

# Estudio del crecimiento urbano de la ciudad de Valdivia (Chile) a través del uso integrado de imágenes de satélite, SIG y equipos GPS

V. Herrera

Correo electrónico: [vherrera@lauca.usach.cl](mailto:vherrera@lauca.usach.cl)

Universidad de Santiago de Chile – Proyecto DICYT - Casilla 10233

Correo Central Santiago, Chile; Fax: (562) 681-1213.

## RESUMEN

El propósito de este proyecto es demostrar la potencialidad de diferentes imágenes procedentes de diversos sensores remotos y tecnología GPS en estudios de crecimiento urbano. Los procedimientos involucrados consisten en hacer clasificaciones del uso del suelo, determinados por la información de cada imagen con procedimientos visual y digital. Adicionalmente, la última información cartográfica hecha con mediciones GPS, fue indispensable en la actualización y estudio de importantes cambios en diferentes puntos de la ciudad, proporcionando mediciones precisas en georreferenciación.

**PALABRAS CLAVE:** sensores remotos, clasificación digital, planificación urbana, cubierta urbana.

## ABSTRACT

The purpose of this project is to demonstrate the potential of different images proceeding of diverse remotes sensing and GPS technology in urban growth studies. The procedures involved making consistent in land use classifications determined by each image data with visual and digital processing. Additionally, the last cartography information, made with GPS measurements, was indispensable in the actualization and study of important changes in different points of the city, providing precise measurements in georeference.

**KEY WORDS:** remote sensing, digital classification, urban planning, urban land cover.

## INTRODUCCIÓN

La información derivada del uso de diversos sensores remotos, producto del avance tecnológico en materia satelital, ha demostrado ser una herramienta fundamental y eficaz en la detección de fenómenos y cambios producidos en nuestro medio físico y humano, que facilita la labor de los planificadores, permitiendo establecer planes para la gestión de los recursos propios de cada región.

El crecimiento demográfico y el desarrollo económico de un país implica una mayor demanda de recursos naturales y una mayor necesidad de espacio para el uso de distintas actividades inherentes a la existencia del ser humano; y el crecimiento de las ciudades es un signo de tal fenómeno. En este contexto, el objetivo de nuestro trabajo se centra en el uso de diversos sensores remotos, desde productos fotográficos hasta algunos de los más usados sistemas satelitales lanzados al espacio, como LANDSAT-TM, SPOT-HRV y ERS-2, para estudiar el crecimiento urbano experimentado durante el período comprendido entre 1961 y 1998 por la ciudad de Valdivia (Sur de Chile). Además, utilizaremos dicha tecnología para estudiar los efectos de la intervención antrópica en el área de estudio y la evolución en la ocupación del suelo. Dentro de este marco, nuestro trabajo de investiga-

ción analizará la utilidad de diversos sensores remotos en el seguimiento del crecimiento urbano de la ciudad de Valdivia. Esta ciudad sufrió, en Mayo de 1960, uno de los sismos más grandes que se recuerdan en el mundo, quedando completamente destruida tras el maremoto que siguió al sismo, por lo que estudiaremos su evolución desde su reconstrucción tras dicho evento hasta la actualidad, imprimiéndole de esta forma un carácter multitemporal.

El estudio considerará no sólo la aplicación de imágenes (ortofotos, mosaicos e imágenes satelitales) de distintos sensores remotos, sino que además se analizarán las ventajas de unas respecto a otras desde un punto de vista técnico. A lo largo del estudio se analizarán distintos métodos y alternativas de levantamientos tradicionales con aporte de otras tecnologías, como es el caso de la conjunción SIG/GPS, aspectos que engloban un conjunto actualizado de técnicas y procedimientos que, sin duda alguna, serán interesantes de investigar.

## ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de Valdivia, perteneciente a la X Región de Chile, se encuentra situada en la llamada zona de Los Lagos. La ciudad se inserta en el

meandro que forma el río Calle frente a la ciudad y a la isla Teja. Precisamente, en uno de los pocos llanos insertos en el sistema fluvial. El centro urbano de Valdivia se encuentra en las coordenadas geográficas: Lat 39° 49' S y Long 73° 14' W; zona de alta pluviosidad, entre 1.800 y 2.500 mm anuales, con temperaturas medias anuales que oscilan entre los 9°C y los 12°C.

La ciudad de Valdivia presenta un claro ejemplo de adaptación a un medio que ofrece contrastes y diversidades naturales poco comunes, las que a su vez hacen que esta zona posea un gran atractivo turístico, algunas de ellas protegidas, como es el caso de la Reserva Nacional Río Cruces. Nuestra zona de estudio se sitúa alrededor de esta ciudad, y está delimitada por las coordenadas UTM: Vértice SO: E 647.000 N 5.585.000. Vértice NE: E 656.000 N 5.596.000.

Si nos centramos en la zona de estudio y definimos un radio de 15 Km desde el centro de la ciudad de Valdivia, notaríamos que la geomorfología está caracterizada por zonas planas inundadas, producto de los movimientos telúricos que en el mes de mayo del año 1960 afectaron a la región Sur de Chile, provocando el hundimiento de zonas bajas en los alrededores de la ciudad de Valdivia, sufriendo la inundación natural por las aguas del sistema hidrográfico valdiviano.

## MATERIAL A UTILIZAR

Las imágenes utilizadas en el presente estudio han sido seleccionadas por diversas razones. En primer lugar, incluyen diferentes productos de escala suficiente para estudios del medio urbano, ofreciendo la oportunidad de comparar las ventajas e inconvenientes de uso de unas frente a otras. En segundo lugar, los documentos seleccionados posibilitan el estudio multitemporal de la ciudad de Valdivia, desde su reconstrucción tras el sismo (1961) hasta prácticamente la actualidad (1997).

En función de estos factores, los documentos seleccionados han sido:

- Mosaico escala 1:20.000. Para la confección del mosaico se utilizaron fotografías aéreas de 1961, las mismas que se utilizaron para la creación de la carta a escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM) editada en 1971. Las dimensiones de dicha lámina son 81 x 94 cm, que a escala 1:20.000 supone una superficie de 30.456 ha.
- Imagen LANDSAT-TM de septiembre de 1986 en formato digital. Para el análisis del medio urbano de Valdivia hemos utilizado una composición 4,3,2 en falso color convencional; donada por el Taller de Percepción Remota de la P. Universidad Católica.
- Imagen SPOT de Agosto de 1990 impresa a escala 1:100.000, composición en falso color convencional 3,2,1, similar a la utilizada con LANDSAT. Dicha imagen en papel forma parte

del material docente recibido por el autor en su participación en el curso: “*Sixth United Nations International Training Course On Remote Sensing Education For Educators*”, realizado en la Universidad de Estocolmo y organizado por las Naciones Unidas.

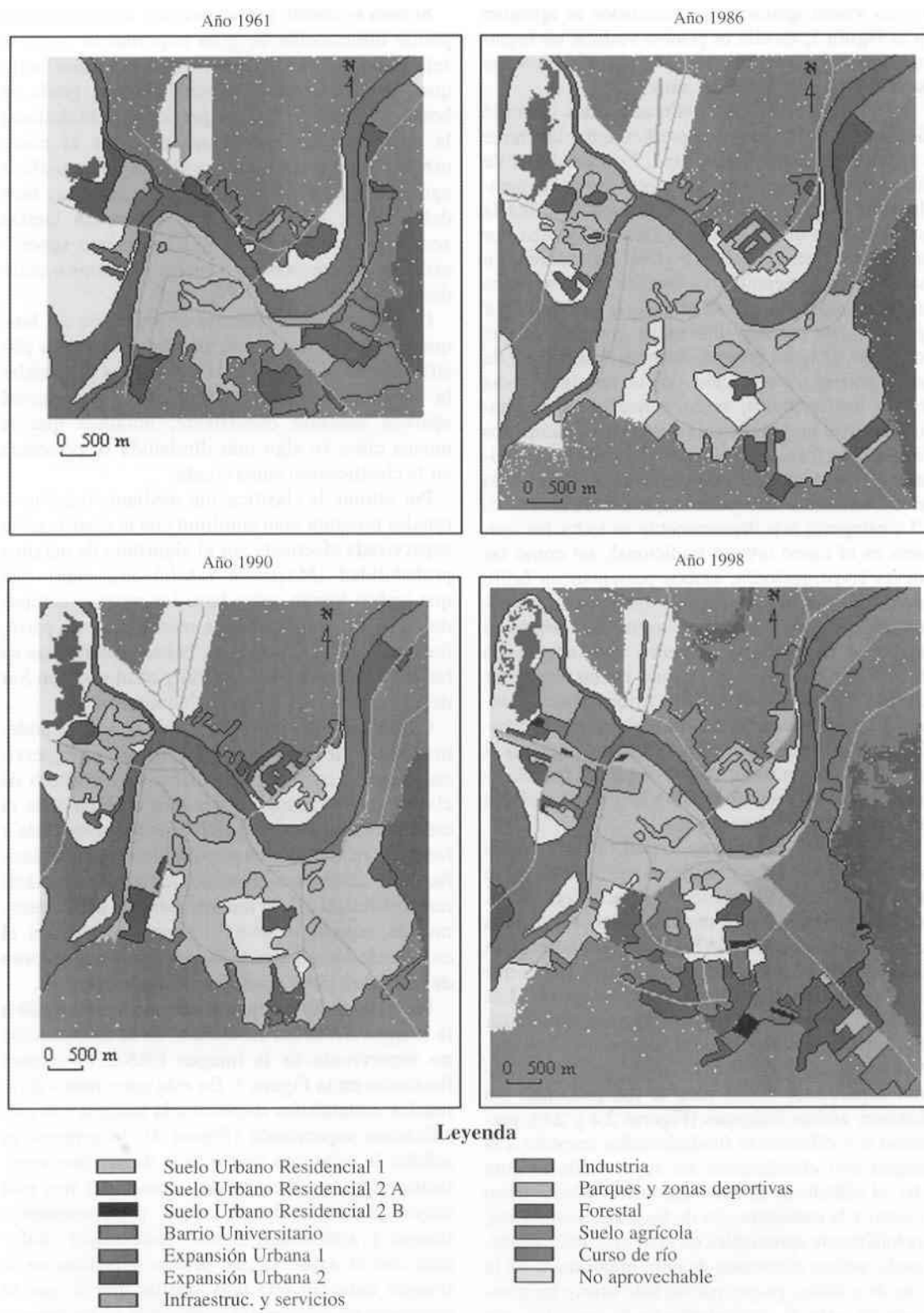
- Ortofoto escala 1:20.000. Confeccionada con fotografías aéreas de 1993. Esta consta de cuadrícula UTM y coordenadas del mismo sistema. Las dimensiones de la carta son de 54 x 70 cm, que a escala 1:20.000 supone una superficie de 15.120 ha. Al igual que el mosaico fue adquirida en el I.G.M. de Santiago para el presente trabajo de investigación.
- Imagen RADAR ERS-2 de Septiembre de 1997 en formato digital. La imagen se encuentra en banda C totalmente corregida y con una resolución espacial de 12,5 x 12,5 metros. La imagen fue donada por la Agencia Espacial Europea (ESA - Italia), interesada en la realización de la presente investigación.

## PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

El procedimiento aplicado para estudiar el crecimiento urbano de Valdivia se dividió en tres etapas: un tratamiento visual, un tratamiento digital y una actualización cartográfica. En lo referente al tratamiento visual aplicado, los resultados se aprecian en la Figura 1, en ella es posible realizar un seguimiento de lo que ha sido la ocupación urbana durante los casi últimos 37 años.

En general, el uso de distintas bandas permitió discriminar de mejor forma predios agrícolas frente a sectores de expansión urbana. Lo más difícil de discriminar fueron los sectores interiores de la mancha urbana, para ello una buena escala facilita la interpretación de los distintos sectores, ya sea por asociación, forma, tamaño u otros indicadores. En este sentido, la mejor discriminación de los sectores urbanos se obtuvo con el uso de la ortofoto. Por ejemplo, ésta permite diferenciar entre zonas que combinan en igual proporción áreas edificadas – de grano grueso, y vegetación - de textura intermedia (barrio universitario), zonas pequeñas de vegetación insertas en la urbe (plazas), y otros elementos de la ciudad (cementeros, parques y zonas deportivas), que requieren un conocimiento más profundo de la misma (Larsson y Strömquist, 1995).

La categoría más discriminable en todos los sensores es el casco urbano tradicional, así como las nuevas construcciones, ambos presentan un brillo intenso y especial. Pero no siempre es así, y algunos sectores eminentemente agrícolas, debido al estado de los cultivos, aparecen con tonalidades similares a las del suelo urbano en las imágenes LANDSAT-TM y SPOT-HRV, lo que podría confundir a estos sectores con una especie de conurbación de acelerado crecimiento; sin embargo, en el mosaico y la ortofoto, resalta su actividad cla-



**Figura 1.** Clasificación multitemporal realizada en la ciudad de Valdivia en el período 1961-1998, con el uso de distintas imágenes.

ramente agrícola, muy bien definida por su tonalidad gris intermedia y suave textura.

En cuanto al tratamiento digital, lo primero es hacer referencia a las clasificaciones hechas sobre ambas imágenes. En primera instancia, ayudándonos de la Figura 2 que resume la labor realizada sobre la imagen LANDSAT-TM, podemos decir

sin temor a equivocarnos, que fue el sensor TM el que más información suministró a la clasificación. Las tres bandas con que se contaba permitieron realizar una buena definición de los campos de entrenamiento que sirvieron de base tanto para la clasificación supervisada como para la red neuronal. No obstante, ambas imágenes (Figuras 2.a y

2.c), presentan dos diferencias fundamentales respecto a la imagen con clasificación no supervisada (Figura 2.b): el cálculo de la clase expansión urbana (tono violeta) y la consideración de las zonas inundables, especialmente apreciables en la clasificación supervisada, ambos elementos de gran importancia en la zona de estudio, ya que por un lado ofrece las posibilidades para el crecimiento de la ciudad y, por otro lado, muestra la principal limitante para dicho crecimiento.

Si bien es cierto, la clasificación no supervisada pierde información de gran importancia como la señalada en el párrafo anterior, no es menos cierto que entrega información con un mayor grado de homogeneidad, en el caso que se requiera destacar la ocupación netamente urbana, pues el casco urbano, la expansión urbana y la actual superficie agrícola, matorral y arbustiva, aparecen muy bien delimitadas; el problema lo presentan ciertas zonas que aparecen como escurrimiento superficial y que

corresponden a suelos húmedos o inundados.

Otro aspecto relevante, es la presencia del bosque en las tres imágenes, mientras que en las clasificaciones no supervisada y por redes neuronales la vegetación vigorosa como el bosque renova l aparece bastante consistente, notamos que la misma clase ve algo más disminuida su presencia en la clasificación supervisada.

Por último, la clasificación mediante redes neuronales presenta gran similitud con la clasificación supervisada efectuada por el algoritmo de máxima probabilidad (*Maximum Likelihood*), claro está que ambos toman como base los mismos campos de entrenamiento, como se mencionara en párrafos anteriores; sin embargo, existen diferencias en las zonas Noreste de la ciudad y en el extremo Sur de Valdivia, en las zonas de inundación.

Conforme a los procedimientos aplicados podemos decir que en el caso de la imagen no supervi-

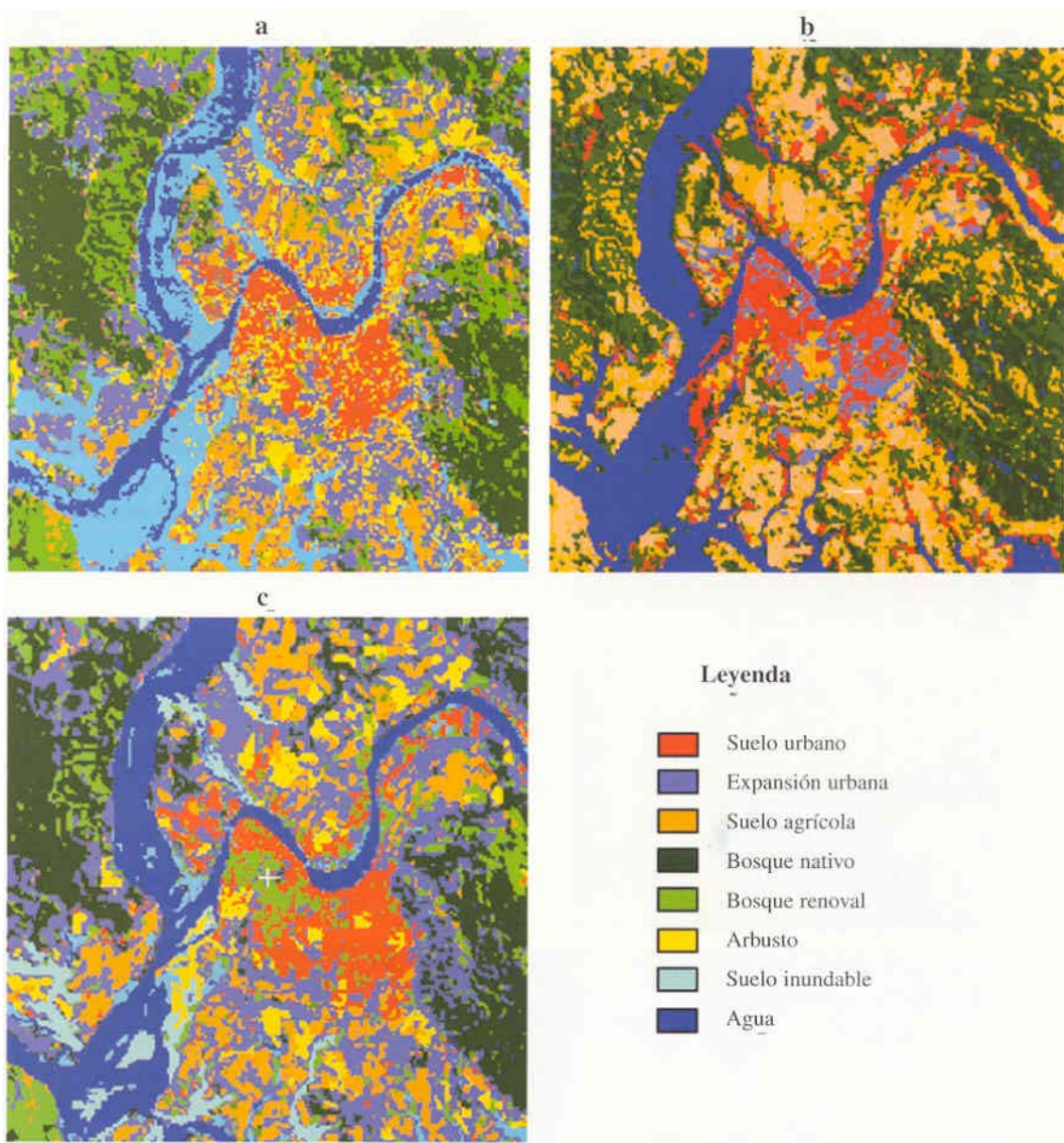


Figura 2. Clasificaciones de la imagen LANDSAT-TM:(a) supervisada; (b) no supervisada;(c) redes neuronales.

sada resulta conveniente utilizar su algoritmo de clasificación cuando se requiera analizar más el crecimiento urbano respecto al entorno agrícola y forestal; en cambio, tanto para el caso de la clasificación supervisada (uso del algoritmo de máxima probabilidad) y la red neuronal, su uso se recomienda cuando el estudio apunte más hacia el estudio de los obstáculos que presenta el entorno de la ciudad y sus posibilidades de expansión.

Pasando ahora al tratamiento digital aplicado a la imagen SAR, los resultados de la clasificación no supervisada de la imagen ERS-2 los vemos ilustrados en la Figura 3. En esta apreciamos diferencias sustanciales respecto a la imagen con clasificación supervisada (Figura 4), lo primero es señalar la cobertura mayoritaria de la clase vegetación vigorosa (tono verde), pero, a su vez, esta mayor presencia de cobertura, preferentemente bosque y agricultura, implica una mayor confusión con el agua, ya que ambos presentan en la imagen radar un ND muy similar, por lo que la presencia de agua en las cotas altas se ha intensificado, y los ríos Calle Calle, Cau Cau y Cruces, aparece prácticamente como lagunas.

La mancha urbana (en tono rojo) aparece bien demarcada, pero el mayor peso de la cobertura

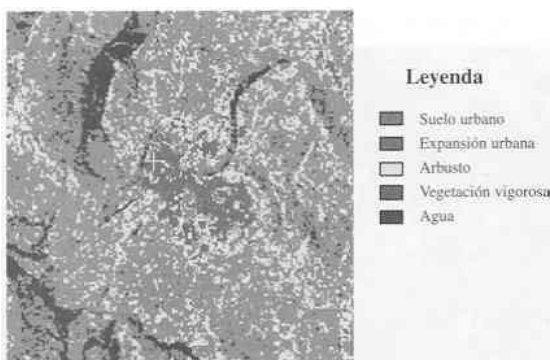


Figura 3. Clasificación no supervisada de la imagen ERS-2.

agrícola, arbustiva y de matorral, la hacen aparecer de manera difusa, incluso con la aplicación del filtro modal vemos que los píxeles vecinos vegetacionales, de mayor presencia, han hecho desaparecer el barrio universitario y, en general, la ocupación urbana en la isla Teja. También no aparecen la industria maderera en el sector Collico, el aeródromo Las Marías y una parte cercana al río Calle Calle del sector Las Animas.

Por otra parte, el filtro modal aunque corrige buena parte de los defectos de exceso de zonas húmedas en la imagen radar, también elimina los principales rasgos morfológicos de la imagen, como por ejemplo: las zonas de escurrimiento superficial, que acompañan a las zonas de vegetación vigorosa, perdiendo con ello profundidad y calidad en la textura, formas y bordes de los elementos que componen la imagen.

De la Figura 4 podemos deducir diversas opiniones que pueden resultar engañosas, ya que debe-

mos recordar que el principio de este resultado de la clasificación supervisada se debe a la previa definición de los campos de entrenamiento y su indiscutible separación entre las clases definidas y que servirán de base para la posterior clasificación de la imagen completa. Ya en un principio se pudo advertir lo complicado que resultaba esta operación, no por falta de conocimiento de la zona, por el contrario, la imagen presentaba ciertas características inherentes a las imágenes radar que dificultaban la correcta separación entre categorías (acción del viento, ángulo de incidencia, pendientes, sombras, rugosidad, etc.), hecho que concuerda con lo señalado por Sabins (1987), en que las zonas de sombras no producen retorno de energía hacia la antena SAR y que puede solucionarse con un doble barrido y disponer de dos imágenes ERS-2, lo cual ya es más difícil; por el contrario, superficies de tonalidad intermedia y difusa corresponden a vegetación densa que producen una gran dispersión en todas direcciones que afecta incluso al retorno hacia la antena. Estos problemas se ven reflejados en algunos aspectos de la imagen como son la intermitencia de los cursos de ríos, debido a las causas acotadas anteriormente. Este hecho implica la presencia poco delimitada de la isla Teja, la unión de sectores de tierra y la no visible evacuación del río Cruces.

Un punto a favor lo constituye la aplicación del filtro modal que logra aislar el problema de la escasa separación entre el bosque nativo y el agua en las cotas más altas de la zona de estudio (frente al costado Oeste de la isla Teja). Por otra parte, la consideración de 4 clases aporta un carácter de mayor presencia a la zona de tierra, aunque no permite separar las clases de vegetación más vigorosa (bosque bosque renoval), zonas agrícolas y bosque-arbusto, en general, la diversidad vegetal (árboles, plantaciones, cultivos y otros) no permite una mejor separación. Lo que es aprovechable al máximo es sin lugar a dudas la presencia del suelo urbano, ya que su inconfundible brillo en la imagen permiten que su identificación sea inmediata, confiable bien delimitada.

Los sectores más afectados por la falta de diferenciación de clases son aquellos que se encuentran localizados a orillas de los ríos, ya que es muy

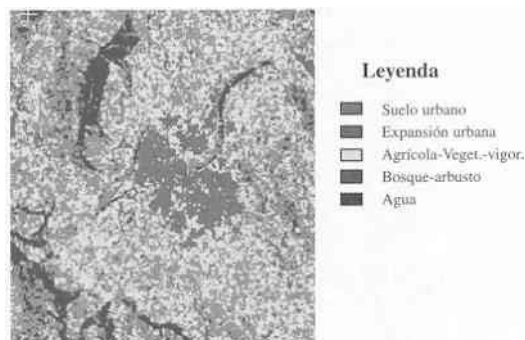


Figura 4. Clasificación supervisada de la imagen ERS-2.

fácil confundir en esta imagen, para los no conocedores de la zona, los cursos de ríos con lagunas de diversos tamaños insertas en el área de estudio. Esta característica es resultado de una falta de resolución espectral que perjudica a ambas clasificaciones, por esta razón los dos tipos de clasificación presentan variaciones que dependen exclusivamente del número de categorías que podemos reconocer en una clasificación no supervisada, y del número de campos de entrenamiento que es capaz de definir y discriminar el operador.

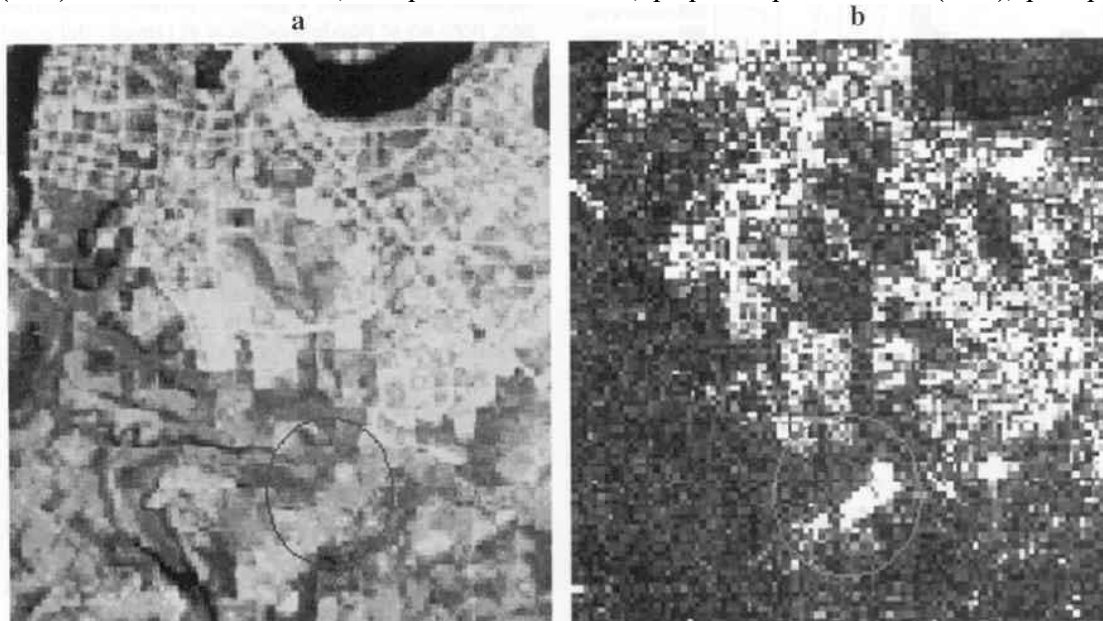
En su conjunto estos errores quedan de manifiesto, de una u otra forma, en el proceso de verificación de los resultados, para lo cual se recurrió al uso de puntos de control distribuidos sistemáticamente. El principal problema lo constituyeron zonas de respuesta espectral muy similar que produjo confusiones en los algoritmos de clasificación, hecho que también dependía del tipo de imagen y del número de bandas utilizadas. Además, este mismo hecho impidió un mayor poder de discriminación de clases al momento de constituir la leyenda que sufrió modificaciones conforme a las potencialidades y desventajas técnicas (número de bandas, resoluciones, etc.) que ofrecía cada imagen en particular.

Es conveniente aclarar que otros procedimientos de clasificación como el análisis lineal de mezclas espectrales (ALME) y el análisis de componentes principales (ACP) pueden ser aplicados, si se cuenta con el debido respaldo en la base de información técnica, por ejemplo: la aplicación del ALME está en directa relación con el número de bandas disponibles para la obtención de componentes puros, por lo tanto, su aplicación para el estudio del crecimiento urbano fue desestimada, más aún al no poder contar con la banda del infrarrojo medio (IRM). Por razones similares, la aplicación de

componentes principales generada a partir de la matriz de varianza - covarianza obtenida a partir de las bandas originales (Chuvienco, 1996); el ACP sintetiza así las bandas originales, creando nuevas bandas (los componentes principales de la imagen) que recojan la mayor parte de la información original. Por la misma escasez de bandas fue desechada su aplicación.

Sin embargo, esta síntesis que puede lograrse a partir de distintos modelos de clasificación resulta muy conveniente de utilizar en estudios de carácter multitemporal, al respecto no podemos dejar de mencionar este tipo de estudios que hubiera sido provechoso utilizar entre una imagen Landsat-TM de 1986, que con tres bandas define bastante bien la zona de estudio, y una imagen SAR reciente de 1997 cuya mezcla para un análisis multitemporal sería interesante de realizar. No obstante, tal como pudiéramos comprobar con las clasificaciones y procesos de tratamiento digital destinados a mejorar y resaltar las áreas de interés par el estudio de crecimiento urbano, resulta poco apropiado y aconsejable el uso de la imagen ERS-2 para estudios de detalle, como el reconocimiento de cambios en el suelo urbano. Si observamos la Figura 5, comprobaremos el crecimiento de la ciudad en dirección Sur de Valdivia, pero este sector aparece desvinculado de la ciudad en la imagen ERS-2, situación que no es así ya que fue comprobada en salida a terreno del mes de Diciembre de 1998, en la imagen completa ya analizamos la no presencia de suelo urbano en la isla Teja, hechos que en suma hacen poco confiable aplicar esta imagen para un estudio multitemporal.

Aunque el estudio multitemporal no es adecuado con las imágenes de que disponemos, sí es posible bajo la premisa de actuar con "tecnologías asociadas", propuesto por Backhoff (1994), pero para



**Figura 5.** (a) Zoom realizado sobre la imagen LANDSAT-TM de 1986 donde se destaca en el círculo azul el área hacia donde se ha producido la expansión urbana; (b) zoom sobre la imagen ERS-2 de 1997 que demuestra, demarcado en un círculo rojo, la ocupación urbana del sector extremo Sur de Valdivia

ello deberemos dirigir nuestra investigación hacia el uso de otra tecnología de características satelitales, pero con base geodésica, como es el uso de sistemas de posicionamiento global o G.P.S. (Corbasí, 1998), que apunta a la actualización cartográfica, esta alternativa reemplazará la detección de cambios en la ocupación del suelo urbano a través del uso de imágenes de satélite para estudios multitemporales, por el levantamiento con equipos GPS.

Así, tenemos que la información básica para este tipo de operaciones, como es la actualización cartográfica, es el dato georreferenciado o coordenadas de la superficie que se desee destacar planimétricamente. En otras palabras, tenemos un cambio en la ocupación del suelo que deseamos registrar en algún tipo de documento cartográfico para mantenerlo al día, y para ello necesitamos vaciar información planimétrica (límites de la superficie a registrar) e informacional (que cosa es, ejemplo: hospital, residencial, industria, etc.) que debe inicialmente coincidir con los datos de referencia elipsoidal, de lo contrario se corre el grave riesgo de que al realizar un análisis multitemporal se pueda considerar como un cambio en la ocupación del suelo, en un mismo sector, dos zonas contiguas que estén cartográficamente mal georreferenciadas.

Durante esta última etapa se utilizó el SIG IDRISI, de formato raster, como alternativa al proceso de actualización, teniendo como objetivo mostrar la creación cartográfica directa con el uso de GPS (De Freitas, 1997); es decir, una vez clasificada una imagen podemos prescindir de otras imágenes para realizar la actualización y recurrir directamente al manejo de coordenadas para la confección de nuevos mapas (Figura 6).

De esta manera, una vez efectuado el levantamiento GPS y asegurado el elipsoide de referencia local o que coincida con el sistema utilizado en cartografía a actualizar, procedemos a ingresar los puntos, que definen los polígonos correspondientes a las zonas a actualizar (Figura 6). Posteriormente, se procedió a definir los parámetros de esta nueva cartografía de actualización, como por ejemplo: tamaño de la



Figura 6. Mapa vectorial obtenido a partir del ingreso de coordenadas GPS pertenecientes al sistema de referencia SAD-69, procesadas con IDRISI

tamaño de la matriz, formato para almacenar los valores, su georreferenciación y otros. En el caso de actualizar un mapa ya existente, la operación es más sencilla aún, ya que la imagen al estar georreferenciada permite abordarla y posicionarse en los mismos puntos levantados en terreno con el equipo GPS y efectuar el cambio directamente sobre la imagen, o sea, se dibujan sobre ésta los cambios constatados en terreno mismo.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez finalizados ambos tipos de tratamientos, visual y digital, podemos analizar con mayor detenimiento los distintos procesos y algoritmos que constituyen la base del presente trabajo de investigación. La tendencia inmediata es la comparación entre imágenes de satélite, cuyos procedimientos de clasificación han sido distintos; así, si comparásemos el tratamiento digital realizado con la imagen LANDSAT-TM y el análisis visual aplicado a la imagen SPOT-HRV de mayor resolución espacial, tenemos que en primer lugar, a pesar de poseer esta última la escala más pequeña existen formas de mejorar este parámetro (Lillesand y Kiefer, 1994). En el caso de LANDSAT-TM el empleo del tratamiento digital podría mejorar la calidad del detalle espacial aumentando a gusto el tamaño de la imagen, pero no se puede modificar el tamaño del píxel de 30 x 30 metros, por lo tanto, no resulta concluyente la discriminación de tipos de suelo, ya que se debió recurrir al apoyo de los otros sensores e imágenes para suplir la falta de separación de distintas ocupaciones de suelo en la dicha imagen.

En cuanto a la resolución radiométrica notamos que una comparación entre las imágenes de satélite y los documentos cartográficos con base fotográfica, como la ortofoto y mosaico, la ventaja la presentan estas últimas, ya que la interpretación visual de ellas sobre los tonos grises resulta inicialmente más rápida y cómoda que con la previa intervención de un algoritmo para clasificación digital. No obstante, aspectos específicos como sectores inundados que resultan de interés para la planificación del crecimiento urbano encuentran solución en los algoritmos de clasificación supervisada y en las redes neuronales. Además, en referencia a esto último, las redes que cuentan con supervisión tienen la capacidad de "aprender" a partir de planos originales de información (neuronas) que definen una o más entradas sobre una o más salidas (Openshaw, 1997). Este aspecto representa una diferencia sustancial respecto a los demás tipos de clasificación en general, ya que mientras mejor esté adiestrada una red los resultados serán más confiables, por lo que la tendencia para futuras investigaciones parece estar trazando su rumbo en esta dirección. Esto no podrá ser significativo para zonas de estudio pequeñas, pero a medida que

aumenta el volumen de información y coberturas de superficie a clasificar los tiempos de proceso deben disminuir, por lo que esta alternativa representa una óptima solución.

Por su parte, la imagen ERS-2 también realiza su aporte a la investigación, aunque de manera más limitada, pues no debemos olvidar que el sensor activo trabaja con una banda del rango de las microondas, por lo que no es posible obtener información suministrada por el rango del infrarrojo cercano para destacar las zonas de vegetación y agua. Además, la fecha de la imagen (Septiembre) no era la más aconsejable para su posterior tratamiento, debido al viento primaveral predominante en la zona. En todo caso, ambas clasificaciones realizadas con la imagen SAR arrojaron resultados bastante similares, ya que en función de lo explicado anteriormente, en cuanto a su poder de discriminación de clases en zonas de excesiva densidad vegetacional, la separación de categorías mostró una falta de confiabilidad demostrada en las tablas de separabilidad, problema que también fue recurrente al trabajar con algoritmos de clasificación no supervisada; estando la principal diferencia en una mejor separación de clases al usar un algoritmo de clasificación no supervisada, pero que al momento de unir especies arbustivas con matorral y cultivo, se pierde información al momento de aplicar el filtro modal para eliminar el ruido de la imagen (Dekker, 1998).

Cabe destacar que en ambas imágenes la clasificación no supervisada adquirió una relevancia digna de mencionar, ya que el algoritmo *K-Means* o de máxima probabilidad fue lo suficientemente eficiente para lograr una discriminación de categorías por su trabajo de comparación píxel a píxel, labor que en una clasificación supervisada es más problemática, ya que aunque los de grupos o bloques de píxeles (campos de entrenamiento) son definidos por el intérprete, la separación entre clases será siempre un promedio de los píxeles considerados para cada clase.

## CONCLUSIONES

Cada uno de los sensores utilizados en este trabajo posee sus propias ventajas. Como es bien sabido, la cobertura y escala (1:20.000) de las imágenes con base fotográfica como el mosaico y la ortofoto resultan ideales para estudios del medio urbano con tratamiento visual, pero debido a la falta de resolución espectral no permiten realizar una óptima separación de los elementos urbanos, especialmente al interior de la ciudad aunque la escala es un factor muy favorable.

El problema de separación de clases en la imagen digital LANDSAT-TM se debió no sólo al tamaño del píxel sino también a respuestas espectrales similares en algunas zonas de la imagen, situación que fue constatada en la clasificación no supervisada, si bien los algoritmos fueron eficien-

tes en la separación píxel a píxel el problema fueron los ND similares para categorías distintas, llegando incluso a ser un problema insoluble para la imagen SAR ERS-2, cuya clasificación fue la de menor aporte, aunque sí mostraba la expansión de los últimos años en la zona Sur de la ciudad en tonos muy brillantes. En el caso de la red neuronal aplicada durante el tratamiento digital a la imagen LANDSAT-TM, puede significar un gran consumo de tiempo, no sólo el inherente al cálculo, sino también el empleado en encontrar el algoritmo más apropiado y con la combinación de parámetros que consigan la definición correcta de capas ocultas, una buena tasa de aprendizaje, la topología de la red, etc., parámetros que generarán óptimos resultados en función de un correcto entrenamiento de la red.

Por su parte, el sensor HRV ofrece una mejor resolución espacial que el sensor TM con un tamaño de píxel que favorece la interpretación en las funciones y clases posibles de apreciar en la imagen. Esto se ve favorecido por la resolución espectral con que cuenta, ya que si lo comparamos con la imagen ERS-2 esta tiene una mayor resolución espacial, pero al contar con una sola banda no entrega una mejor separación de clases o tipos de ocupación. Además, si consideramos el formato pancromático de HRV contamos con un píxel de 10x10 m, recomendable para escalas 1:25.000. Estas imágenes, XS y P, pueden combinarse entre sí, mejorando las resoluciones espacial y espectral.

Conviene recordar el aporte de cada sensor en el proceso de identificación y discriminación de elementos y coberturas, existiendo ventaja por parte de los sensores TM y HRV para la separación entre vegetación, agua y construcción; una buena separación entre el suelo urbano y no urbano en la imagen ERS-2; y predominancia por parte de la ortofoto en identificación interior de la ocupación urbana.

El aporte de los distintos sensores utilizados constituye un conjunto de potencialidades que individualmente no tendrían el mismo peso que en su aplicación integrada, siendo recomendada en la más diversa gama de proyectos relacionados tanto con el ámbito urbano como rural.

El trabajo conjunto con otras tecnologías puede solucionar el problema de actualizar cambios recientes con medidas directas de campo, que incluso abaratan los costos de operación, como fue el caso del levantamiento con GPS realizado en la zona de estudio, y su posterior integración con IDRISI, ambos unidos respaldan la teoría del uso de "tecnologías asociadas". En caso de requerir una corrección geométrica más confiable, lo mismo que una pronta actualización cartográfica, resulta recomendable el uso de sistemas GPS. Las precisiones y métodos de medición de estos equipos garantizan un trabajo que siempre estará bajo las precisiones de resolución espacial entregadas



por los píxeles de las imágenes satelitales o las escalas gráficas de cartografía temática de detalle.

## BIBLIOGRAFÍA

- BACKHOFF, M. 1994). La Tecnología de Georreferenciación (GPS/GIS) Soporte del Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte, UNAM, México.
- CHUVIECO, E. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial, 3ª edición, Madrid, Rialp.
- CORBASÍ, A. 1998. Sistemas de Navegación – Desde el Compás Magnético a la Navegación por Satélite, Madrid, Mc Graw & Hill.
- DE FREITAS, S. y CARVALHO, A. 1997. Sistemas DGPS, Geoprocessamento E Sensoriamento Remoto: Um Experimento para Actualizacáo, Cadastral de Areas Urbanas em Sao José Dos Campos SP; VIII Simposio Latinoamericano de P. Remota, Universidade de Do Vale Do Paraíba e Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Brasil.
- DEKKER, R. J. 1998. Speckle Filtering in Satellite SAR Change Detection Imagery, International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, nº 6, pp. 1133-1146.
- LARSSON, R. y STRÖMQUIST, L. 1995. Monitoreo del Medio Ambiente con Análisis de Imágenes Satelitarias, Uppsala Universitet, Tryckkontakt.
- LILLESAND, T. y KIEFER, R. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation, NewYork, J. Wiley & Sons.
- OPENSHAW, S. y OPENSHAW, C.1997. Artificial Intelligence in Geography, NewYork, John Wiley & Son.
- SABINS, F. JR. 1987. Remote Sensing Principles and Interpretation, Second Edition, New York, W.H. Freeman and Company.