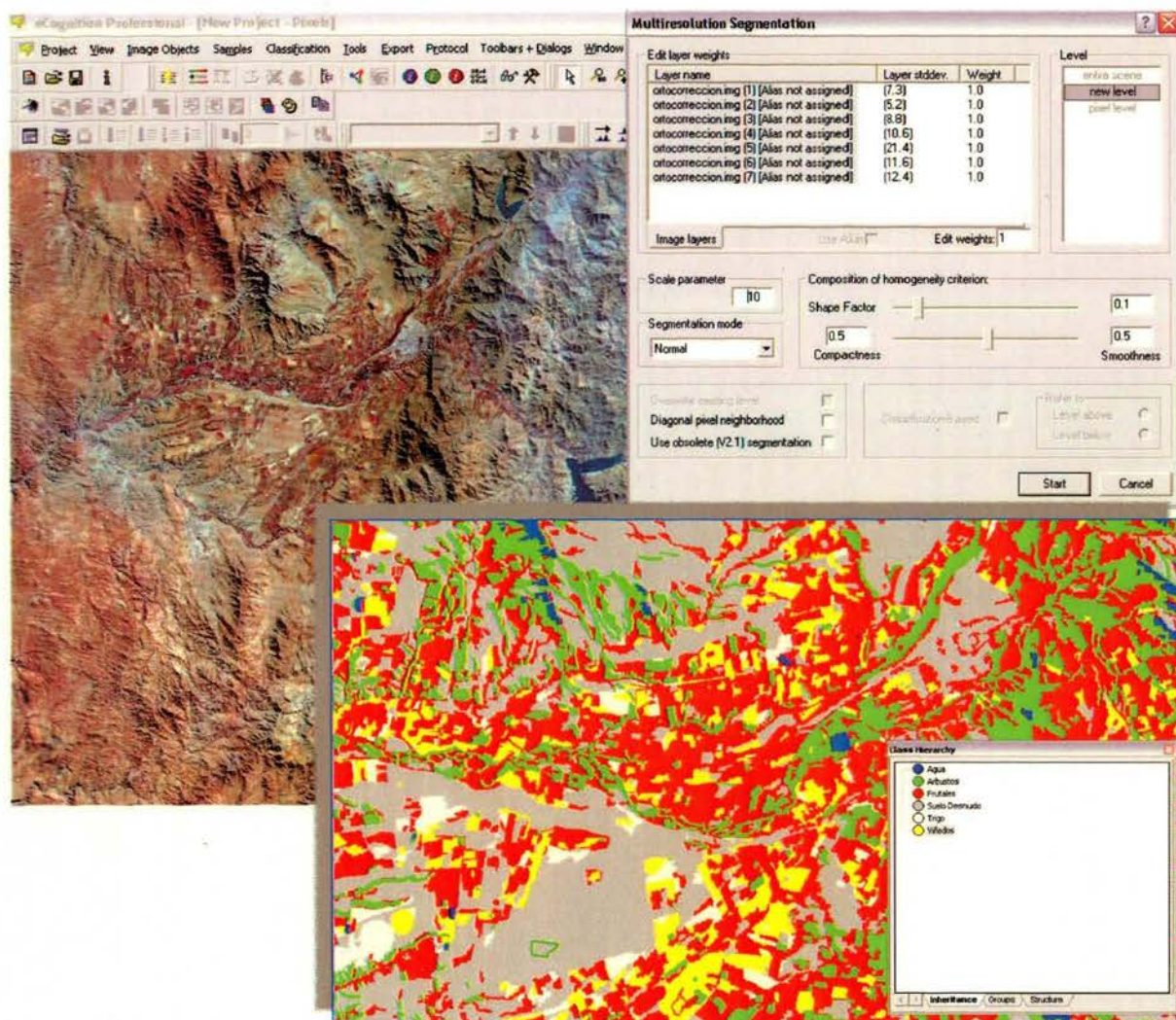


**COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO**  
**ESTUDIO:**

**CALCULO DE SUPERFICIE REGADA POR MEDIO DE**  
**TECNOLOGÍA DE SENSORES REMOTOS**  
**CUENCA RÍO LIMARÍ**

**INFORME FINAL**



**CPRSIG Ltda.**  
**Octubre, 2006**

## CONTENIDO

1. ANTECEDENTES.....	1
2. OBJETIVOS .....	1
2.1 Objetivo General:.....	1
3. METODOLOGÍA .....	2
4. RESULTADOS .....	3
4.1.- Introducción: .....	3
4.2.- Adquisición de Imágenes: .....	4
4.3.- Información Adicional: .....	10
4.4.- . Pre - Procesamiento de Imágenes:.....	12
4.4.1. Orto Corrección: .....	12
4.4.2. Calibración Radiométrica: .....	13
4.5. Interpretación Preliminar:.....	19
4.6.- Trabajo de Campo: .....	26
4.7.- Clasificación Final: .....	35
4.8. Estadística Final: .....	42
4.9. Conclusiones y Recomendaciones: .....	46

**COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO**  
**CÁLCULO DE SUPERFICIE REGADA POR MEDIO DE**  
**TECNOLOGÍA DE SENSORES REMOTOS**  
**CUENCA RÍO LIMARÍ**  
**INFORME FINAL**

**1. ANTECEDENTES**

Actualmente la Comisión Nacional de Riego se encuentra desarrollando el programa "Capacitación en Gestión Integrada de Recursos Hídricos" en las cuencas de Limarí, Maule, 3ª Sección del Aconcagua y 3ª Sección del Cachapoal. Este programa tiene como objetivo desarrollar un plan a mediano plazo, a nivel de cuencas hidrográficas, considerando los aspectos de gestión y manejo integral de la cuenca, desarrollo productivo y fortalecimiento de sus organizaciones.

Dentro de las actividades a desarrollar, por este programa de capacitación, se contempla la recopilación de datos primarios, sistematización de datos secundarios, selección y generación de información de acuerdo a los objetivos del programa y su posterior ingreso a SIG y Sistema de Base de Datos.

Como complemento a esta actividad, la Comisión Nacional de Riego, determinará la superficie total cultivada en la cuenca del río Limarí, utilizando la tecnología de sensores remotos que ha sido validada anteriormente a través de consultorías en otras regiones del país.

**2. OBJETIVOS**

**2.1 Objetivo General:**

Calcular las áreas de riego en la cuenca del río Limarí, además de identificar y cuantificar los principales rubros o tipos de cultivos en ésta zona, considerando la temporada de riego 2004 – 2005.

**2.2 Objetivos Específicos:**

- a) Adquisición de 2 imágenes Landsat correspondiente al mes de octubre 2004 y marzo 2005 del área en estudio.

- b) Aplicar las correcciones pertinentes a las imágenes involucradas.
- c) Determinación de criterios para identificar las áreas cultivadas en la cuenca.
- d) Determinación de criterios para identificar rubros de cultivos en la cuenca.
- e) Capacitación del equipo de terreno de la Comisión Nacional de Riego, para la toma de puntos de entrenamiento para la clasificación supervisada de las imágenes.
- f) Aplicación de clasificación supervisada de las imágenes satelitales para la identificación de áreas de cultivo y rubros de cultivos.
- g) Cálculo de las áreas de riego y las áreas cultivadas por tipo de cultivo.

### 3. METODOLOGÍA

a) Para el desarrollo del proyecto se utilizaron imágenes LANDSAT TM de los meses Octubre 2004, Enero 2005, Marzo 2005 y Abril 2005, las cuales fueron seleccionadas en conjunto con la contraparte técnica de la CNR.

b) Una vez obtenidas las imágenes, estas fueron orto-correctas, dándoles una georreferencia en UTM, Huso 19 y datum WGS84. Además, se les aplicó una corrección radiométrica, dejando sus valores en reflectancia.

c) Para el proceso de clasificación se utilizó el software **e-Cognition**, tomando como mínimo los siguientes patrones de clasificación:

- Frutales
- Hortalizas
- Cereales
- Praderas
- Viñas

d) Con el objetivo de validar lo que efectivamente fue posible identificar mediante la metodología de clasificación digital utilizada, estos rubros fueron revisados en conjunto con los especialistas de la CNR.

e) Se generó una metodología de clasificación que permitió identificar las áreas de riego y los principales cultivos de las zonas de estudio, agrupados según el punto d).



**f)** Como apoyo para el desarrollo del proyecto, la Comisión Nacional de Riego a través de su programa “Capacitación en Gestión Integrada de Recursos Hídricos”, generará la toma en terreno de puntos de entrenamiento para la clasificación, para esto esta entidad consultora realizó dos visitas a terreno para capacitar al grupo de trabajo, además de exponer la metodología y resultados esperados.

**g)** Se realizarán talleres destinados a funcionarios de la CNR, para dar a conocer las metodologías desarrolladas en el proyecto y la utilización del software **eCognition**.

**h)** Una vez obtenidos los resultados se programarán en conjunto con la contraparte técnica, reuniones con expertos de la CNR y visitas a terreno para determinar y chequear las zonas cultivadas bajo riego y secano obtenidas del proceso de clasificación.

**i)** Finalmente para mantener la claridad y orden en las actividades a desarrollar se entregarán informes con la metodología a realizar e informes de avance con los resultados obtenidos para terminar con un informe final que contendrá todas las actividades desarrolladas y la metodología empleada.

## **4. RESULTADOS**

En este capítulo se describe la aplicación de la metodología y los resultados de cada uno de los pasos realizados.

### **4.1.- Introducción:**

El desafío de determinar la superficie regada en una cuenca, en el fondo “conocer los cultivos en una temporada agrícola” era hasta hace poco una tarea casi imposible de realizar digitalmente. Simplemente porque la **clasificación digital**, tal como la conoce la mayoría de los usuarios de software de procesamiento de imágenes, no da respuesta o más bien no entrega los resultados esperados que reemplacen a una interpretación visual.

Con la aparición en el mercado del software e-Cognition, desarrollado por una empresa Alemana, el panorama ha cambiado radicalmente. Este software fue diseñado especialmente para extraer información de imágenes tomadas por satélites de recursos naturales, donde además de la información espectral y temporal aportada por las imágenes, se pueden introducir criterios de clasificación que consideren otros factores como tamaño, textura, factores de forma, altitudes, pendientes, exposición de laderas, índices (vegetacional, de brillo, etc.) y criterios de entrenamiento especificados por el usuario, que reflejan características especiales de los objetos a separar. Se habla entonces de un software de

**clasificación digital orientado a objetos** y se hace una diferencia marcada con respecto a los demás software que utilizan sólo métodos tradicionales de clasificación digital, basados únicamente en las características espectrales que entregan las imágenes.

En este sentido, el análisis de imágenes orientado a objetos permite hacer un uso más inteligente de los datos de la imagen y superar, en gran medida, las limitaciones de los métodos tradicionales de clasificación, incrementando su productividad, reduciendo costos y mejorando la eficiencia de la producción operacional de información geo-espacial.

El concepto que aquí se maneja es que la importancia de la información semántica necesaria para interpretar una imagen no está representada por un dato espectral simple sino en imágenes llenas de significado e interrelaciones espacio - temporales. Así, la clasificación de imágenes se basa en objetos-imagen y no en pixels individuales.

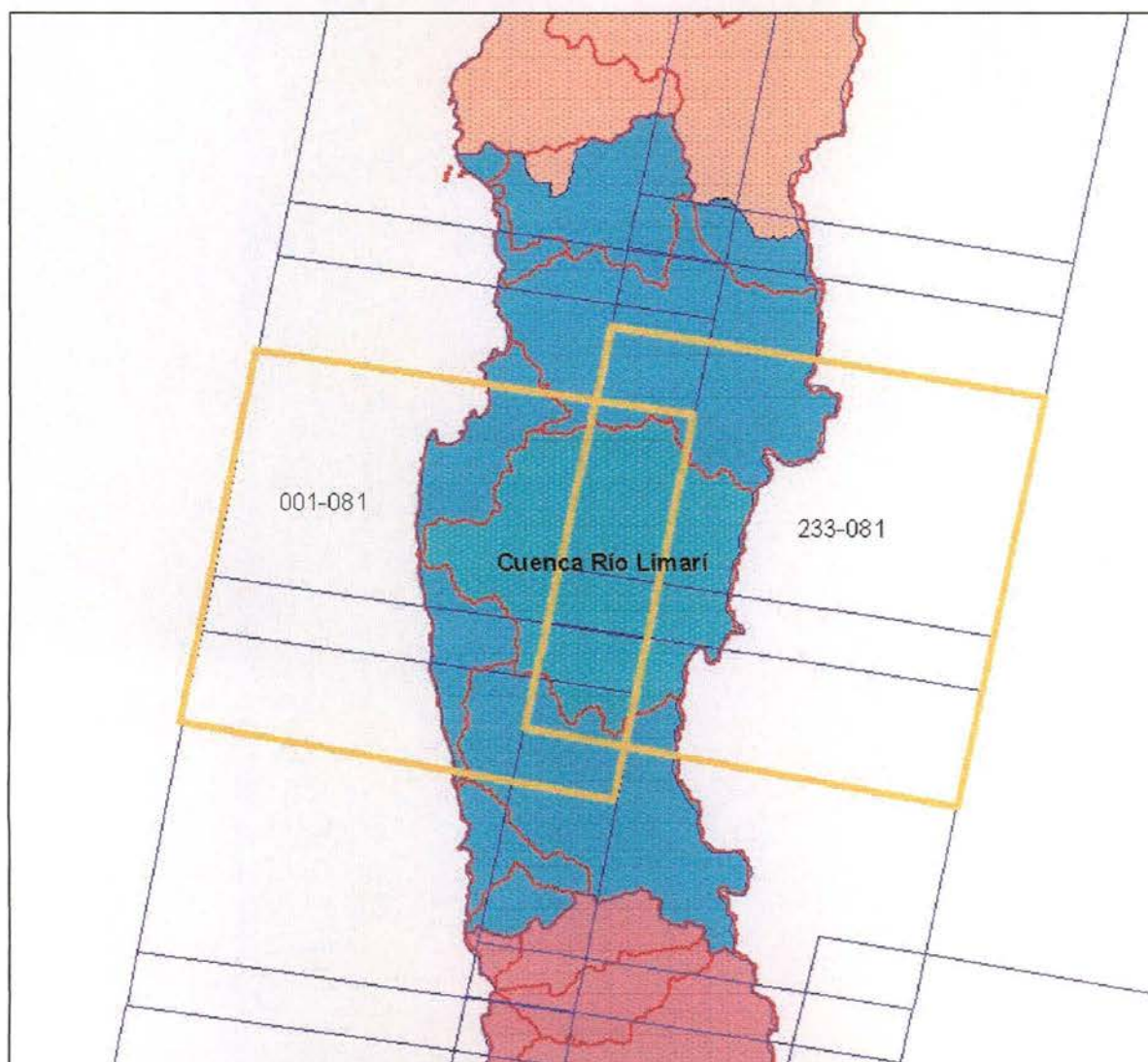
Las características de este análisis hace posible enfocar las tareas de análisis de imágenes de manera hasta ahora no resuelta. Este análisis simula el proceso cognoscitivo humano y aumenta el rango del análisis tradicional, convirtiendo los datos en información geográfica clasificada con mayor exactitud.

Es un trabajo integrado que permite clasificación automática o semi-automática permitiendo analizar datos de bajo contraste o notable textura.

Permite también entre otras cosas la fácil formulación y análisis de tareas semánticas complejas, el análisis simultáneo de datos geo-espaciales de diferente tipo y el intercambio de información de objetos y resultados de la clasificación para integrarlos o para actualizar sistemas de información

#### **4.2.- Adquisición de Imágenes:**

En la Figura N°1, se muestra el esquema de cobertura de las imágenes satelitales Landsat para la cuenca en estudio (Limarí). Para su localización se utiliza el esquema mundial de referencia (WRS), el cual divide a la Tierra en órbitas (Path) de Norte a Sur (233 órbitas) y define los centros de imagen en paralelos que cortan a dichas órbitas cada 170 Km aprox. (Row). La numeración comienza con 1 en el hemisferio Norte y termina en 96 en el Sur. La información en una órbita es fija, con un 10% de traslape en el Ecuador (aumenta hacia el Sur), pero dentro de ella la información se puede pedir desplazada para ajustarla mejor al área de estudio.



**Figura N° 1: Cobertura de imágenes Landsat del área de Estudio.**

Para este trabajo se decidió utilizar la imagen **001-081** ya que cubre el 90% del área regada total y el 100% del área regada bajo los embalses Cogotí, Paloma y Recoleta. La fechas solicitadas en los TDR fueron Octubre 2004 y Marzo 2005, sin embargo, se adquirieron 4 imágenes, agregándose una en Enero 2005 (por problemas de nubes en la imagen de Marzo) y otra en Abril del 2005 para tomar la senescencia de viñas y parronales que pudiesen haber en la zona.

Las imágenes Landsat disponibles se pueden ver en la página Web de la Agencia Espacial Argentina (CONAE) ( [www.conae.gov.ar](http://www.conae.gov.ar)) y, en las siguientes figuras se muestran las vista del catálogo (en rojo las imágenes seleccionadas):



	Sensor : TM Fecha de Inicio : 03-Oct-2004 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Sensor : TM Fecha de Inicio : 19-Oct-2004 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Sensor : TM Fecha de Inicio : 04-Nov-2004 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile
	Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 20-Nov-2004 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 06-Dic-2004 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 22-Dic-2004 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile
	Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 07-Ene-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 23-Ene-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 08-Feb-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile
	Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 24-Feb-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 12-Mar-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 28-Mar-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile

**Figura N° 2: Imágenes Landsat 5 disponibles (Octubre a Marzo)**

	Fecha de Inicio : 07-Ene-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Fecha de Inicio : 23-Ene-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Fecha de Inicio : 08-Feb-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile
	Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 24-Feb-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 12-Mar-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 29-Mar-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile
	Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 13-Abr-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 29-Abr-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 15-May-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile
	Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 31-May-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 16-Jun-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile		Satélite : LANDSAT 5 Sensor : TM Fecha de Inicio : 02-Jul-2005 Dirección : DESC Path : 1 Row : 81 Ubicación : Chile

**Figura N° 3: Imágenes Landsat 5 disponibles (Marzo a Julio)**

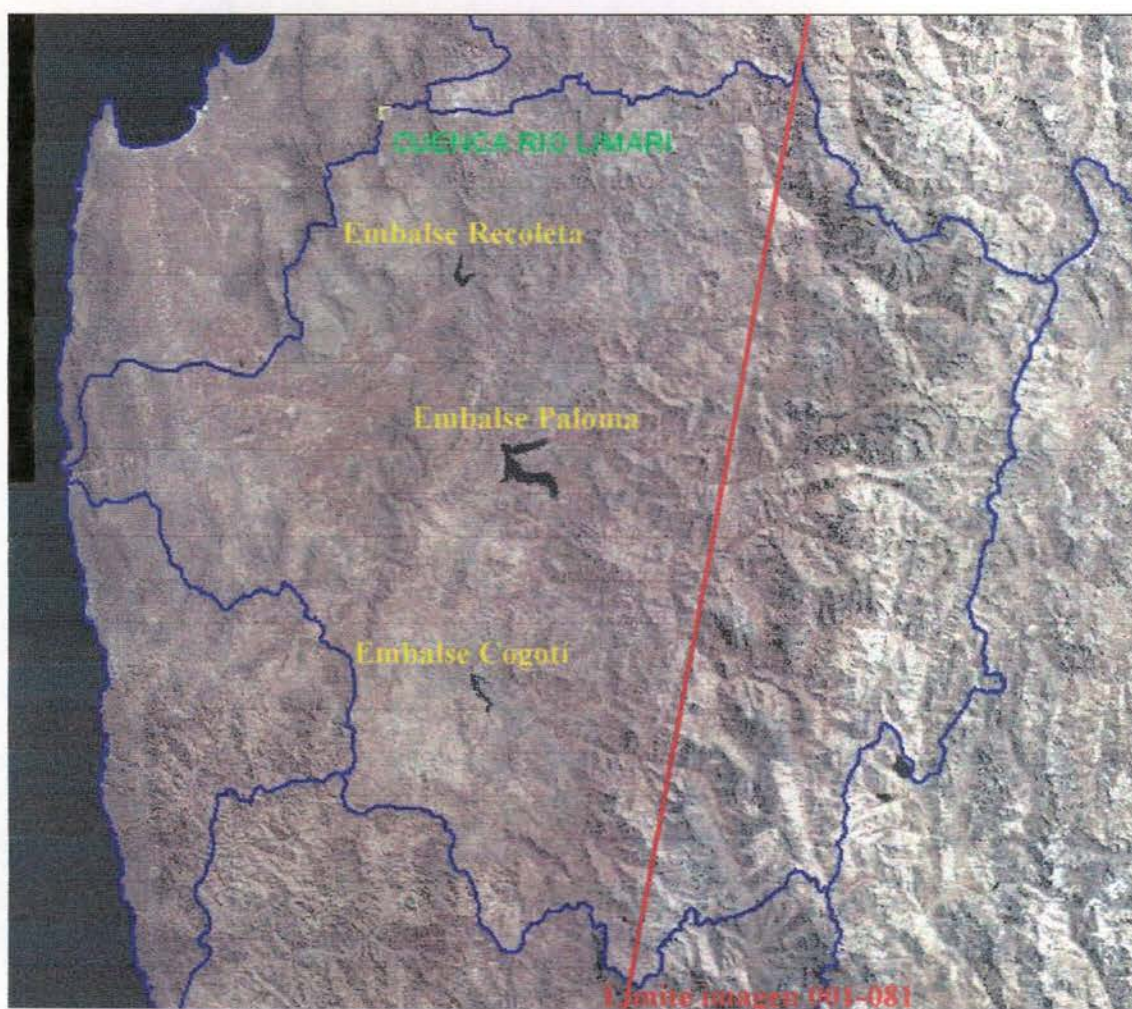
Las fechas de las imágenes y sus características son:



Fecha	Elev Solar	Azimut Solar	N° filas	N° Columnas	N° Bandas	Resol. Espacial
19 Oct 2004	54	62	7600	8240	7	25 m
23 Ene 2005	54	81	7600	8240	7	25 m
12 Mar 2005	45	60	7600	8240	7	25 m
29 Abr 2005	34	41	7600	8240	7	25 m

**Figura N° 4: Imágenes utilizadas en el estudio.**

La siguiente figura muestra la Cuenca de Río Limarí sobre el mosaico Landsat del área de estudio.



**Figura N° 5: Cuenca Río Limarí.**



Las imágenes originales son las siguientes:



**Figura N° 6: Imagen 001-081 del 19 de Octubre 2004.**



**Figura N° 7: Imagen 001-081 del 23 de Enero 2005.**





**Figura N° 8: Imagen 001-081 del 12 Marzo 2005.**

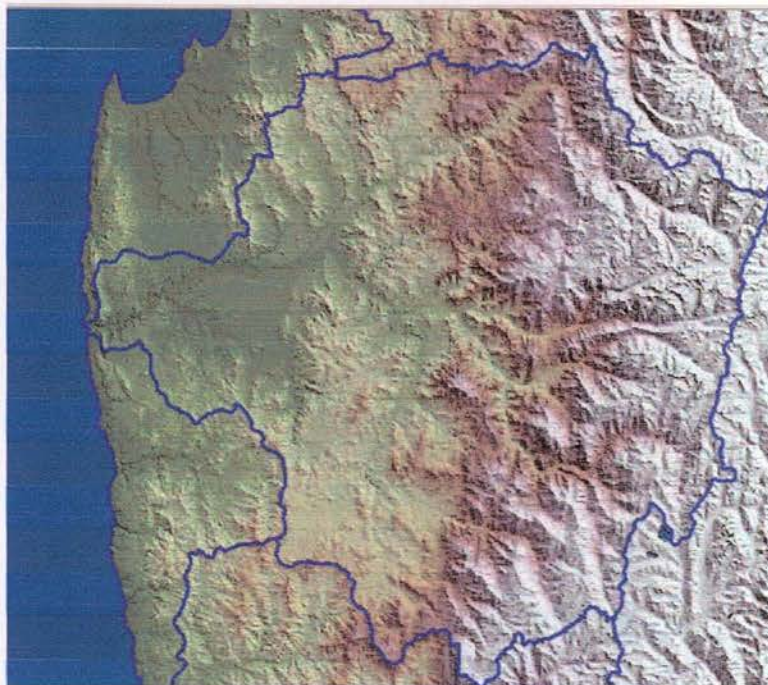


**Figura N°9: Imagen 001-081 del 29 de Abril 2005**

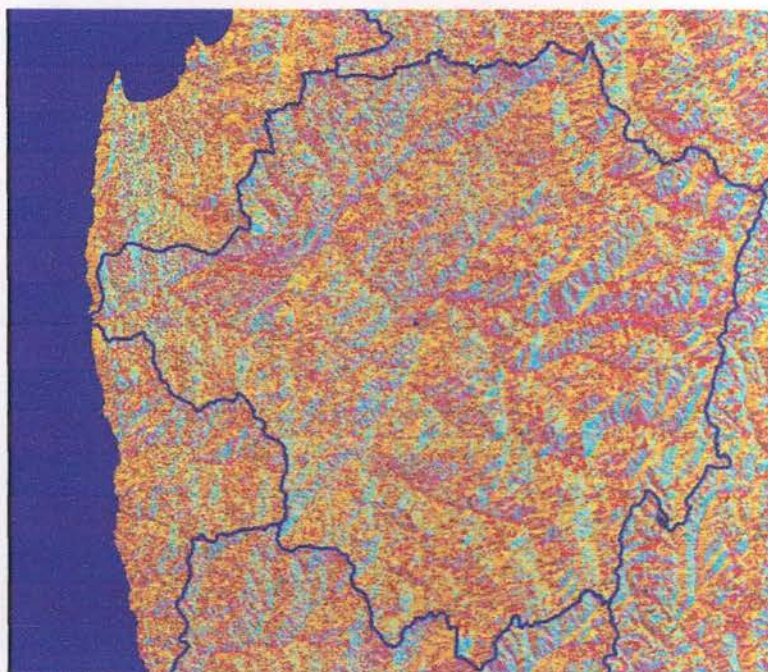


#### **4.3.- Información Adicional:**

La caracterización física de la cuenca del Río Limarí se realizó utilizando el Modelo Digital de Elevación confeccionado por el proyecto SRTM de la NASA. A partir de este modelo, se derivaron los mapas de pendientes y exposiciones usados en el procesamiento digital de imágenes.

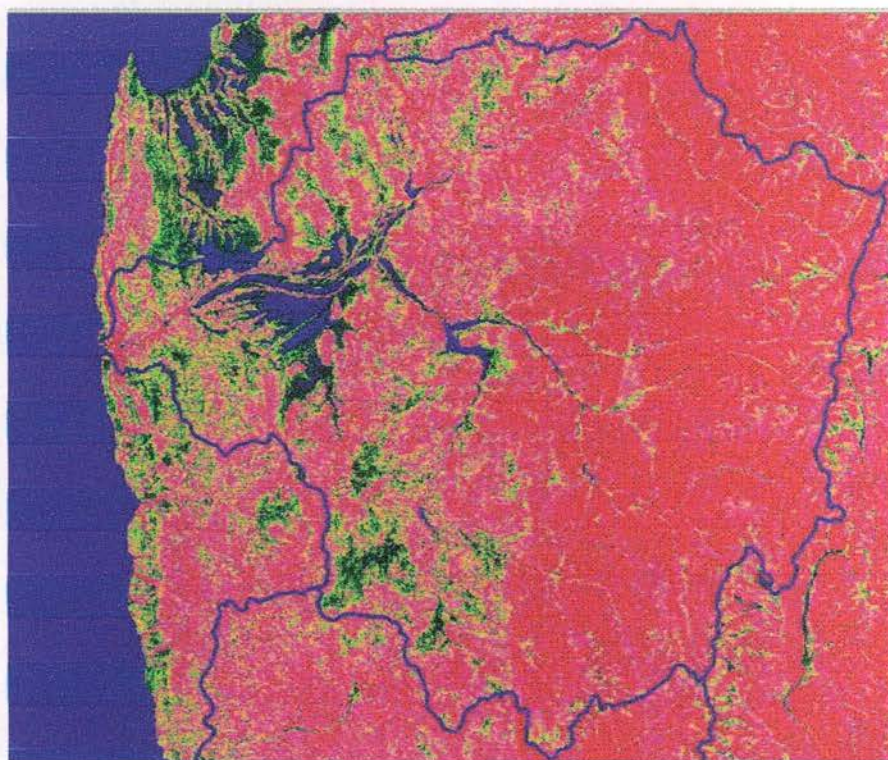


**Figura N°10: Modelo Digital de Elevación pintado por rangos de altitud.**



**Figura N°11: Exposición de ladera (tonos celestes = exposición Sur)**





**Figura N°12: Pendientes (en rojo pendientes sobre 20 grados)**

La información vectorial preparada para el área de estudio fue la siguiente:

- Hidrografía (drenos MIDEPLAN - DGA)
- Hidrografía (cuerpos de agua - MIDEPLAN)
- Cuencas (DGA)
- Sub Sub cuencas ( DGA).
- Caminos (MOP – MIDEPLAN - CPRSIG)
- Agroclimas (CIREN - CNR)
- Uso Suelo (CONAF)
- Tipos de Suelos (CIREN – CNR)
- Cauces (CNR)
- Canales (CNR)
- Bocatomas (CNR)
- Caminos (MIDEPLAN – MOP)
- Cuerpos de agua pequeños (CNR)

#### 4.4.- Pre - Procesamiento de Imágenes:

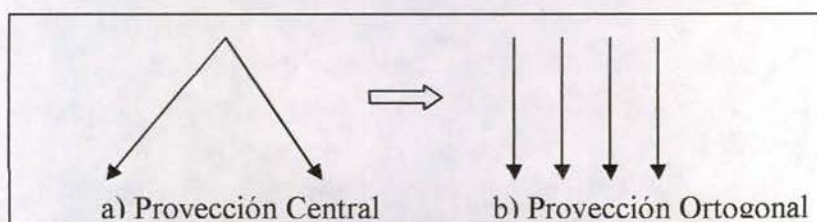
Tal como se planteó en la metodología, el pre procesamiento de las imágenes consiste en dos pasos paralelos:

- A) Orto-corrección de las imágenes y
- B) Calibración Radiométrica

##### 4.4.1. Orto Corrección:

Para poder realizar un análisis multitemporal, multitemática y multiresolución, es necesario que las imágenes, MDE e información temática calcen perfectamente unas sobre otras. Esto es más importante aún si se quiere caracterizar un cultivo con parámetros adicionales a lo que entrega la información espectral pura, cuyos resultados son muy pobres. Por ejemplo, se incluirán factores como la altitud, pendiente y exposición de laderas ya que con esta información es posible separar cultivos que espectralmente tienden a confundirse o también resolver el problema típico del efecto de las sombras y cuerpos de agua (objetos que espectralmente siempre se confunden).

Esta necesidad implica que las imágenes deben corregirse geoméricamente y que la corrección geométrica considere los efectos de distorsión producidos por el relieve. Es decir, las imágenes deben orto-rectificarse (proceso de pasar de una proyección central (vista oblicua) a una proyección vertical).



**Figura N° 13: Proceso de Orto-rectificación.**

El proceso de ortorectificación consiste en utilizar el modelo geométrico del sensor, el cual se fija sobre el área de estudio mediante puntos de control X,Y,Z donde la X e Y se obtienen de levantamientos GPS o cartografía de buena calidad y el valor de Z, del Modelo Digital de Elevación o MDE.

Con este esquema es suficiente localizar de 7 a 9 puntos de control bien distribuidos en la imagen y asegurarse que su RMS (error medio cuadrático) no supere 0.5 pixel. (Ver Anexo N° 2).



Este proceso se utilizó para las cuatro imágenes a procesar y sus puntos de control se guardaron para ser utilizado en la ortorectificación del resto de los productos iniciales (imágenes de reflectancia).

#### 4.4.2. Calibración Radiométrica:

Para realizar la calibración radiométrica (eliminación de los efectos de ángulo Solar y dispersión atmosférica), se utilizaron las formulas propuestas en la metodología de trabajo (se adjunta en anexo documento oficial del USGS para Landsat-5) y la conversión a reflectancia tomando en cuenta el Zenith Solar de la toma de imagen, la distancia SOL- TIERRA para esa fecha y la radiación exoatmosférica para la banda respectiva.

El primer paso es convertir las "Cuentas Digitales" (CD) de la imagen a valores de radiancia y con ellos, al aplicar el modelo atmosférico, obtener los valores de reflectancia de los objetos a nivel de la superficie terrestre.

El paso de convertir las CD de una imagen en radiancia recibida por el detector, es simple pero requiere conocer los parámetros de calibración del sensor para la época de toma de la imagen. La formula es la siguiente:

$$Li = \left\{ \frac{Lmax - Lmin}{QCALmax - QCALmin} \right\} * (CD - QCALmin) + Lmin$$

Donde:

Li es la radiancia que llega al detector

Lmax y Lmin son constantes de calibración

QCALmax y QCALmin son los valores extremos de la conversión análoga – digital (255 y 0 para Landsat)

Las constantes de calibración se obtienen de Tablas publicadas por NASA y son específicas para un determinado sensor y período de calibración. Para Landsat 5 (después de Mayo 5 2003) estos valores son:

Banda	Lmin	Lmax
1	1.52	193.0
2	2.84	365.0
3	1.17	264.0
4	1.51	221.0
5	0.37	30.2
6	1.2378	15.303
7	0.15	16.5

Figura N° 14: Parámetros Calibración para Landsat 5.

La radiancia que llega al detector, esta compuesta por dos elementos fundamentales: a) la radiancia directa desde el objeto, que es función de su reflectancia alterada por la absorción atmosférica (componente que queremos medir) y b) la radiancia indirecta que proviene de la atmósfera (componente indeseado y que debemos eliminar con la corrección atmosférica)

$$Li = Lobjx + Lat$$

Donde:

$Li$  es la energía que llega al sensor.

$Lobjx$ , es la energía directa que proviene del objeto

y

$Lat$ , es la energía indirecta producto de la dispersión atmosférica.

Este factor aditivo ( $Lat$ ) se define a través del análisis de los histogramas de cada banda y se le resta a la banda respectiva.

En este caso, el factor restado a cada imagen fue el siguiente:

Imagen	Banda	Factor ( $Lat$ )
Octubre 2004	B1	30
	B2	10
	B3	4
	B4	0
Enero 2005	B1	35
	B2	10
	B3	5
	B4	0
Marzo 2005	B1	24
	B2	5
	B3	2
	B4	0
Abril 2005	B1	17
	B2	5
	B3	2
	B4	0

**Figura N° 15: Valores para reducir dispersión Atmosférica**

Y a su vez, la radiancia que sale del objeto es igual a la radiancia que llega al objeto desde el Sol, multiplicado por el factor que representa la proporción de energía que refleja el objeto (el resto lo absorbe o transmite). La razón entre la energía que llega al objeto y la que sale de él, se llama reflectancia.



La reflectancia para las bandas ópticas está dada por la siguiente relación:

$$R = (PI * Li * d^2) / (ESUN * \cos(Ze))$$

Donde ESUN es la radiación exoatmosférica (parámetro astronómico que indica la radiación por longitud de onda que llega del SOL antes de ingresar a la atmósfera) y esta dada en la siguiente tabla:

Banda	ESUN
1	1957
2	1826
3	1554
4	1036
5	215
7	80.67

**Figura N° 16: Radiación Exoatmosférica**

Los parámetros de Zenith (**Ze**) (ángulo vertical del Sol al momento de tomar la imagen) a y distancia SOL-TIERRA (**d** en unidades astronómicas, dato de tablas astronómicas para el día y hora de la toma de la imagen ) utilizados fueron:

Imagen	Elev Solar	Zenith Solar (Ze)	Día Juliano	Dist. Sol – Tierra (d <sup>2</sup> )
19/10/04	54	36	292	0.9961
23/01/05	54	36	23	0.9844
12/03/05	45	45	71	0.9937
29/04/05	34	56	119	1.0070

**Figura N° 17: Parámetros para calcular la Reflectancia**

Para la Banda 6 (banda Termal), se convirtió las CD a valores de temperatura brillante según la siguiente relación:

$$T = (K2 / \ln((k1 / Li) + 1)) - 273 , \text{ temperatura en } ^\circ \text{ Celsius donde:}$$

**K1** = 607.76 en W / m<sup>2</sup>\*sr\*um.

**K2** = 1260.56 grados Kelvin

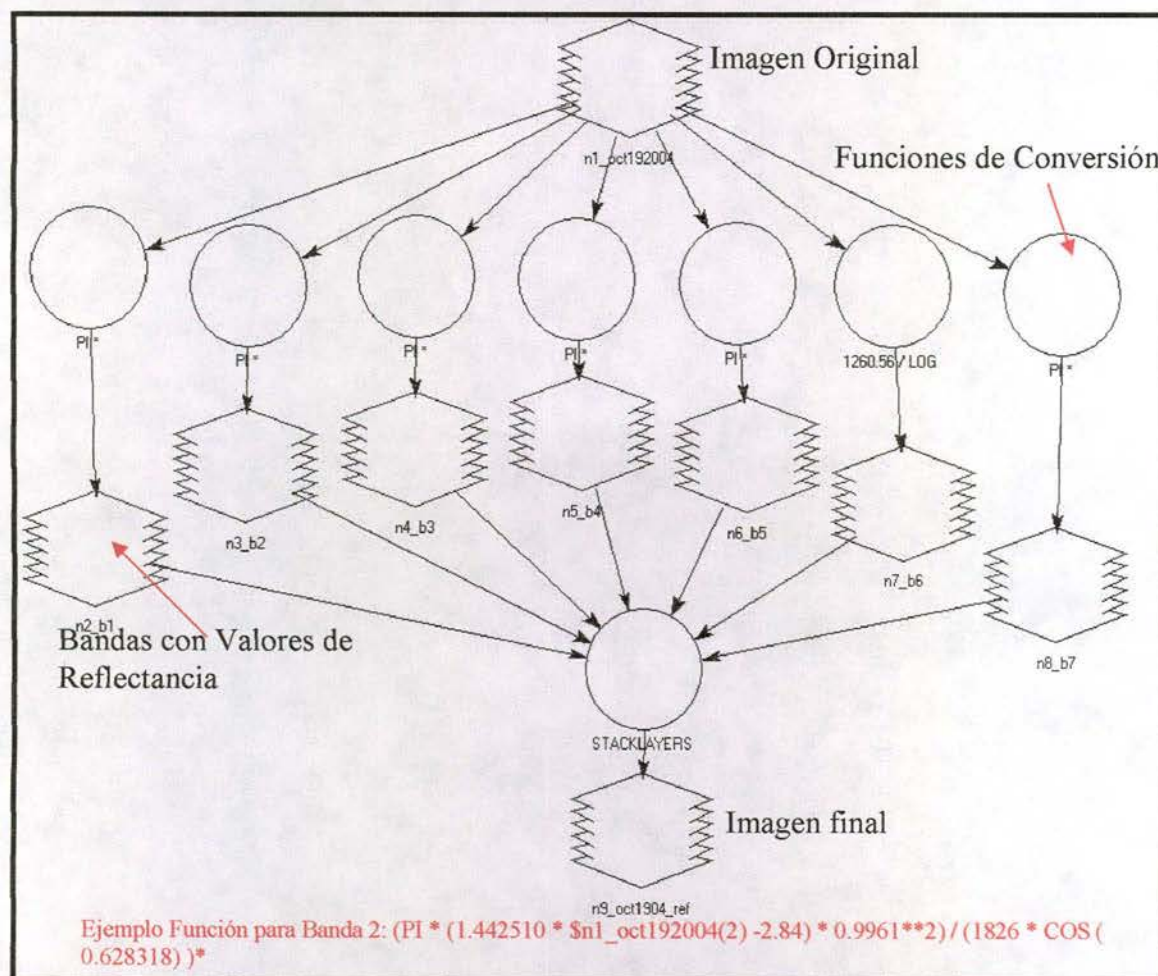
Las formulas finales utilizadas para transformar de CD a Radianza (considerando que QCalMin = 0) y con ellos a Reflectancia (que se llevó a valores enteros en 16 bit unsigned, multiplicándolos por 10) fueron:

Banda	Lmin	Lmax	Factor	Li
B1	1.52	193.0	0.750900	$0.750900 * CD + 1.52$
B2	2.84	365.0	1.420235	$1.420235 * CD + 2.84$
B3	1.17	264.0	1.037060	$1.037060 * CD + 1.17$
B4	1.51	221.0	0.860745	$0.860745 * CD + 1.51$
B5	0.37	30.2	0.116980	$0.116980 * CD + 0.37$
B6	1.2378	15.303	0.055158	$0.055158 * CD + 1.2378$
B7	0.15	16.5	0.064118	$0.064118 * CD + 0.15$

**Figura N° 18: Radianza a la entrada del sensor.**

Para procesar las imágenes se construyó, utilizando ERDAS Imagine, un modelo de cálculo donde a partir de la imagen original, se procesó cada banda y finalmente se volvió a unir todo en un solo archivo.

La figura siguiente muestra dicho modelo:



**Figura N° 19: Modelo para procesar imágenes**



En resumen, los pasos seguidos durante el pre-procesamiento de la imágenes fueron:

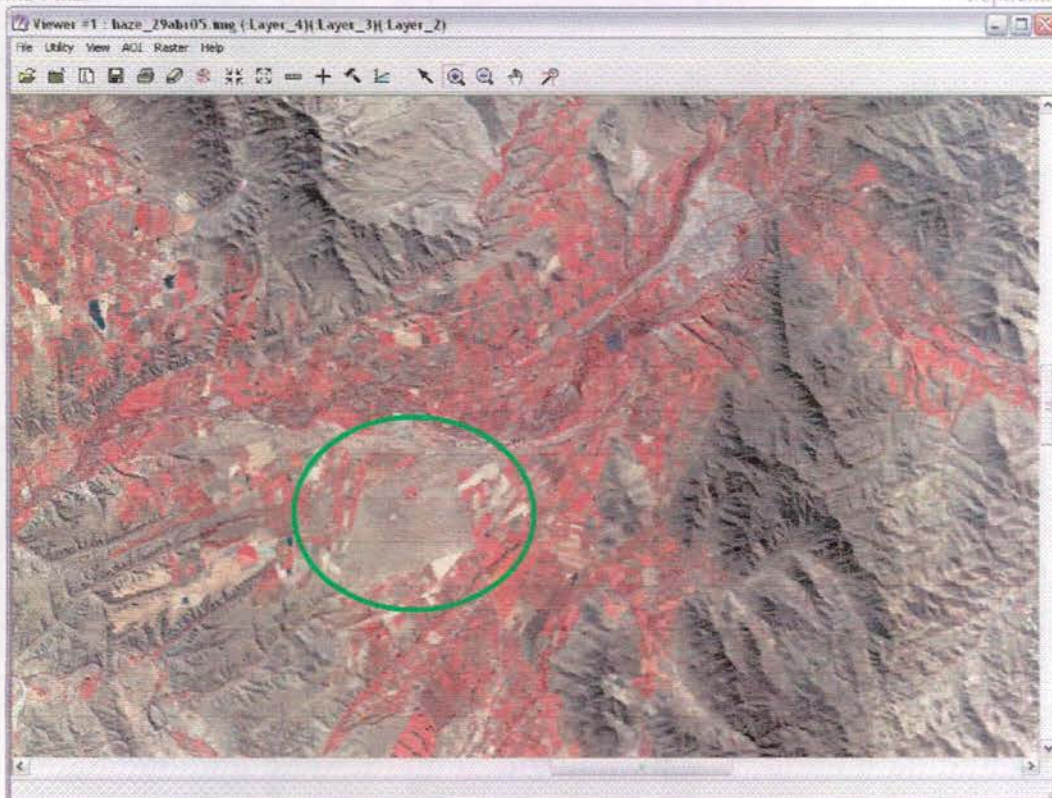
- Lectura de los datos originales.
- Eliminación de franjas radiométricas (destripe).
- Eliminación de dispersión atmosférica (haze removal).
- Paso a imagen de reflectancia (16 Bit signed)
- Ortorección de imágenes con haze removal.
- Ortorección de imágenes de reflectancia.

Las figuras siguientes muestran la diferencia entre el producto original y la imagen corregida radiométricamente (haze removal).

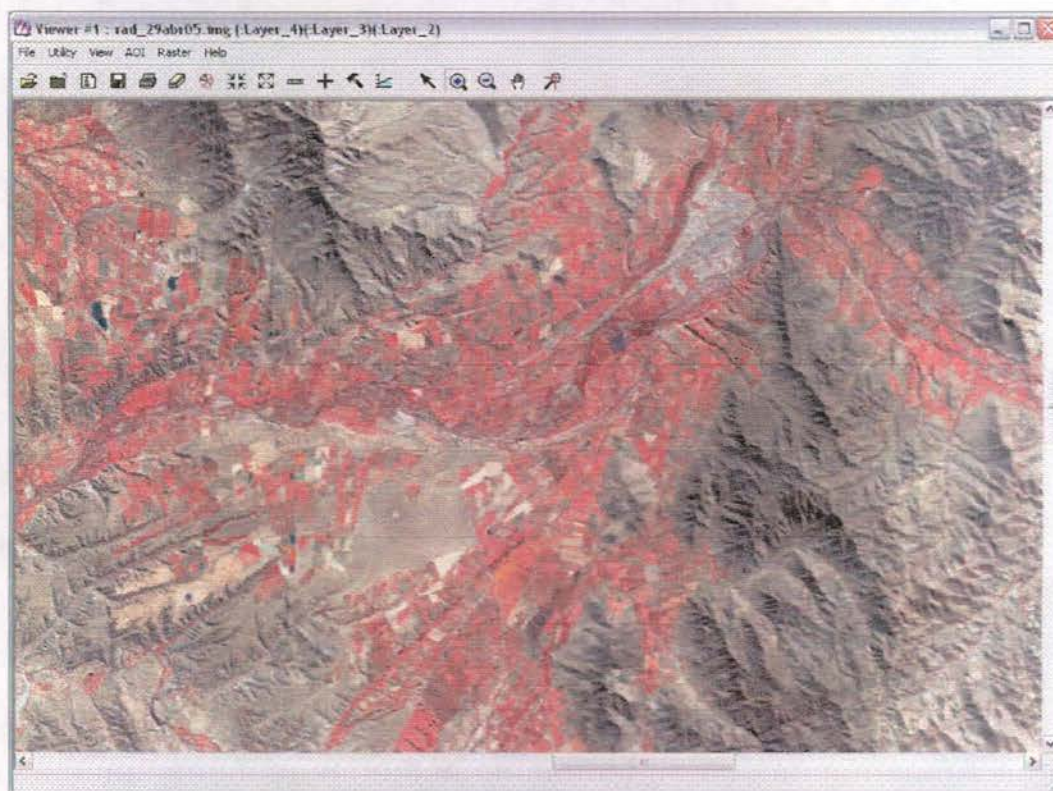


**Figura N° 20: Imagen original, 29 de Abril**





**Figura N° 21: Imagen de Abril corregida radiométricamente.**



**Figura N° 22: Imagen de Radiancia del mes de Abril**



Como se puede apreciar, la imagen con cuentas digitales (fig 21) y la imagen de radiancia (fig 22) no presentan ninguna diferencia visual. Sin embargo, los valores que componen cada imagen difieren enormemente. Para la imagen de cuentas digitales (CD), todas las bandas tienen valores entre 0 – 255 y lo único que se sabe es que son proporcionales a la energía que llegó al sensor.

Para la imagen de radiancia, las bandas 1 a 5 y 7 los valores corresponden al porcentaje de energía que refleja el objeto en esas longitudes de onda (amplificado por 10 para conservar un decimal y usar números enteros). Así, el valor 54 significa que el objeto tiene una reflectancia de 5.4% y un valor de 372 significa una reflectancia de 37.2%.

Para la banda 6 (que corresponde al IR Lejano o Termal) los valores son "Temperatura Brillante" en grados Celsius, también amplificado por 10 para conservar un decimal. De esta forma, un valor de 121 significa una temperatura de 12.1° C. La diferencia entre "Temperatura Brillante" y Temperatura Cinética" (la que uno mide con un termómetro) es un factor de emisividad que para objetos como el agua y la nieve es cercano a uno y para el resto de los objetos es menor que uno. El problema es que en la práctica, dado la mezcla de objetos dentro de un píxel de 30m, es difícil determinar. Sin embargo esta información sigue siendo útil porque el suelo desnudo siempre tendrá una temperatura muy superior al suelo cubierto con vegetación y dentro de estos últimos, un suelo cubierto con árboles tendrá una temperatura inferior a un suelo cubierto con pasto.

#### **4.5. Interpretación Preliminar:**

Con los productos obtenidos, se procedió a realizar las primeras calibraciones para la "Clasificación Digital" a realizar con el software e-Cognition.

Se procedió por etapas desde lo más simple a lo más complejo, hasta llegar a un punto donde es necesario contar con información de terreno para poder seguir.

Los pasos realizados se pueden resumir como sigue:

- 1.- Clasificación con una fecha, resultados muy malos por la gran confusión espectral, imposible separa sombras de agua.
- 2.- Clasificación con 1 fecha más la capa de pendientes, mejora bastante y se puede separar muy bien la zona de cultivos en el valle.
- 3.- Clasificación con 1 fecha, pendientes más criterios de textura y forma de los predios. Resultados bastante más satisfactorios.
- 4.- Clasificación con dos fechas, pendientes, textura y forma. Se produce una mejor separación de grupos de cultivos.

A esta altura del proceso empieza a influir mucho la calidad de las muestras y la habilidad para separar o entrenar al computador con variaciones de un mismo tipo de cultivo. Por ejemplo, trigo recién cortado vs trigo sin cortar y trigo cortado hace una o más semanas. También viñedos con sus hojas verdes de viñedos en estado de senescencia o frutales en zonas planas y frutales en terrenos con pendiente.

En fin, son muchas situaciones especiales que hay que tomar en cuenta y para ello se hace necesario tomar el máximo de muestras georreferenciadas en terreno.

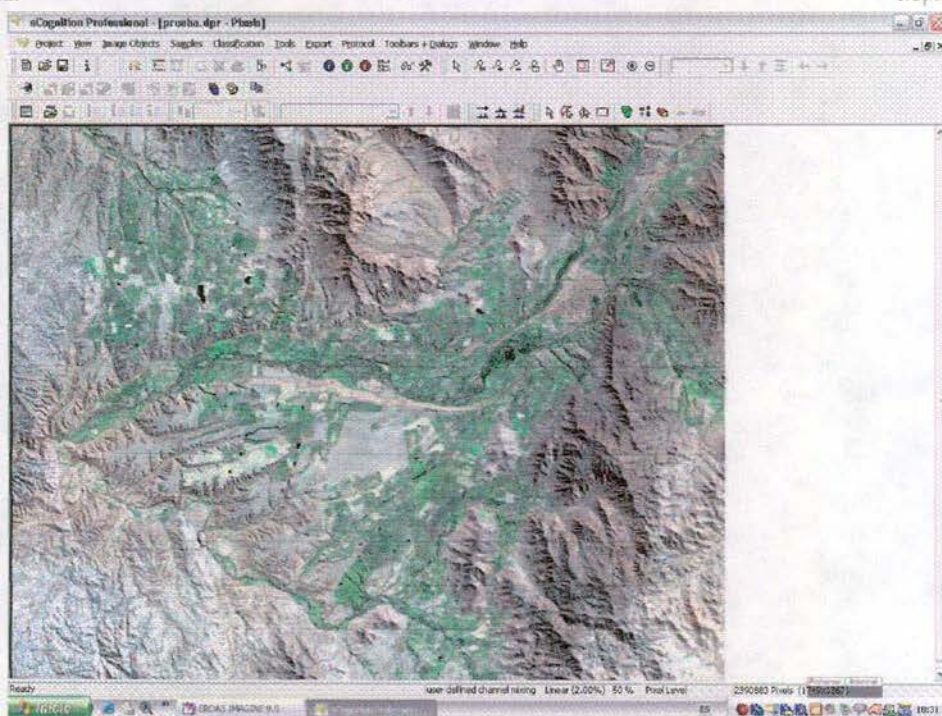
Las figuras que siguen, muestran paso a paso los procesos realizados. Dado que esta es una clasificación preliminar, no se explican con detalle los criterios utilizados ya que seguramente cambiarán una vez que se cuente con información de terreno de buena calidad.

Los rubros de cultivos a identificar son:

- ❖ Frutales
- ❖ Hortalizas
- ❖ Cereales
- ❖ Praderas
- ❖ Viñas

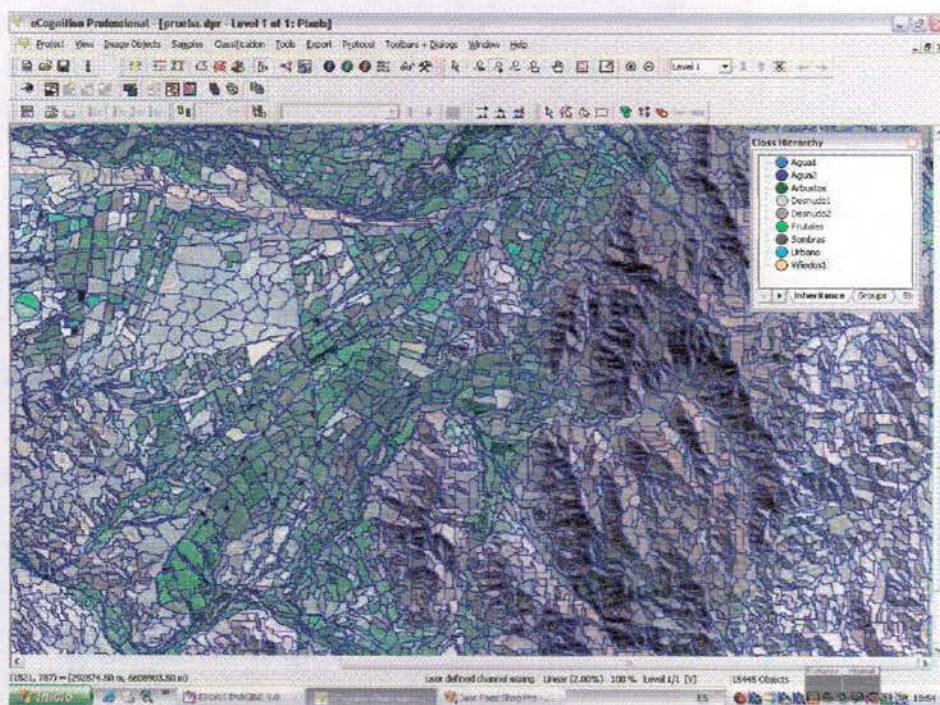
Sin embargo, es necesario identificar otras coberturas de suelo (agua, sombras, suelo desnudo) para que las reglas de decisión funcionen adecuadamente.





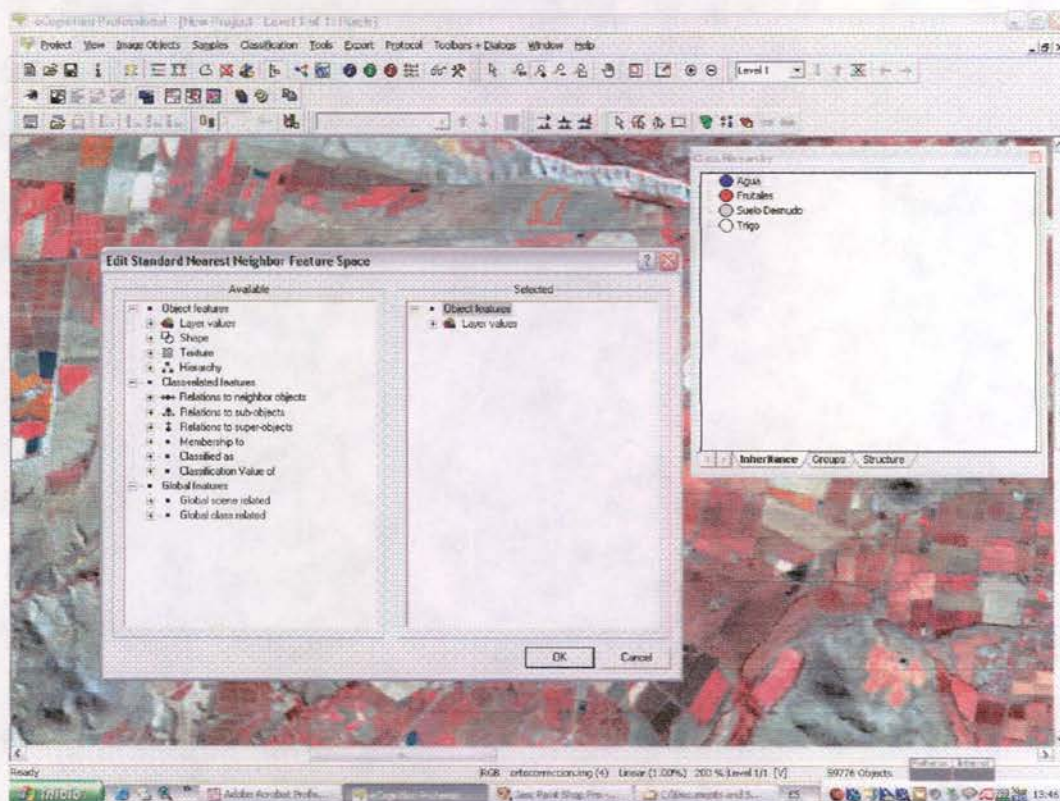
**Figura N° 23: Carga de la imagen en e-Cognition**

Una vez cargada la imagen, se pueden hacer muchas combinaciones de bandas y filtros y el software no restringe esta operación a sólo 3 bandas, como lo hace el común de los software.

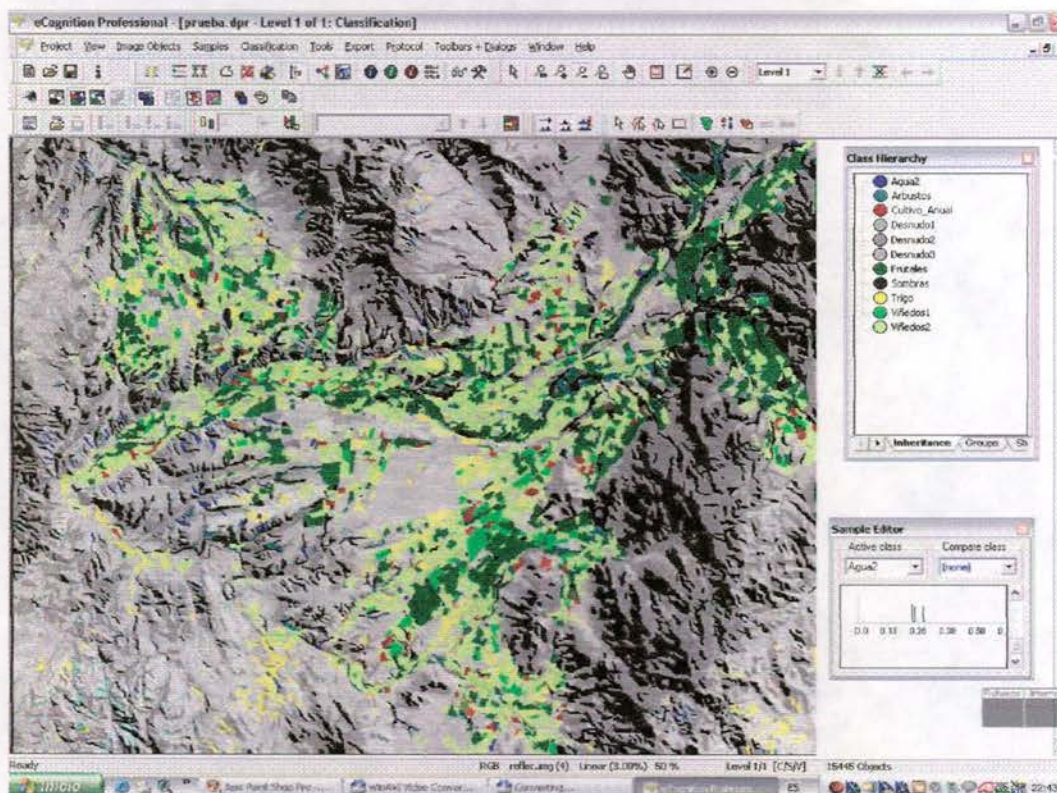


**Figura N° 24: Segmentación inicial de los datos y definición de Clases a utilizar.**



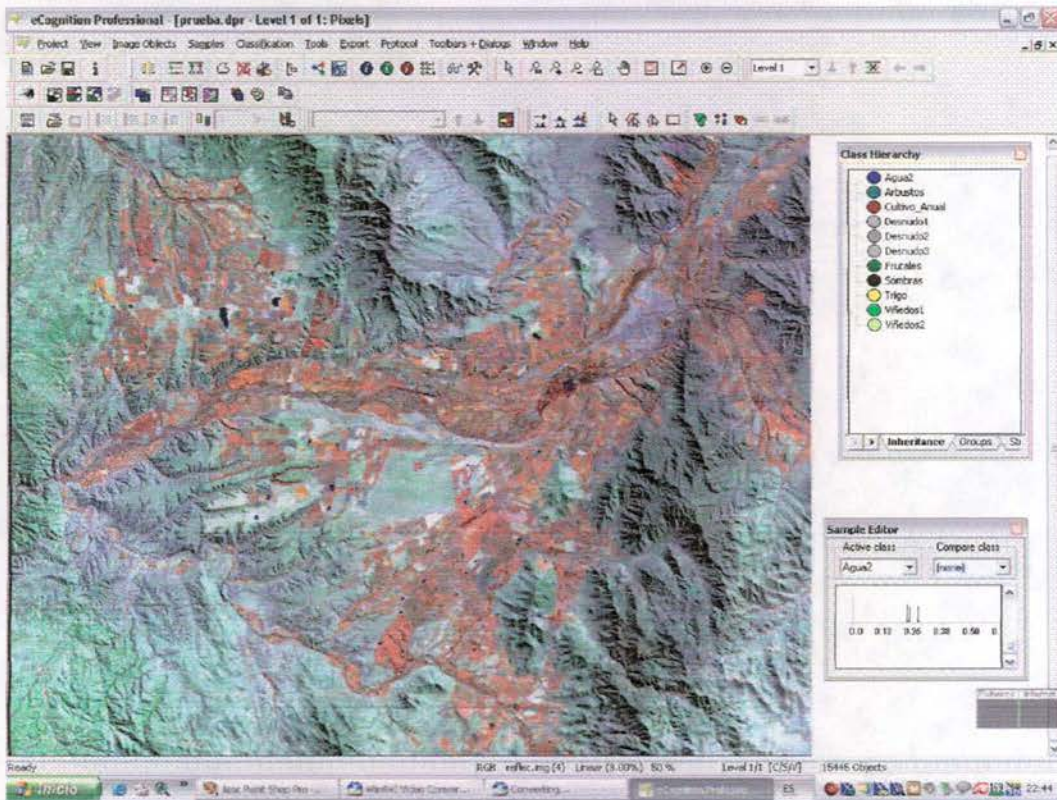


**Figura N° 25: Definición de Criterios a utilizar para cada clase**

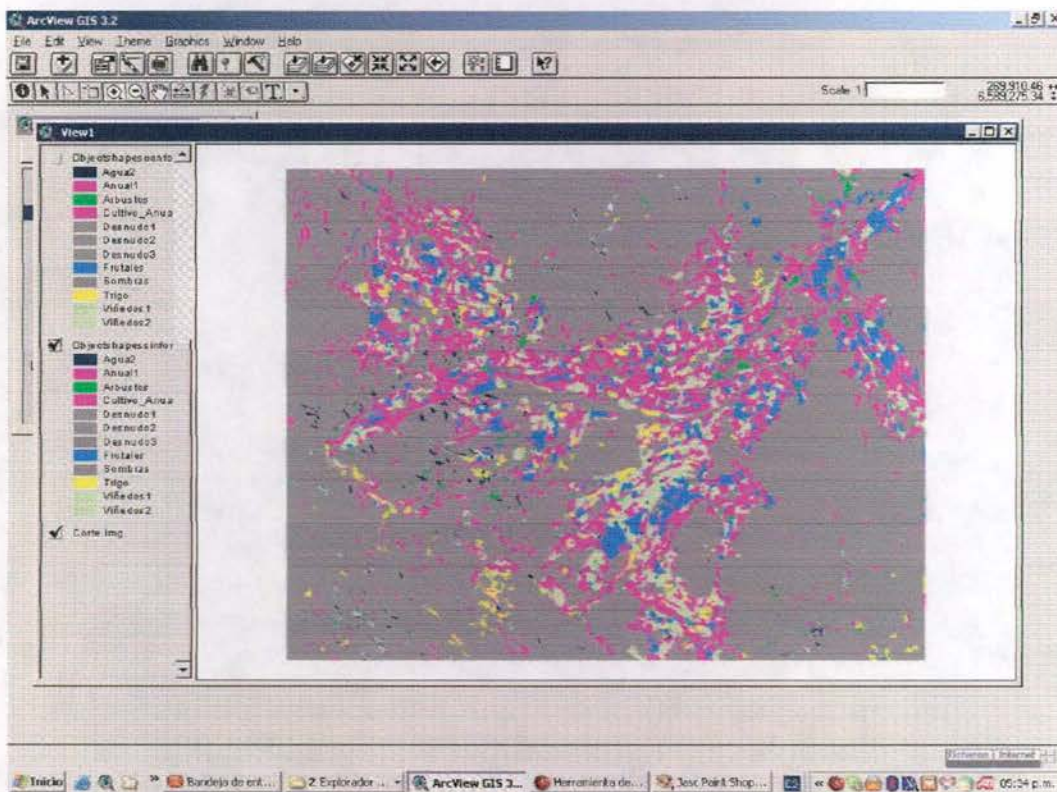


**Figura N° 26: Resultado de la clasificación preliminar**



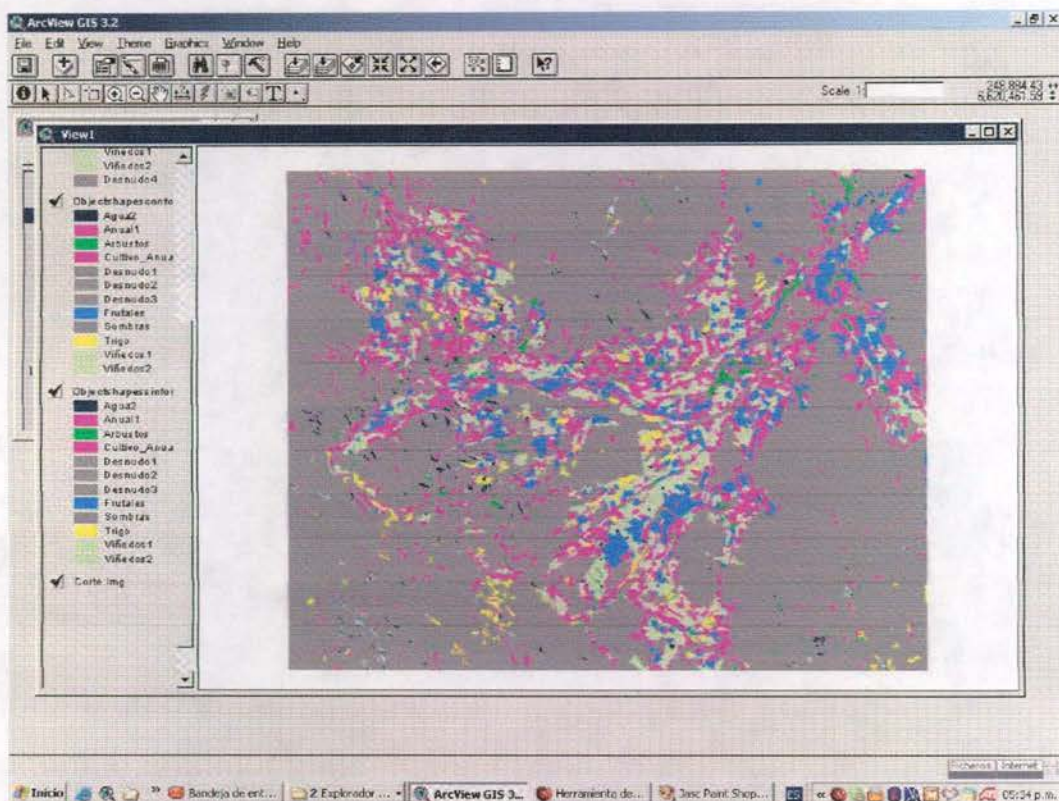


**Figura N° 27: Imagen original para verificar resultados**

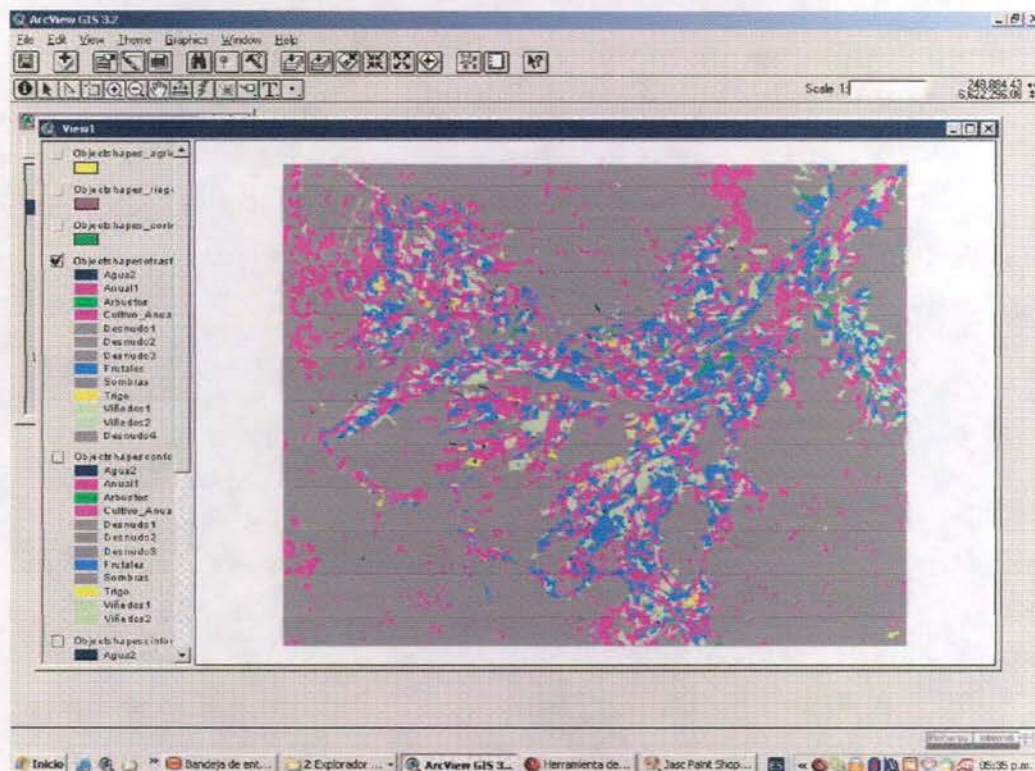


**Figura N° 28: Resultado Clasificación 1 fecha en ArcView**



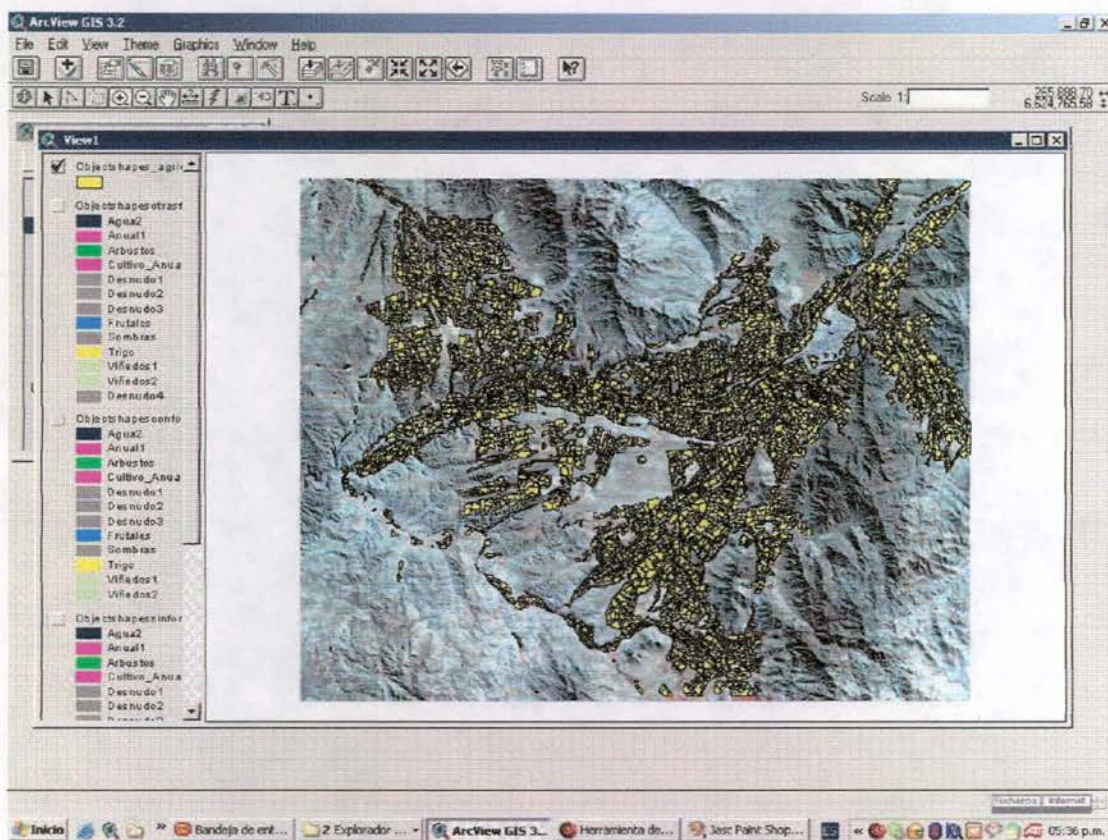


**Figura N° 29: Resultados con criterios de forma**



**Figura N° 30: Resultados utilizando 2 fechas**





**Figura N° 31: Clasificación con 1 clase – VEGETACION**

Estas últimas imágenes muestra la facilidad que entrega e-Cognition para exportar los resultados a formato Shape. Se facilita enormemente la verificación de los resultados y el cálculo de la superficie para cada una de las clases. El paso siguiente es la visita a terreno para verificar la interpretación preliminar y definir nuevos patrones de interpretación si fuese necesario.

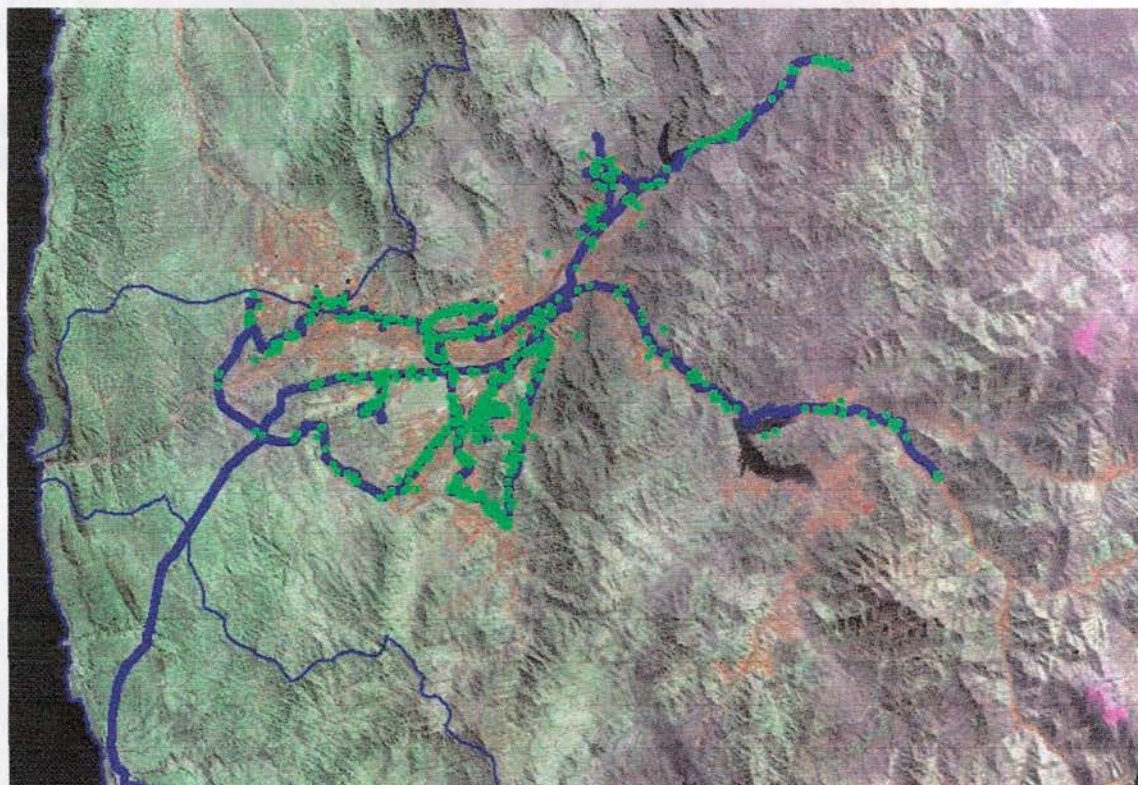


#### **4.6.- Trabajo de Campo:**

El objetivo de este primer levantamiento de información en terreno fue definir patrones espectrales de interpretación, de los principales cultivos del área de estudio.

De acuerdo a los resultados de la clasificación preliminar, se definieron rutas a recorrer de manera de abarcar el máximo de elementos diferentes y determinar las causas que producían estas diferencias. Los sectores que no fueron visitados en esta oportunidad serán utilizados durante la segunda visita a terreno, como verificación y determinación de la calidad de la clasificación final realizada con el software e-Cognition.

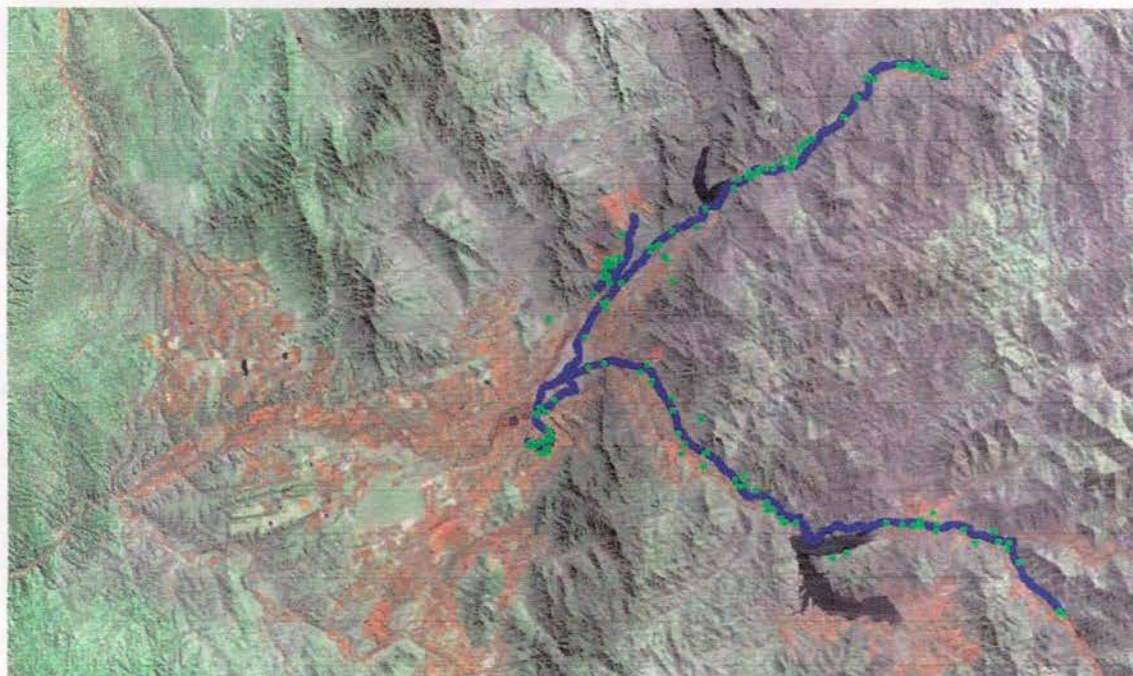
La figura 32 muestra el trayecto de las rutas realizadas en terreno (azul) y los puntos de control tomados (verdes).



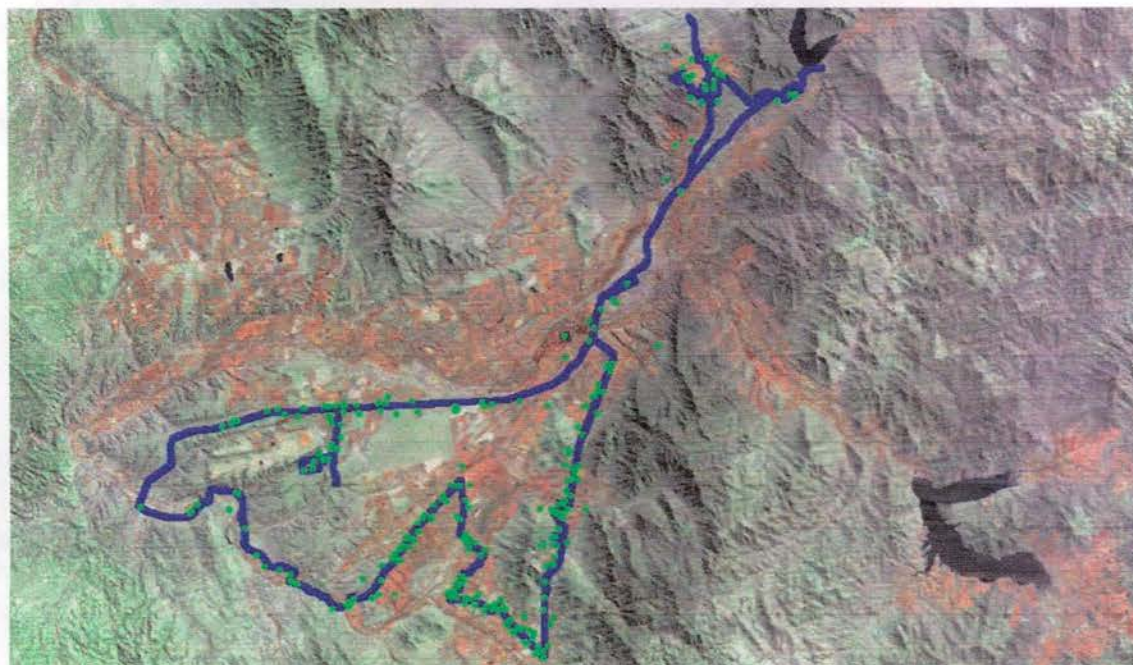
**Figura N° 32: Recorridos durante el Terreno N° 1.**

El terreno se realizó en 3 días y las figuras siguientes muestran los recorridos realizados en cada día.

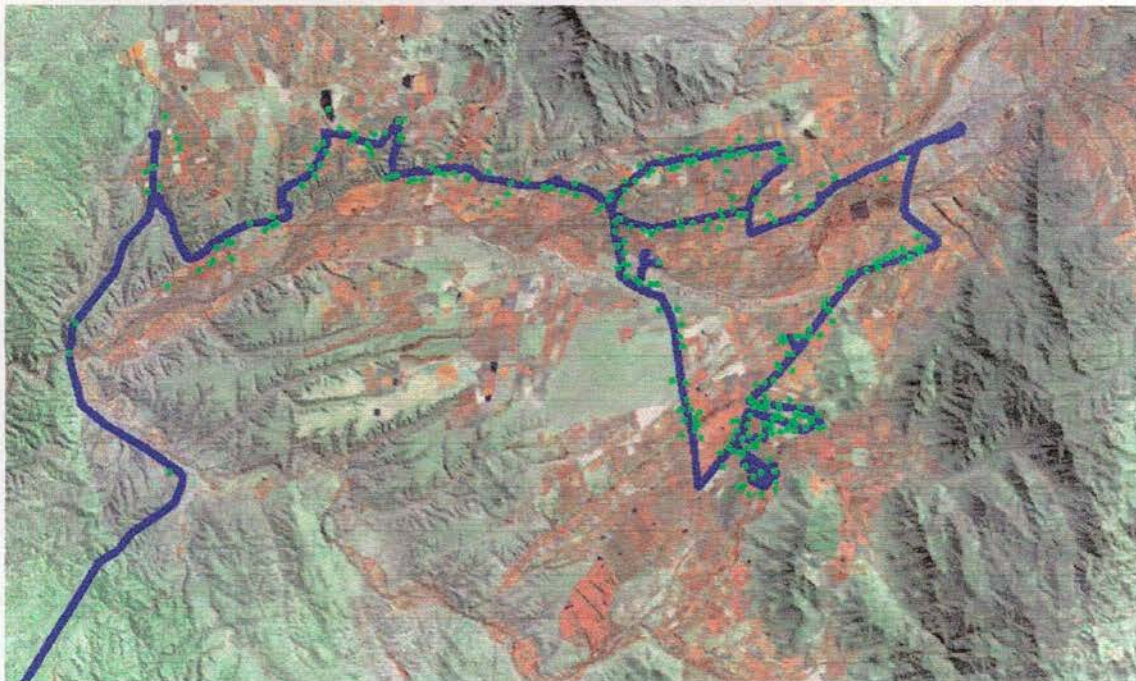




**Figura N° 34: Recorrido Segundo Día.**







**Figura N° 35: Recorrido Tercer Día.**

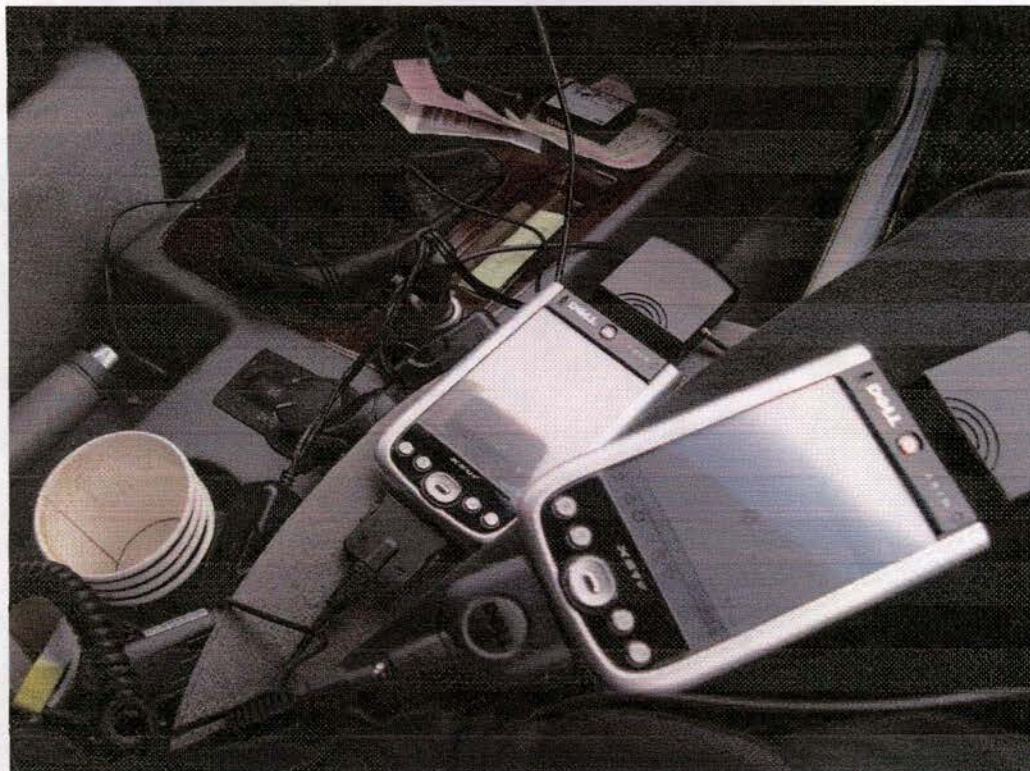
Para realizar el terreno se utilizaron 3 GPS Navegadores, 2 utilizados para las rutas y ubicación de los puntos de control y el tercero, exclusivamente para grabar las rutas sin ningún tipo de interrupción.

Los GPS son tipo compact flash, de 12 canales, con antena externa y conectados directamente a una PDA Dell Axim 50v o 51v. Las PDA utilizadas para grabar los puntos de control llevaban como fondo la imagen satelital de fecha Abril 2005, en formato MrSID y en coordenadas geográficas en Datum WGS84. La grabación de rutas y puntos de control se realiza directamente en formato Shape y para el caso específico de los puntos de control, se va llenado un campo tipo carácter, donde se escribe el tipo de cultivo y sus características (ver Figuras N° 36 y N° 37).





**Figura N° 36: Equipo GPS utilizado en terreno.**



**Figura N° 37: Equipo GPS utilizado en terreno.**

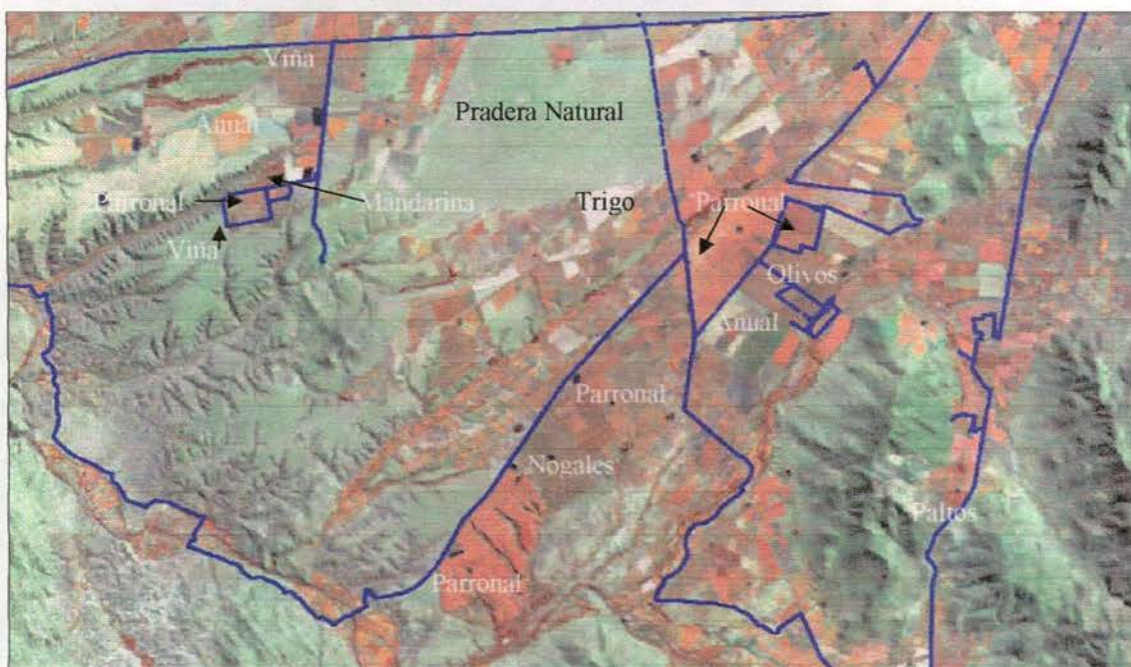


El terreno permitió detectar que los cultivos permanentes que predominan el Valle del Limarí son los Parronales, Paltos, Viñas en espaldera, Cítricos (principalmente Mandarinas) y en menor cantidad Nogales y Olivos.

Con respecto a los cultivos anuales es lógico que no exista una coincidencia entre lo que se ve en la imagen (abril 2005) y lo visto en terreno (Junio 2006) pero claramente predominan las siembras de Alcachofas, Lechugas y Papas en potreros grandes y muchas otras hortalizas en potreros más pequeños (Habas, Pimentones, Aji, Acelgas, etc.). Muy pocos predios con Maíz y Trigo y el resto en praderas mejoradas de Alfalfa y Trébol.

Con la información recolectada en terreno se preparó un archivo de polígonos con todos los cultivos detectados y sus variaciones. Este Shape se utiliza para definir las clases a separar con e-Cognition y su posterior agrupamiento en las Clases definitivas. En este sentido, la variación de la respuesta espectral, para un mismo tipo de cultivo, complica enormemente el proceso de clasificación digital y genera confusiones difíciles de manejar. A continuación se dan ejemplos de estas variaciones.

La figura N° 38 es una ampliación de la imagen en el sector centro-sur del valle y en ella se indican los cultivos presentes (en azul las rutas grabadas con GPS).

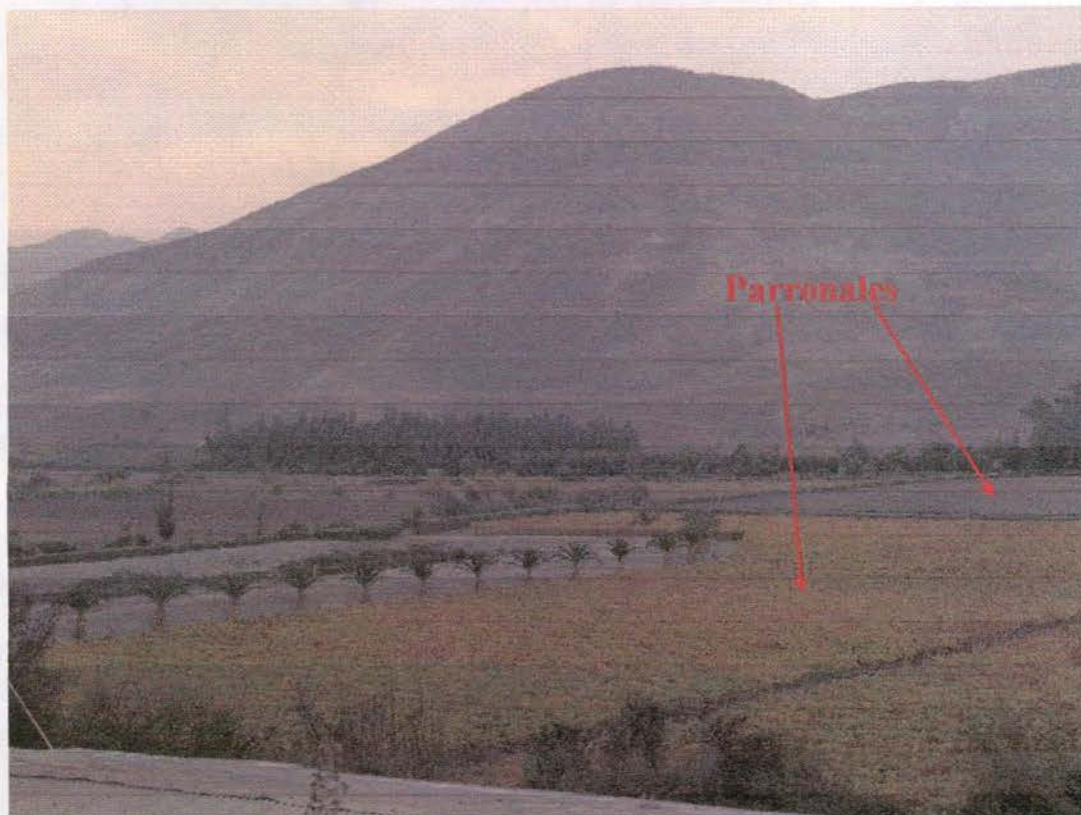


**Figura N° 38: Ejemplos de cultivos en la imagen.**

En el ejemplo de la figura 38 se puede apreciar la gran variabilidad espectral que existe para un mismo tipo de cultivo. Por ejemplo, en los Parronales, esta variabilidad está dada por el tipo de Cepa de la Uva, la edad de la plantación y si fue o no injertada. En el caso de los Paltos, la variabilidad está dada principalmente por la edad de la plantación. En ninguno de los casos se detectan las plantaciones nuevas (menores a 3 años) y lo que se ve es el suelo preparado (con la forma de reflejar del tipo de suelo de la zona).



Por ejemplo, la Figura N° 39 corresponde a una foto tomada en terreno donde se aprecia claramente un parronal que aún está con sus hojas (en estado de senescencia) y los parronales a su alrededor están sin hojas. Esta diferencia está dada sólo por la diferencia de cepa de la uva en cada parronal.



**Figura N° 39: Diferencia espectral producto de la diferencia en las Cepas de las Uvas.**

Otro aspecto que complica la clasificación digital es la plantación en pendiente de viñedos, parronales y paltos. El efecto de combinación entre la vegetación y laderas en sombra o laderas de solana produce un cambio espectral importante al compararlo con la misma plantación en zonas planas (ver Fig.N° 40). Esto se ve alterado aún más por la orientación de la hileras para los casos de paltos y viñedos.





**Figura N° 40: Vista de plantación de Paltos en laderas.**

En otros casos, aprovechando que un parronal está recién plantado, utilizan el terreno para cultivar alcachofas por mientras esperan el desarrollo de las plantas. (ver Figura N° 41)



**Figura N° 41: Cultivo de Alcachofa intercalado en Parronal nuevo.**



La Figura N° 42 muestra un parronal en ladera con un desarrollo foliar importante, seguido de una ladera con paltos en hileras siguiendo las curvas de nivel (en otros casos, las hileras están orientadas siguiendo la pendiente máxima) y en el sector más plano, un parronal sin hojas aún.



Figura N° 42: Diferencias en Parronales

Otros casos, como se muestra en la Figura N°43 complican aún más una clasificación digital. En este lugar, se han plantado Parronales en la parte superior del cerro y justo donde empieza la sombra, se plantó Paltos (prácticamente dibuja la sombra) y donde se produce nuevamente el cambio de pendiente, Parronales.

Por último, la Figura N° 44, muestra un terreno preparado para la plantación de Paltos, los que se podrán detectar en 4 años más.

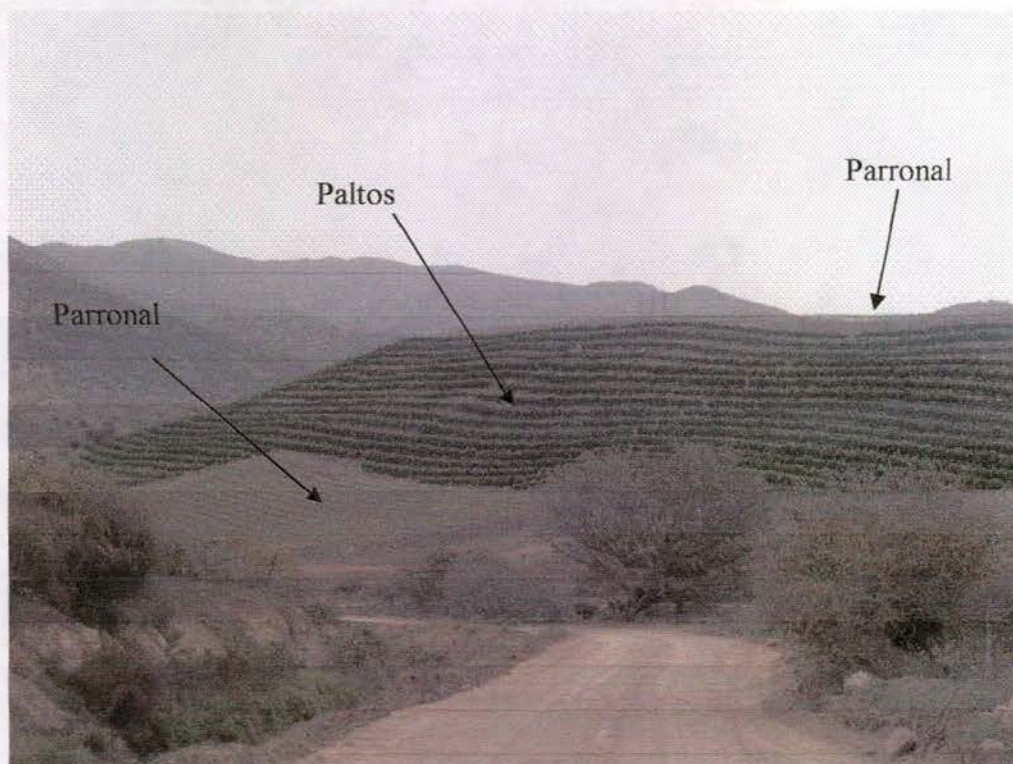


Figura N° 43: Mezcla de Paltos y Parronales



Figura N° 44: Terreno preparado para plantación de Paltos



#### 4.7.- Clasificación Final:

La información obtenida en terreno fue procesada de tal forma que se generaron polígonos de muestreo para todas las clases de cultivos a identificar, separando diferentes muestras para un mismo tipo de cultivo. Por ejemplo, en la categoría Frutales se identificaron Mandarina, Viñas, Parronales y Paltos, pero estos cultivos presentaban diferencias en densidad de cobertura y firmas espectrales producto de diferentes edades de la plantación y variedad del cultivo, especialmente en viñas y parronales (cepa). Por lo tanto, las muestras generadas fueron Viñas\_1, Viñas\_2, Paltos\_1, Paltos\_2, Paltos\_3, etc.

La figura N° 45 muestra el archivo digital con las muestras las que, convertidas en archivo Raster en formato de ERDAS Imagine, se leen con e-Cognition para generar las Clases sobre la cual se basará la clasificación.

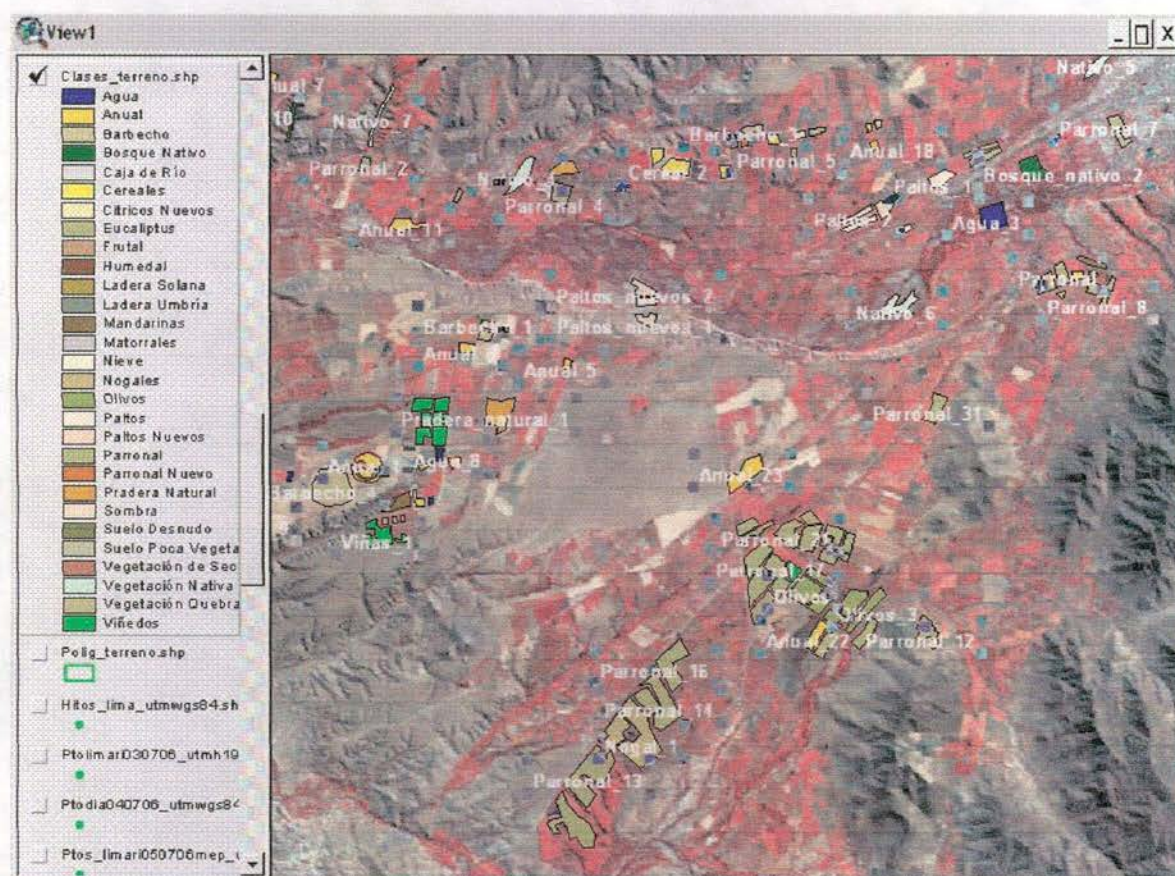


Figura N° 45: Muestras de Terreno preparadas para e-Cognition



En e-Cognition el primer paso consiste en segmentar la imagen en al menos dos niveles. El primer nivel de detalle, prácticamente a nivel de potrero, que coincidirá con las muestras tomadas en terreno y el segundo nivel, más general, donde se separan los grandes usos del suelo, por ejemplo; Zona Agrícola, Zona de Secano y Agua.

Esta jerarquía en la segmentación permite controlar el proceso de clasificación de forma tal que las muestras en terreno deberían estar todas incluidas dentro del segmento mayor "Zona Agrícola".

Para este proyecto, utilizamos tres niveles de segmentación:

**Nivel 1:** (Nivel detalle) clasificación por tipos de cultivos, según las muestras de terreno.

**Nivel 2:** (Nivel semi detalle) Zonas de cultivos permanentes, cultivos anuales, Bosques y Matorrales, Zonas Urbanas, Zonas de Secano, Agua Limpia, Agua con Sedimentos.

**Nivel 3:** (Nivel general) Área Agrícola, Área No Agrícola, Cuerpos de Agua.

La figura N° 46, muestra el resultado obtenido del nivel 3, con la delimitación hecha con e-Cognition y cortado según el área de estudio (Cuenca Río Limarí). En verde se muestra la zona con cultivos.

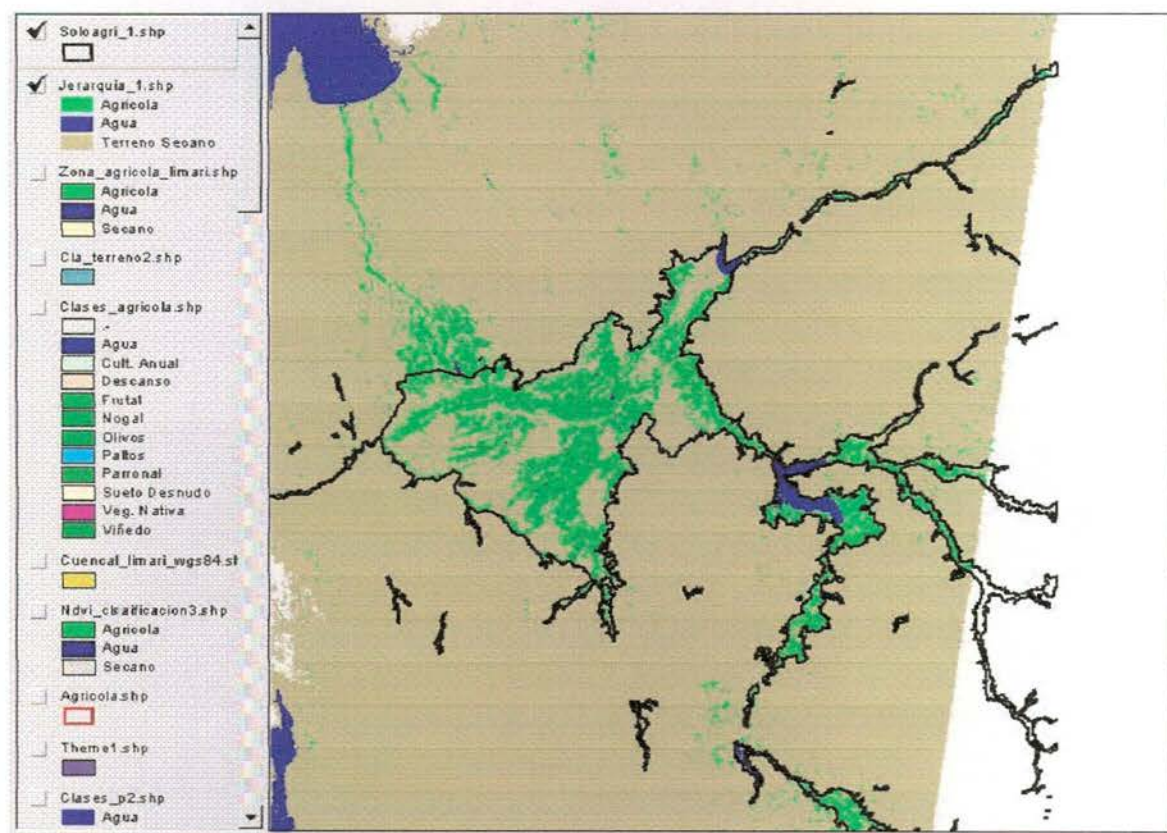


Figura N° 46: Área cultivada en la Cuenca del Río Limarí.



Según esta clasificación general, las superficies totales son las que se muestran en la figura N° 47.

<b>Clase</b>	<b>Superficie en Ha</b>
Agrícola	<b>67.691</b>
Agua	<b>3.553</b>
Secano	<b>597.948</b>

**Figura N° 47: Superficies Nivel General**

Esta superficie es válida para la zona de estudio, que corresponde a la parte central de la cuenca según la siguiente distribución (Fig N° 48):

<b>Area de la Cuenca</b>	<b>Superficie en Ha</b>
Cordillera	<b>494.571</b>
Costa	<b>1.800</b>
Area de Estudio (zona central cuenca)	<b>669.193</b>

**Figura N° 48: Superficies Nivel General**

El límite de la cuenca se baso en la información original DGA, corregida a escala 1:50.000 especialmente para este proyecto.

A este nivel, separación entre terrenos con vegetación y sin vegetación, el software funciona bastante bien. Sin embargo, al comenzar a separar tipos de cultivos y por las razones antes explicadas, es cuando comienzan los problemas al usar los métodos de clasificación digital.

Esto llevo a tener que modificar la metodología utilizada y finalmente se optó por una combinación entre clasificación digital e interpretación visual, utilizando esta última para corregir las deficiencias esperadas en la separación automática de clases.

Esto es una tarea relativamente lenta pues hay que revisar prácticamente todos los polígonos y cambiar sus atributos cuando corresponda. Para facilitar esta tarea, se programó en Avenue (lenguaje macro de AcrView) una aplicación que con sólo pinchar el polígono se le cambia su atributo seleccionado desde un panel de control donde están todos los cultivos a clasificar (ver figura N° 49).



**Cultivos**

TEMA ACTIVO DE TRABAJO  
Segmentacion\_level2.shp

Campo para Atributar  
Bestclass

Clase de Cultivo

- ☐ Cultivo Anual
- ☐ Barbecho
- ☐ Pradera Natural
- ☐ Pradera Mejorada
- ☐ Frutal
- ☒ Nogal
- ☐ Palto
- ☐ Olivo
- ☐ Viña
- ☐ Parronal
- ☐ Agua
- ☐ Urbano
- ☐ Bosque
- ☐ Arbusto
- ☐ No Definido
- ☐ Otro Uso -->
- ☐ Caja Río
- ☐ Nubes
- ☐ Sombras

Limpia Selección-->>> [icon]

Herramienta de Ingreso -->> [icon]

Figura N° 49: Panel de Control para revisión de Atributos de Cultivos

A continuación, se muestran una serie de ampliaciones de las imágenes Landsat donde se puede apreciar la variabilidad espectral para un mismo tipo de cultivo. Las líneas de colores corresponden al recorrido de terreno grabado con GPS.

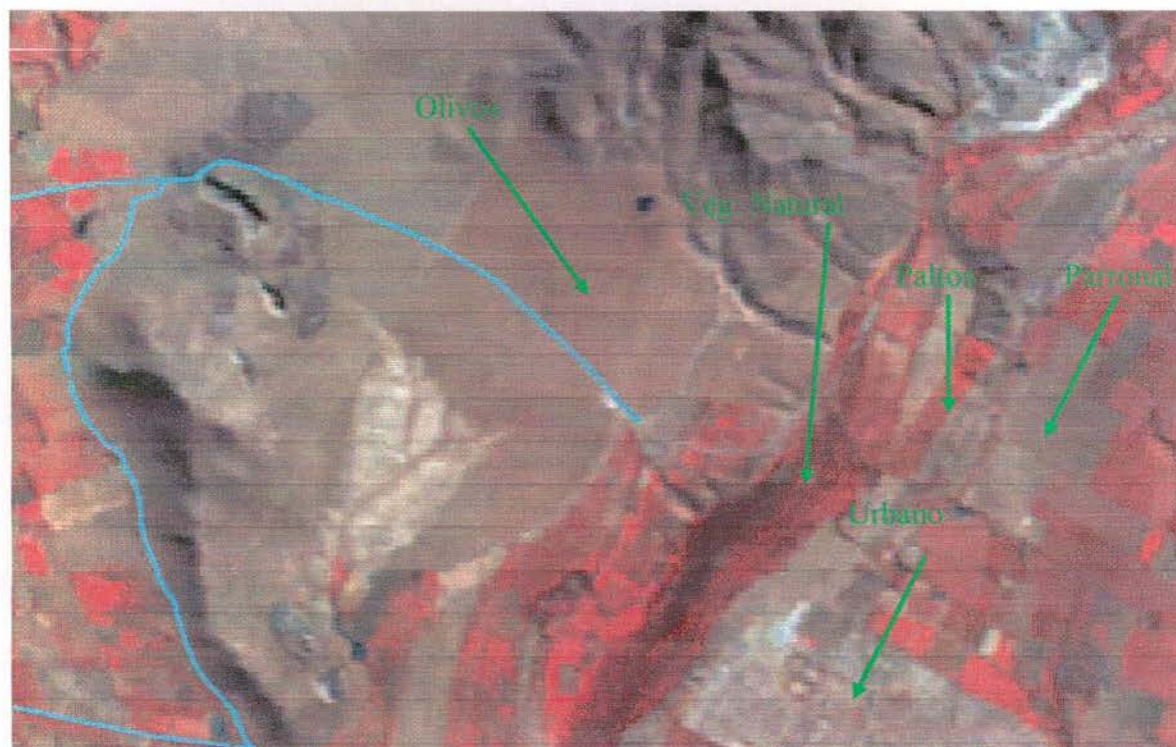


Figura N° 50: Ampliación sector Nor-oriental de Ovalle



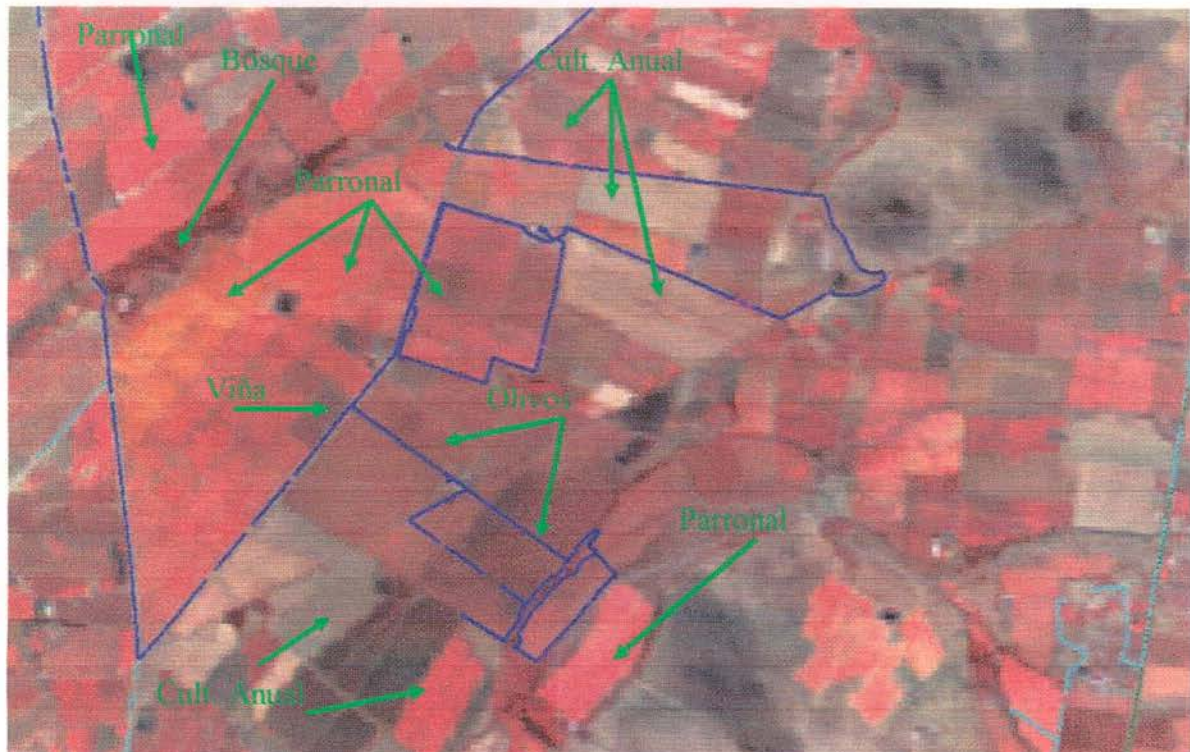


Figura N° 51: Ampliación imagen Abril 2005

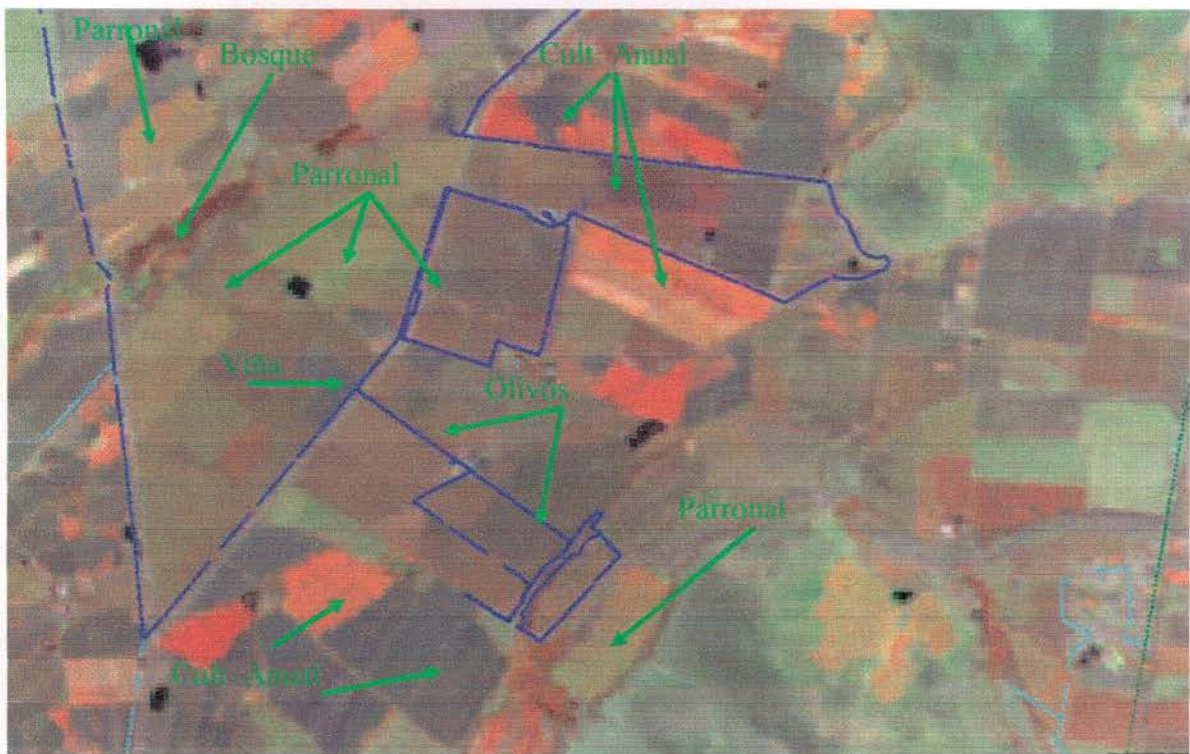


Figura N° 52: Ampliación imagen Octubre 2004



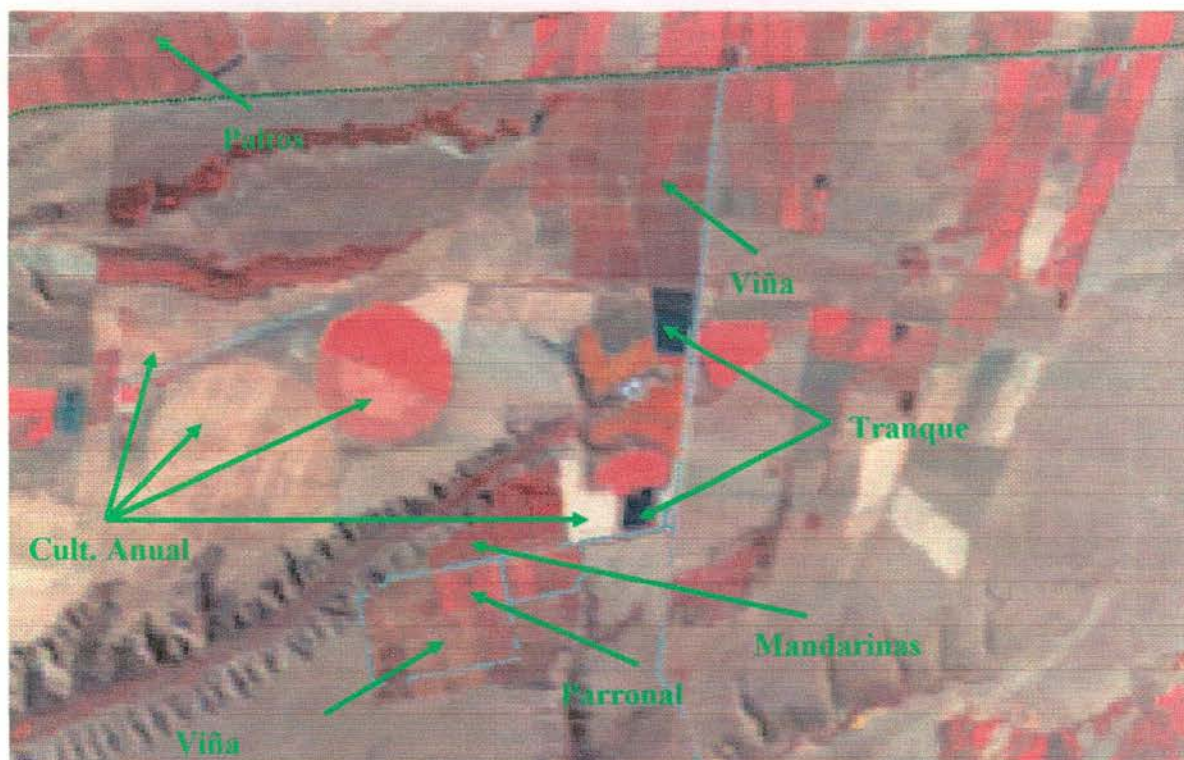


Figura N° 53: Ampliación imagen Abril 2005



Figura N° 54: Ampliación imagen Octubre 2004



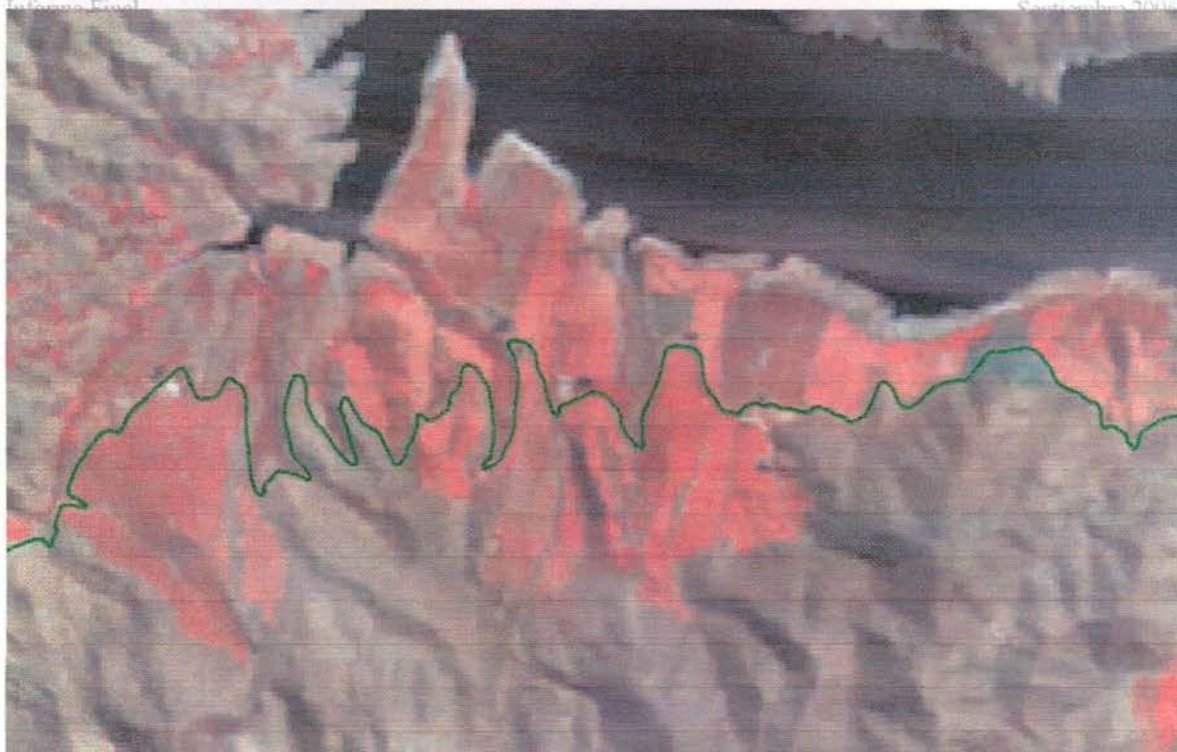


Figura N° 55: Ampliación imagen Abril 2005

Nótese el cambio en el nivel de agua del Embalse Paloma. El GPS es la cota de canal.

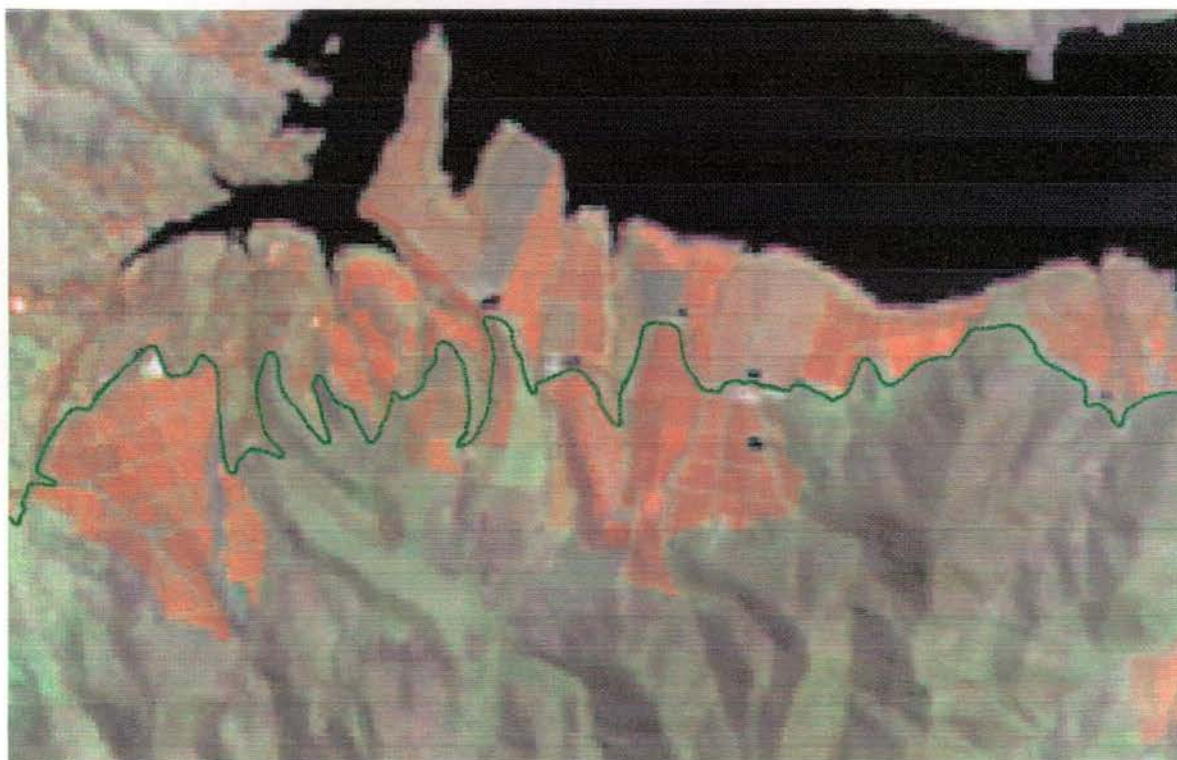


Figura N° 56: Ampliación imagen Octubre 2004



#### 4.8. Estadística Final:

La estadística final se obtuvo de la tabla asociada a la Clasificación final. Utilizando el comando de Estadística de ArcView, se generó un archivo DBase con el total de la superficie por cada rubro Clasificado.

Como ejemplo, las figuras 57, 58 y 59 muestran la imagen original en una fecha, los polígonos de Clasificación y las Clases temáticas asociadas a cada polígono, pintadas según la leyenda que aparece al lado derecho, en la leyenda de ArcView.

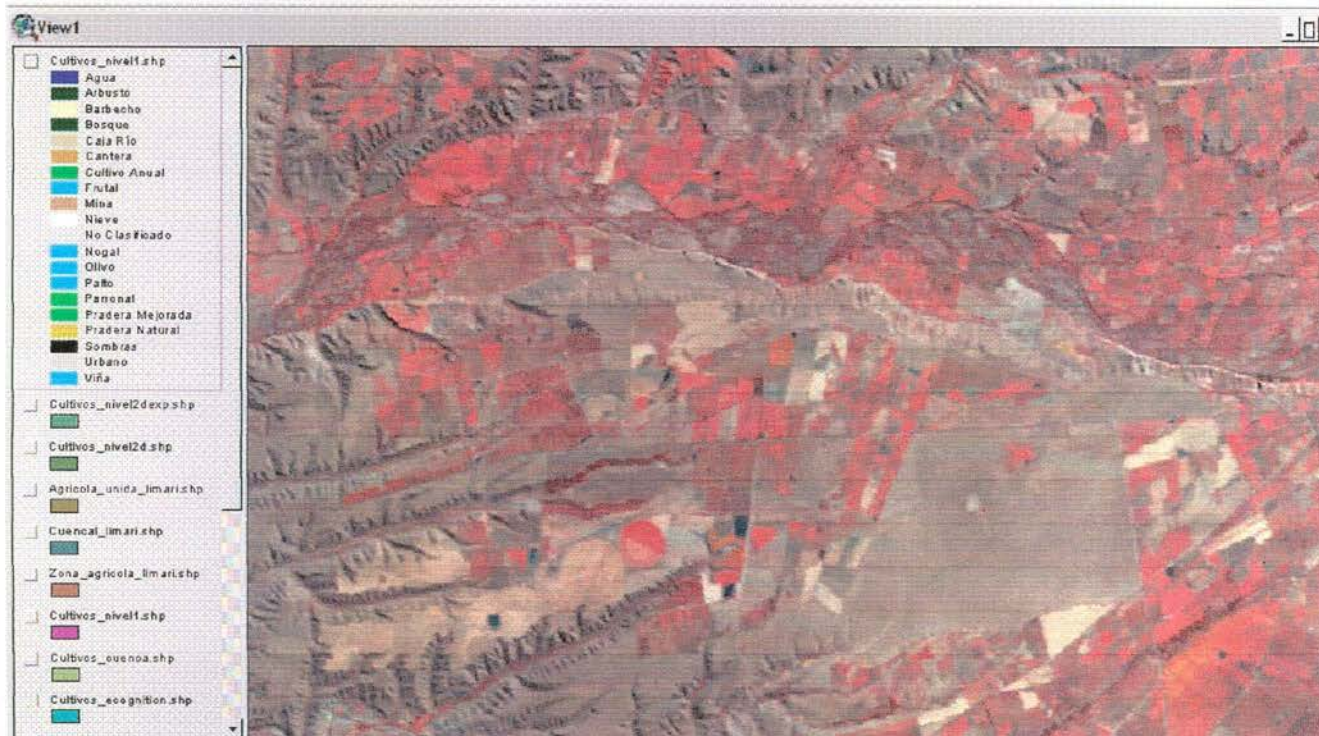
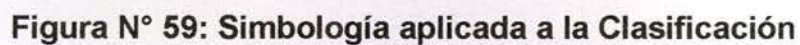


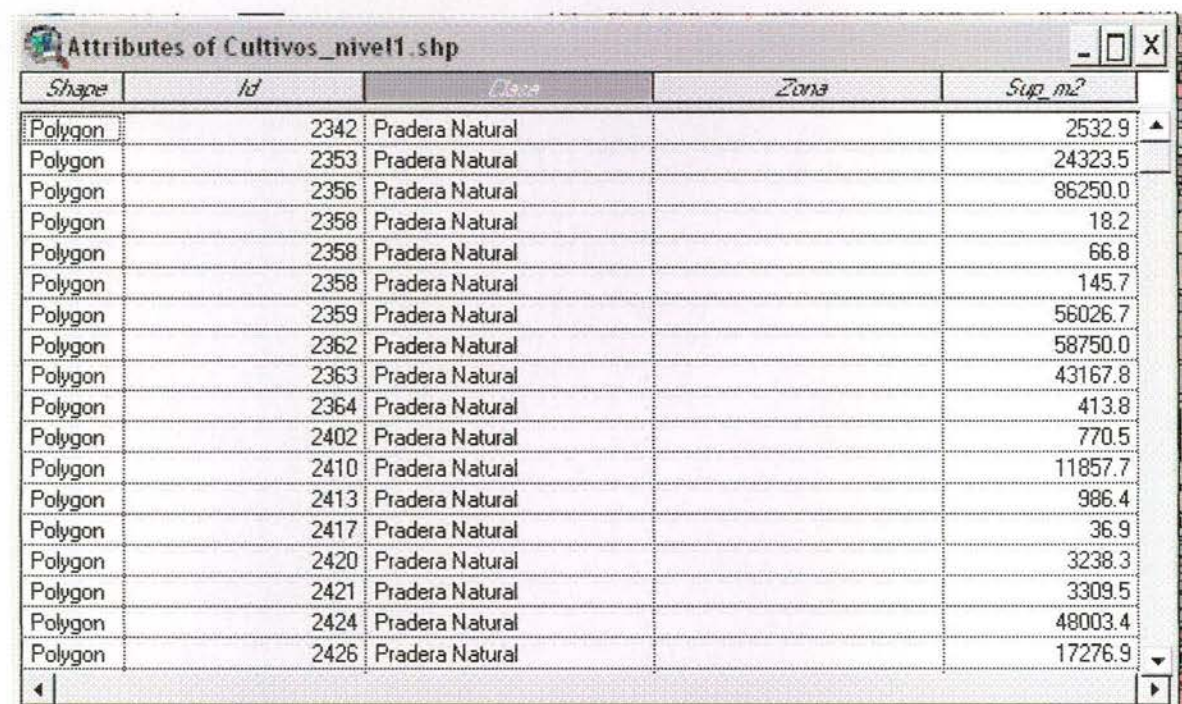
Figura N° 57: Imagen Original, 29 de Abril







La base de datos de los polígonos, contiene la siguiente información (ver Figura N° 60), para un total de 126.102 polígonos:



Shape	Id	Clase	Zona	Sup_m2
Polygon	2342	Pradera Natural		2532.9
Polygon	2353	Pradera Natural		24323.5
Polygon	2356	Pradera Natural		86250.0
Polygon	2358	Pradera Natural		18.2
Polygon	2358	Pradera Natural		66.8
Polygon	2358	Pradera Natural		145.7
Polygon	2359	Pradera Natural		56026.7
Polygon	2362	Pradera Natural		58750.0
Polygon	2363	Pradera Natural		43167.8
Polygon	2364	Pradera Natural		413.8
Polygon	2402	Pradera Natural		770.5
Polygon	2410	Pradera Natural		11857.7
Polygon	2413	Pradera Natural		986.4
Polygon	2417	Pradera Natural		36.9
Polygon	2420	Pradera Natural		3238.3
Polygon	2421	Pradera Natural		3309.5
Polygon	2424	Pradera Natural		48003.4
Polygon	2426	Pradera Natural		17276.9

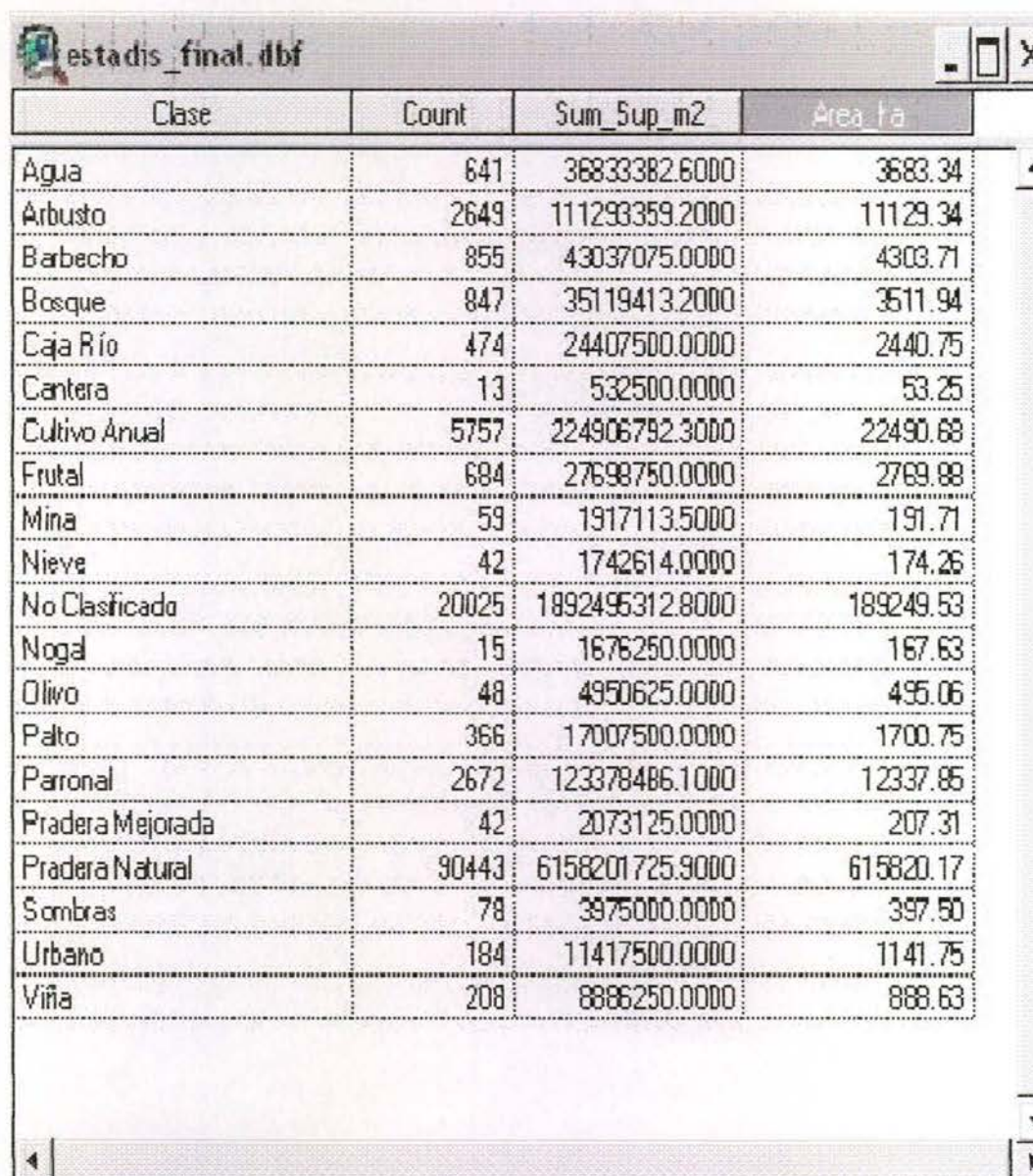
**Figura N° 60: Base de Datos del Shape con las Clases.**

En la figura N° 61, se muestra la estadística obtenida de la base de datos anterior. A esta tabla se le agregó un campo que muestre la superficie en Hectáreas.

Cabe hacer notar lo siguiente:

- "No Clasificado", corresponde al área que queda fuera de la clasificación con las 3 fechas.
- "Frutal", se incluye en esta clase todos los frutales que no se pudieron separar entre sí (olivos, paltos, parronales, viñas y otros).
- "Barbecho" son zonas de cultivos anuales que no presentan cultivos en las últimas fechas analizadas. Normalmente corresponden a zonas dedicadas a Cereales (Trigo, Avena)
- Dentro del rubro Frutales, los Olivos son los más difíciles de separar, sólo se pueden ver cuando son paños muy grandes (> a 20 há) y antiguos.
- Es muy difícil separar Praderas Mejoradas de los Cultivos Anuales.





Clase	Count	Sum_Sup_m2	Area ha
Agua	641	36833382.6000	3683.34
Arbusto	2649	111293359.2000	11129.34
Barbecho	855	43037075.0000	4303.71
Bosque	847	35119413.2000	3511.94
Caja Río	474	24407500.0000	2440.75
Cantera	13	532500.0000	53.25
Cultivo Anual	5757	224906792.3000	22490.68
Frutal	684	27698750.0000	2769.88
Mina	59	1917113.5000	191.71
Nieve	42	1742614.0000	174.26
No Clasificado	20025	1892495312.8000	189249.53
Nogal	15	1676250.0000	167.63
Olivo	48	4950625.0000	495.06
Palto	366	17007500.0000	1700.75
Parronal	2672	123378486.1000	12337.85
Pradera Mejorada	42	2073125.0000	207.31
Pradera Natural	90443	6158201725.9000	615820.17
Sombras	78	3975000.0000	397.50
Urbano	184	11417500.0000	1141.75
Víña	208	8886250.0000	888.63

**Figura N°61: Resumen Estadístico Final.**

A partir de esta tabla, se reagrupó la información de acuerdo a lo solicitado en los términos de referencia para los cultivos bajo riego, obteniéndose la tabla que se muestra en la Figura N° 62. La fila con el "Total" en dicha tabla, es el área regada para la temporada 2004-2005, de **45.361 Hectáreas**.



Cutivo	Superficie (Ha)
Frutales	5133.32
Hortalizas	22490.68
Cereales	4303.71
Praderas	207.31
Viñas	13226.48
<b>Total</b>	<b>45361.5</b>

**Figura N° 62: Total Área Regada en el Valle del Río Limarí, Temporada 2004-2005.**

#### **4.9. Conclusiones y Recomendaciones:**

Las conclusiones que se derivan del presente estudio, se pueden resumir en los siguientes puntos:

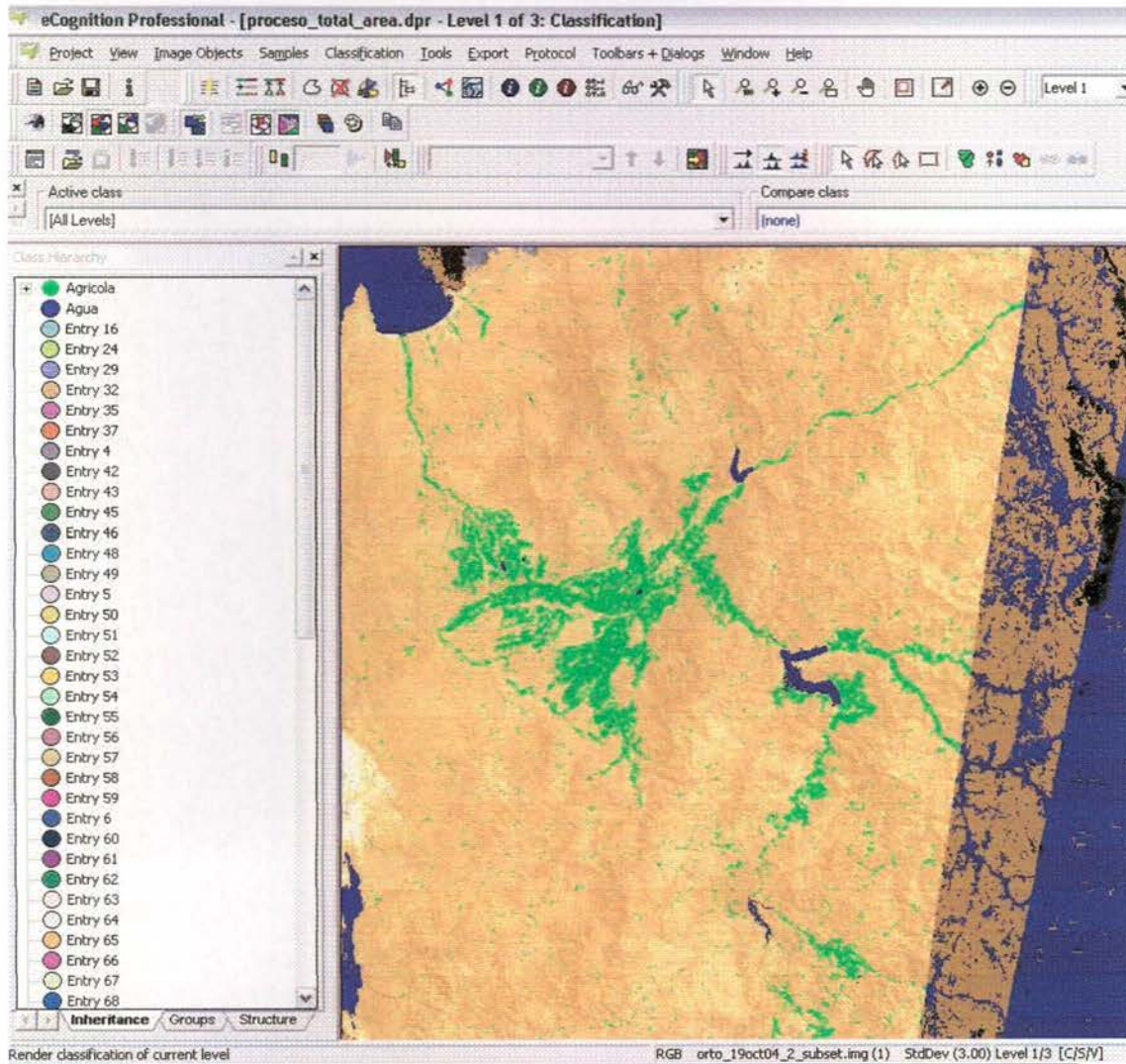
- El software e-Cognition presenta un salto importante en el manejo de digital de imágenes, entregando una segmentación de la imagen en base a forma y textura bastante acertada. Sin embargo, es un software que fue pensado para ser utilizado con imágenes de alta resolución, donde la textura si tiene un significado importante en la separación de clases temáticas. Al utilizarse con Landsat, se tiende a perder esta ventaja y al no tener una relación cierta entre textura y la parte espectral, los resultados no son tan buenos como se podría esperar.
- Aún así, con todos los problemas asociados a Landsat, la clasificación digital con e-cognition es muy superior al mejor algoritmo de clasificación implementado en software como Leica-Imagine (ERDAS), ENVI, ERMAPPER o PCI.
- Es fundamental un buen apoyo de terreno y claramente también es necesario muchas horas hombres en la revisión y corrección de los resultados de la clasificación digital. Simplemente los algoritmos disponibles, aunque han mejorado bastante, no reemplazan al análisis que un interprete puede hacer en la imagen. Se recomienda que a futuro la interpretación visual sea la forma final de obtener información temática, apoyada por técnicas digitales (clasificaciones, índices, etc.), en la medida que sea necesario.
- Lo anterior es apoyado en el hecho de la existencia de una enorme variabilidad espectral en un mismo cultivo producto de las diferencias de edad, forma de plantación, diferencia en su variedad o cepa y en la mezcla de dos cultivos en un mismo potrero o predio.



## **ANEXO 1: Vista de Procesos**

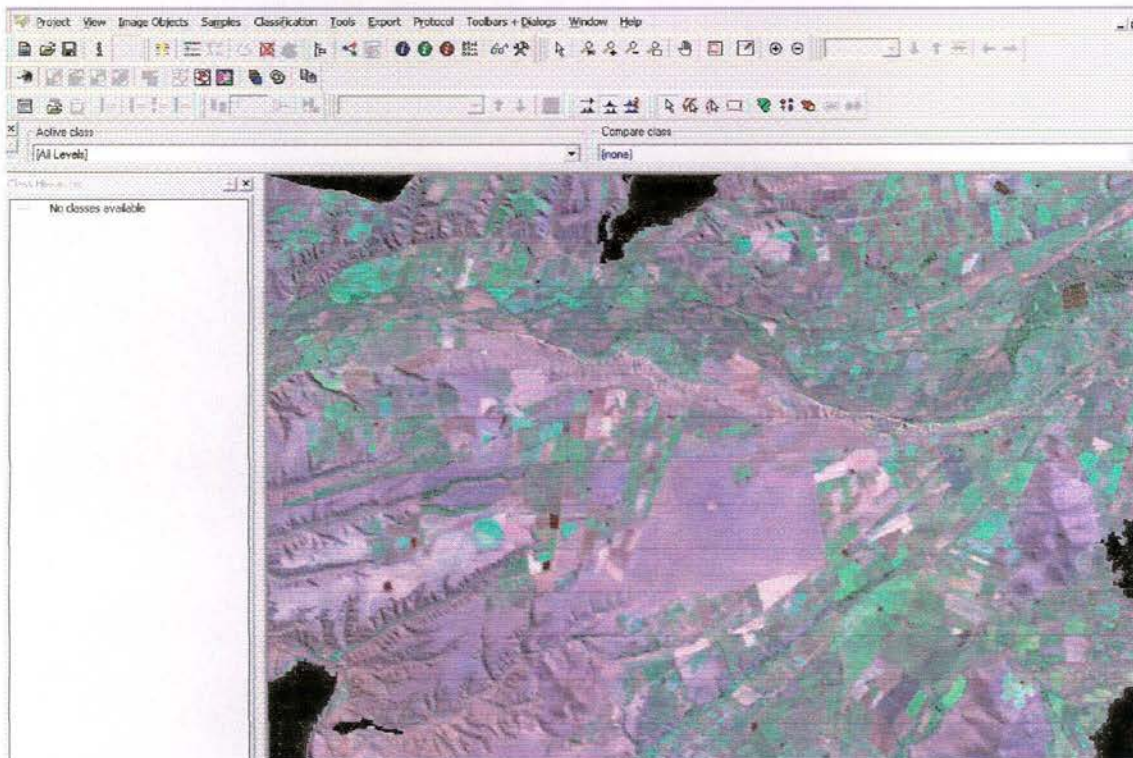


## CLASIFICACION GENERAL DE IMAGEN USANDO TRES NIVELES

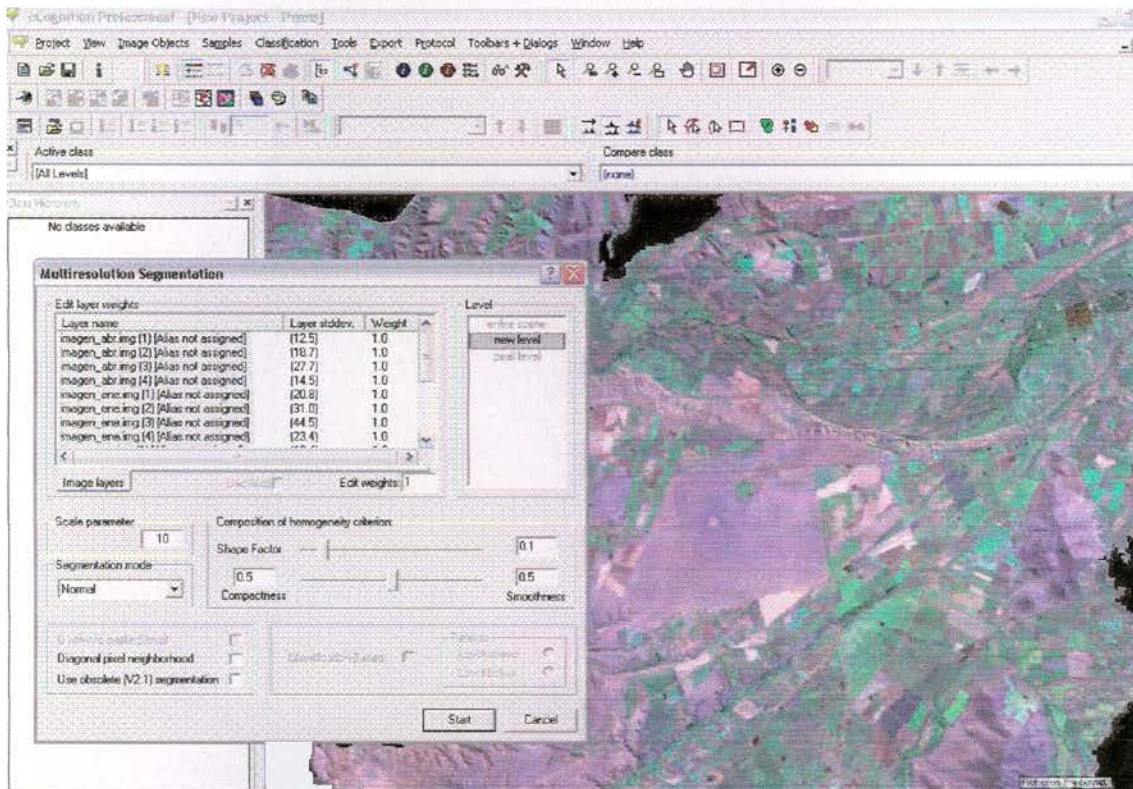




## ASIGNACION DE NIVELES DE SEGMENTACION ZONA AGRICOLA

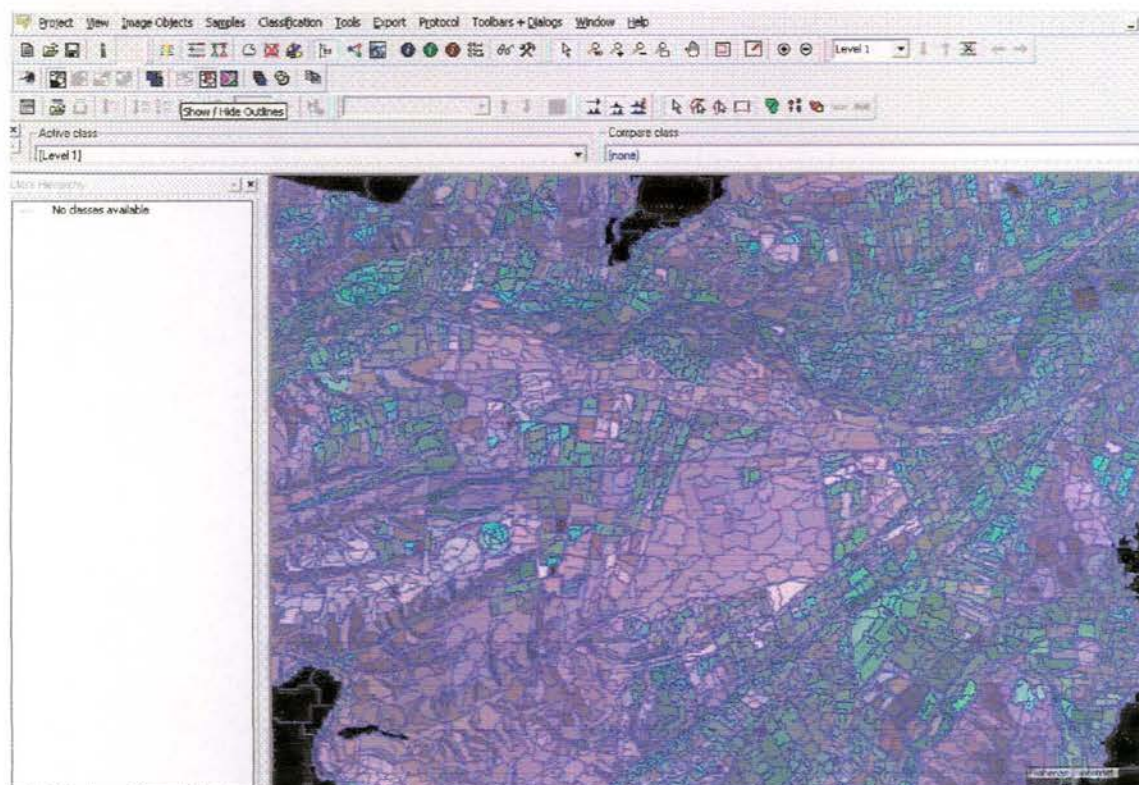


## AMPLIACION VALLE AGRICOLA Y ASIGNACION DE ESCALA VALOR 10 (PRIMER NIVEL UTILIZADO)

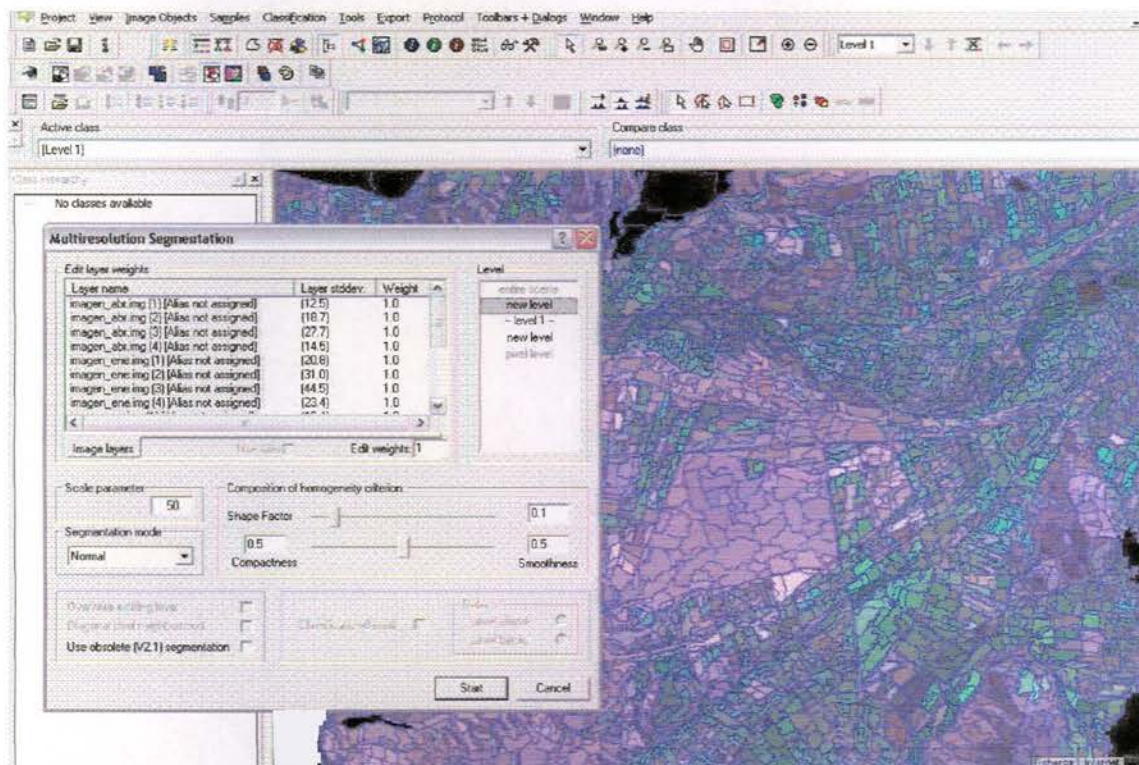




## RESULTADO DE LA SEGMENTACION

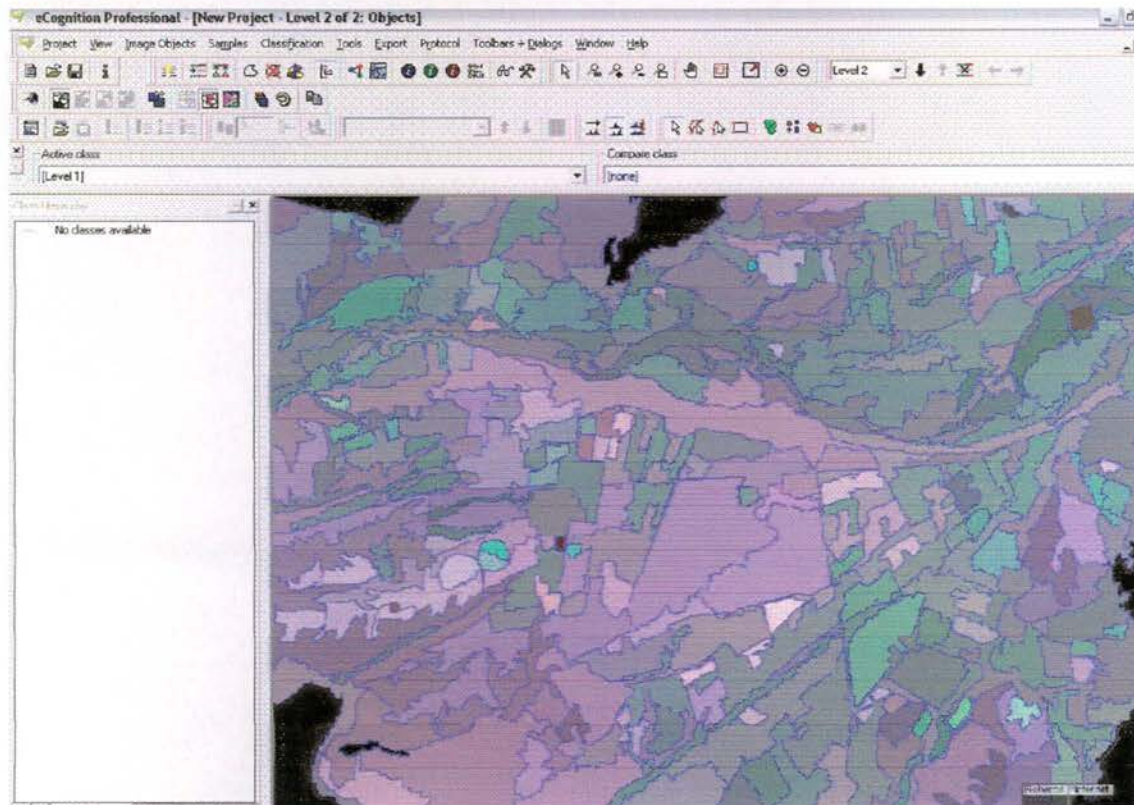


## SEGUNDO NIVEL DE SEGMENTACION APLICANDO VALOR DE ESCALA 50 (NIVEL 2)

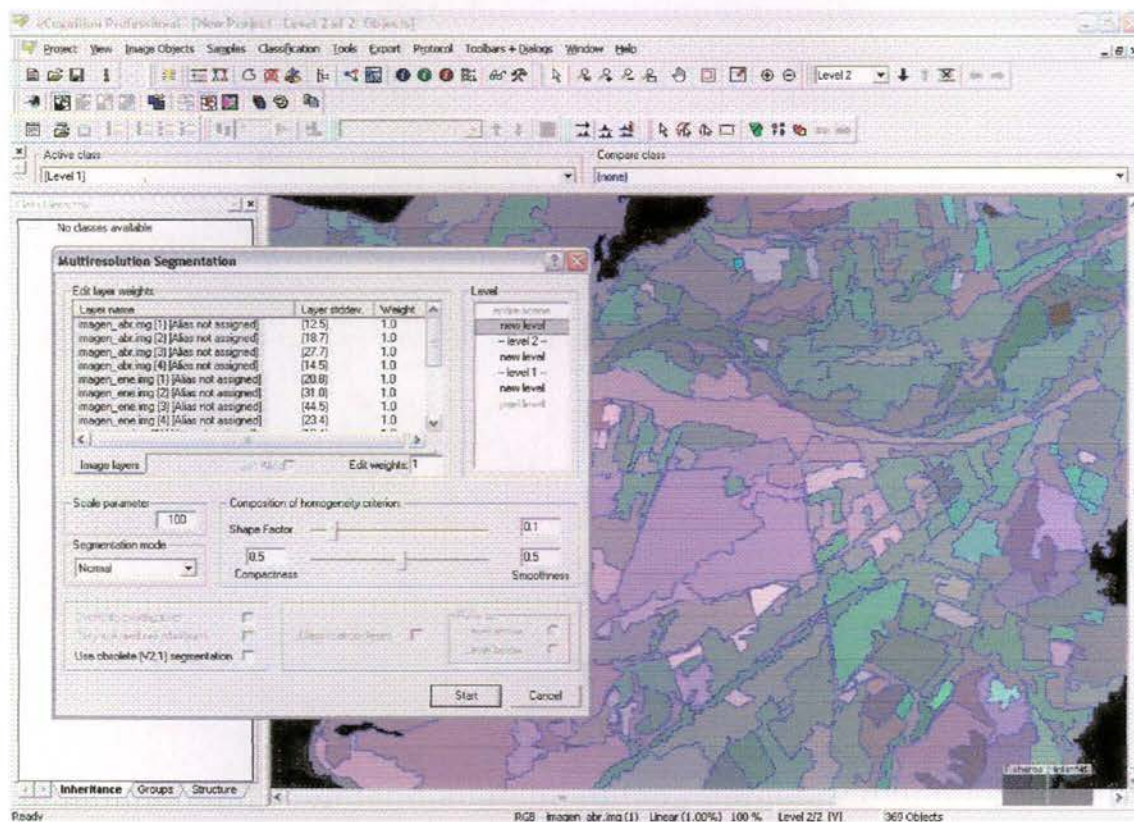




## RESULTADO SEGMENTACION SEGUNDO NIVEL

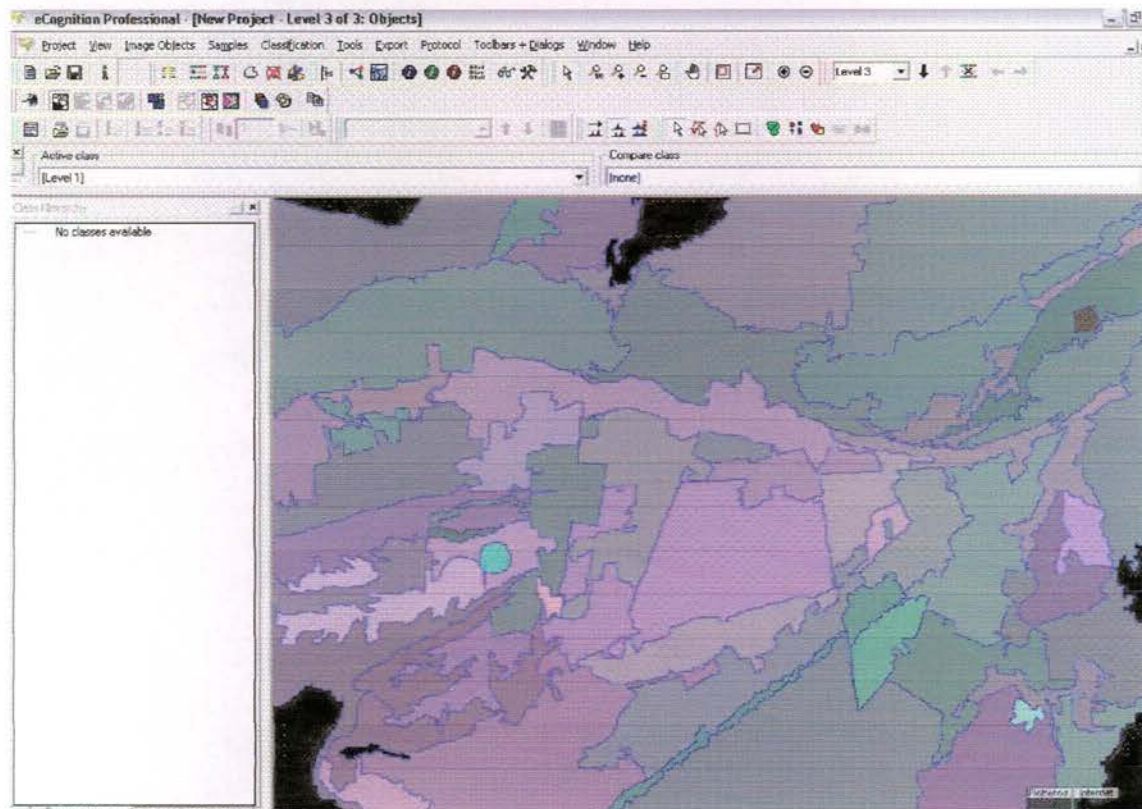


## TERCER NIVEL DE SEGMENTACION APLICANDO ESCALAMIENTO DE VALOR 100

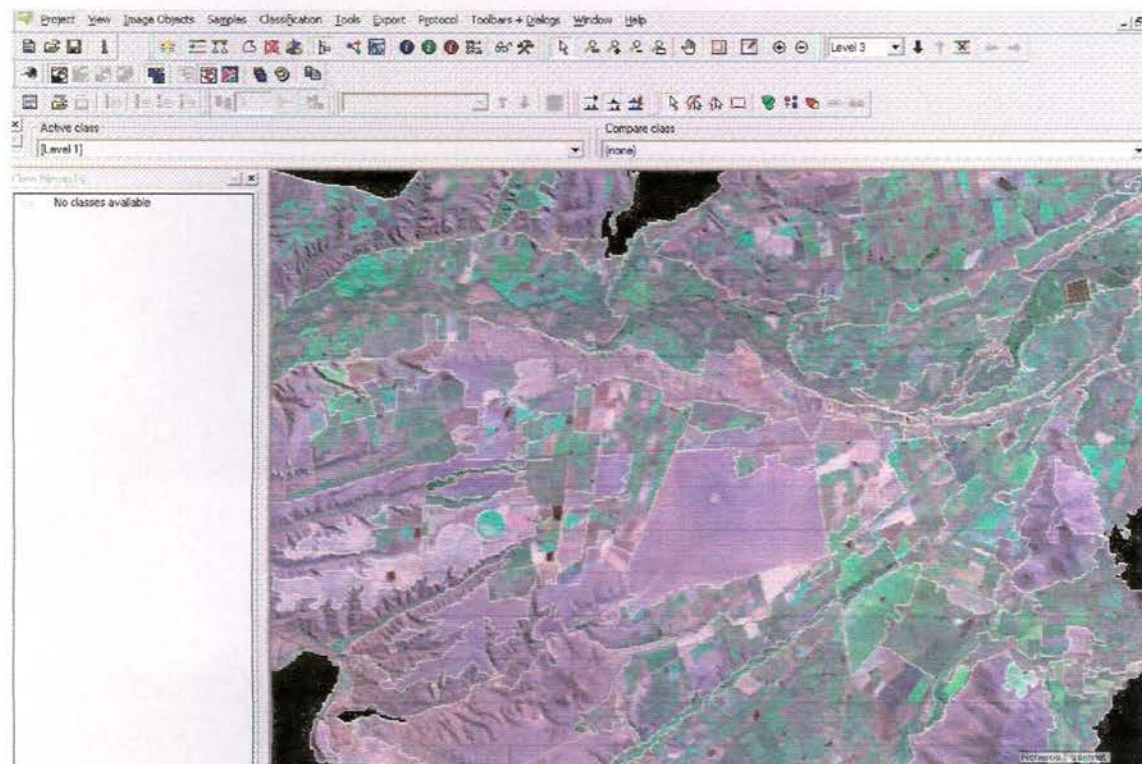




## RESULTADO DE LA TERCERA SEGMENTACION

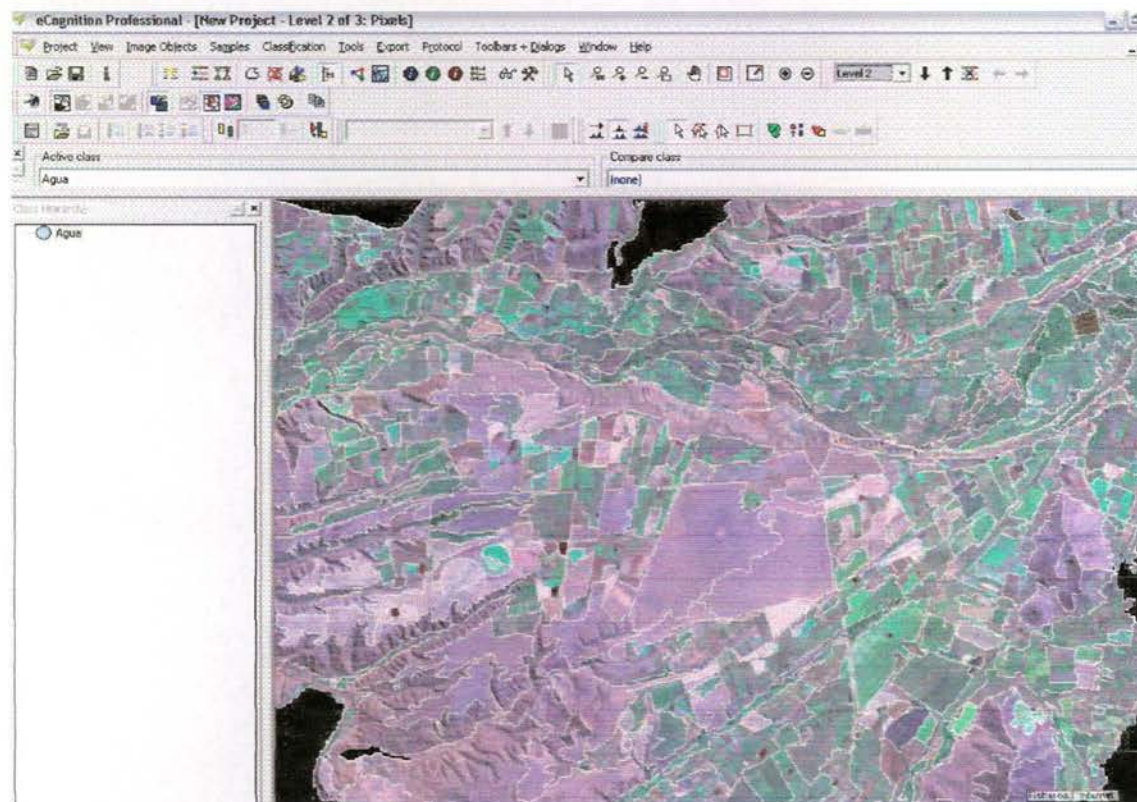


## RESULTADO DE LA TERCERA SEGMENTACION SOBRE LA IMAGEN SATELITAL

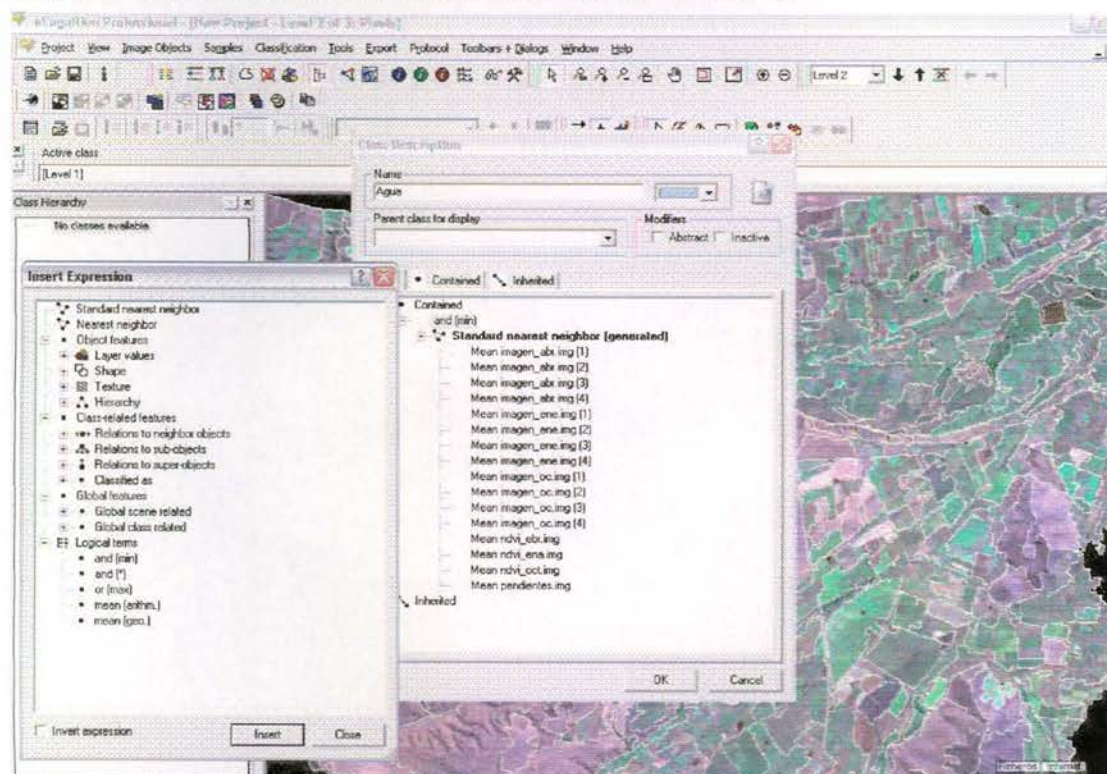




## RESULTADO DE LA SEGUNDA SEGMENTACION SOBRE LA IMAGEN SATELITAL



## ASIGNACION DE CLASES PARA LA CLASIFICACION

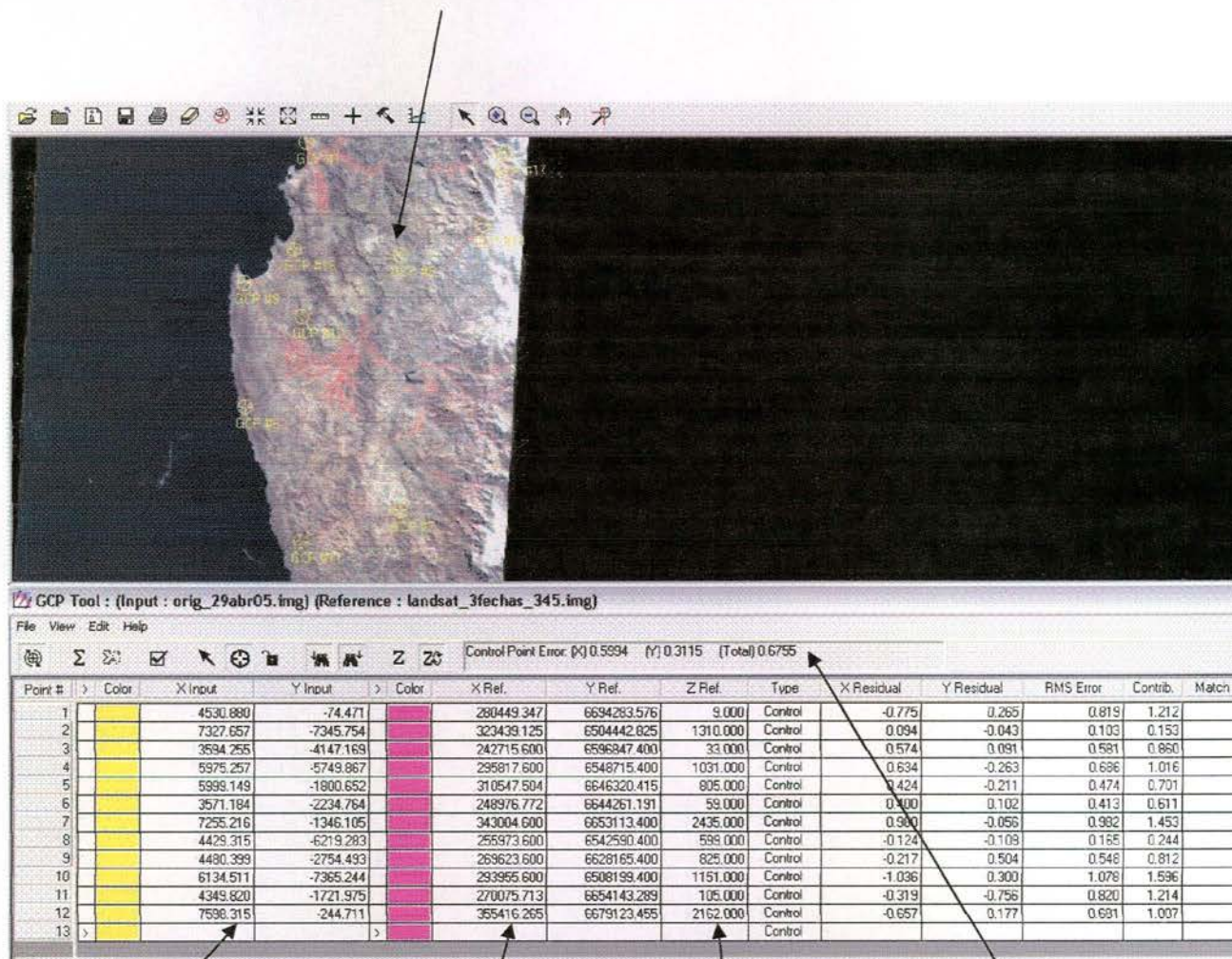




## **ANEXO 2: Puntos de Control y Error Asociado a la Georreferencia de Imágenes Landsat**



## Ubicación Puntos de Control para la Ortorectificación



Error Medio Cuadrático  
(RMS) obtenido

Coordenadas en la  
Imagen

Coordenadas en el  
Mapa

Altitud del Punto obtenida  
del SRTM (Modelo  
Digital de Elevación)