Process, (On-line). <http://www.cas.sc.edu/geog/rslab/Rsc/fmod1.html>
- JENSEN, J. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2ª Edición. Prentice Hall. 316p.
- KORTE, G. 2001. *GIS Book*. 5ª Edición. Toronto, Ontario, Canada: Onword Press. 387p.

- LA PRENSA. 23 de Febrero de 2005. Entre los años 1978 y 2001 la deforestación se triplicó, (On-line). <http://www.laprensa.com.bo/20040926/ciudad/ciudad01.htm>
- LEICA. 1999. Introducción al Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Versión 1. Leica Geosystems inc. Suiza.
- LIU, M; KAFATOS, R and GOMEZ, H. 15 de Febrero de 2005. Multi-angular Satellite Remote Sensing and forest inventory data for carbon stock and sink capacity in the eastern United States forest ecosystems, (On-line). www.isprs.org/istanbul2004/comm1/papers/101.pdf
- LUNETTA, R; JOHNSON, D; LYON, J & CROTWELL, J. 2004. Impacts of Imagery Temporal Frequency on land-cover Change Detection Monitoring. Remote Sensing of Environment. (89): 444 – 454
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J y PORTA, J. 1999. Tecnologías de la información espacial (Fotointerpretación y SIG) en el análisis de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña). (In: González – Alonso, S. (coordinador), 1999. Madrid. pp. 465 – 482
- METTERNICHT, G. 2001. Assessing temporal and spatial changes of salinity using fuzzy logic, remote sensing and GIS. Foundations of an expert system. Ecological Modeling. (144): 163 – 179
- MICHENER, W and HOUHOULIS, P. 3 de Febrero de 2005. Identification and Assessment of Natural Disturbances in Forested Ecosystems: The Role of GIS and Remote Sensing, (On-line). http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD_ROM/sf_papers/michener_william/michener.html
- MINISTERIO DE AGRICULTURAL. 2005. Decreto 193 de 1998, (On-line). <http://www.bcn.cl/portada.html>
- MOSTAGHIM, P. 2004. Analysis of Land-Use in the Rio Aconcagua Watershed, Chile by Interpretation of LANDSAT 7 Enhanced Thematic Mapper Plus Satellite Imagery. Colonge, Germany. The University of applied sciences, Institute for Technology in the Tropics. Master Thesis.

- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. 2004. Landsat Tutorial, (On-line). <http://www.nasa.gov/home/index.html>
- NOVOA, R y HERRERA, G. 2001. Uso del análisis de imágenes en el diagnóstico del “*virus de la tristeza de los cítricos*” en limoneros, Valle de Mallea, Chile. *Agricultura Técnica*. 62(4): 606 – 615
- OFICINA DE ESTUDIOS Y POLITICAS AGRARIAS. 2004. Estadísticas de la Agricultura Chilena, (On-line). <http://www.odepa.cl>
- OFICINA DE ESTUDIOS Y POLITICAS AGRARIAS - CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES. 2002. Catastro Frutícola V Región, Principales resultados. Santiago, ODEPA CIREN. 41p.
- OYARZUN, C. 1997. Estudio a Mesoescala de la Erosión del Suelo en una Cuenca Hidrográfica de Montaña, Chile Central. *Meridiano*. (5): 23 – 28
- PRADOS, M. 1995. Teledetección, agricultura y medio ambiente: el empleo de imágenes Landsat-5 en el seguimiento y evaluación estadística de los regadíos en la cuenca baja del Guadalquivir. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 250p.
- PRINS, E and KIKULA, I. 1996. Deforestation and regrowth phenology in miombo woodland – assessed by Landsat multispectral scanner system. *Forest Ecology and Management*. (84): 263 – 266
- PROCHILE. 2003. Tratado de Libre Comercio Chile-Estados Unidos. Oportunidades para las regiones, (On-line). http://www.prochile.cl/chile_usa/chile_usa_indice.php
- RIDD, M and LIU, J. 1998. A Comparison of four Algorithms for Change Detection in an Urban Environment. *Remote Sensing of Environment*. (63): 95 – 100
- ROGAN, J; FRANKLIN, J and ROBERTS, D. 2001. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*. (79): 1 – 14

- ROSEMBERG, G. 1990. 2004. La industria del Palto – producción y perspectivas, (On-line). http://www.avocadosource.com/journals/civdmchile_1990/civdmchile_1990_pg_01.pdf
- SCHLATTER, J.; GREZ, R. y GERDING, V. 2003. Manual para el Reconocimiento de Suelos. 3ª Edición. Valdivia. Universidad Austral de Chile. 114p.
- SECRETARIA DE AGRICULTURA Y GANADERIA. 20 de marzo de 2004. Sistemas de Información Geográfica, (On-line). <http://www.sag.gob.hn/infoagro/biofisica/sig.html>
- TARDIE, P. 2004. A change detection analysis: using remotely sensed data to asses the progression of development in Essex County, Massachusetts from 1990 to 2001, (On-line). <http://www.unh.edu/natural-resources/pdf/tardie-paper1.pdf>
- UMAÑA, A. 2000. Frutales repletan cerros. El Mercurio de Valparaíso, (On-line). <http://www.mercuriovalpo.cl/site/edic/20001114211016/pags/20001114230555.html>
- UNIVERSIDAD DE CHILE. 1999. Informe país, Estado del medio ambiente en Chile, (on line) <http://www.centrogeo.org.mx/unep/documentos/Chile/CHILE.pdf>