

O/H. 122
526
I

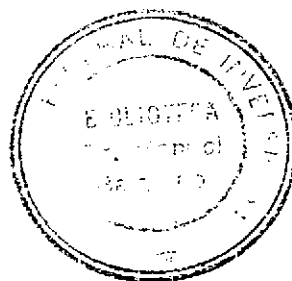
4/7/95

**PROVINCIA DE TUCUMÁN
CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES
ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES**

**RELEVAMIENTO SATELITAL DE LA PROVINCIA
DE TUCUMÁN
DETERMINACIÓN DEL ÁREA CULTIVADA CON CITRUS Y
GRANOS, Y PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR**

Volumen I

INFORME FINAL



**TUCUMÁN
Julio de 1999**

Instituciones Participantes:

Ministerio de la Producción de la Provincia de Tucumán

Consejo Federal de Inversiones

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres

Comisión Nacional de Actividades Espaciales

Estación Terrena Córdoba

Ejecución del Proyecto:

Lic. Federico J. Soria

Ing. Agr. Carmina del V. Fandos

RELEVAMIENTO SATELITAL DE LA PROVINCIA DE TUCUMÁN. DETERMINACIÓN DEL ÁREA CULTIVADA CON CITRUS y GRANOS, Y PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR

RESUMEN

En el presente trabajo, utilizando la información digital aportada por imágenes satelitales LandSat5 TM, se determinó la superficie ocupada por los cultivos de citrus, soja, poroto, y caña de azúcar para la campaña 1.998-1.999, la superficie ocupada con trigo bajo riego de pivote central de la campaña 1.998, y se estimó, en el caso particular de la caña de azúcar, la producción global de la misma diferenciando tres niveles de producción.

El área de estudio se circunscribió a la provincia de Tucumán, específicamente el proyecto abarcó las regiones agrológicas de pedemonte, llanura y la cuenca intermontana de Tapia-Trancas, en las cuales se desarrollan preponderantemente los cultivos antes mencionados.

Para clasificar los cultivos de caña, citrus, soja y poroto, se realizó un análisis digital de las imágenes utilizando el método de Clasificación Multiespectral Supervisada; mientras que para el cultivo de trigo bajo riego con sistema de pivote central, dadas las características del mismo, se efectuó un análisis visual (analógico).

De las clasificaciones se obtuvieron dos resultados, uno estadístico del que se infiere la superficie del cultivo en estudio y otro gráfico el cual refleja su distribución en el territorio de la provincia de Tucumán.

**RELEVAMIENTO SATELITAL DE LA PROVINCIA DE TUCUMÁN.
DETERMINACIÓN DEL ÁREA CULTIVADA CON CITRUS Y
GRANOS, Y PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR**

Volúmen I
INFORME FINAL

ÍNDICE:

	Página
I OBJETIVOS DEL TRABAJO	1
II ALCANCE DEL TRABAJO	1
III ÁREA DEL TRABAJO	1
IV PLAN DE TAREAS	2
V PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	3
V.1 Selección de lotes de control o campos de entrenamiento	3
V.2 Georreferenciación de los campos o lotes seleccionados	4
V.3 Recolección de información relevante respecto de los cultivos y fincas involucrados en los campos de control	4
V.4 Selección y obtención de imágenes ajustadas al calendario agrícola de los distintos cultivos en evaluación	5
V.5 Digitalización de límites políticos (interprovincial y departamental) red vial primaria y principales cursos hidrográficos	7
V.6 Reconocimiento de las condiciones de campo imperantes en los puntos de control, al momento de las pasadas de satélite	7
V.7 Interpretación digital y clasificación de las imágenes seleccionadas para cada cultivo	8
V.8 Validación de la información inferida de las imágenes clasificadas	11
V.9 Elaboración de mapas temáticos discriminando las superficies ocupadas por cada cultivo	11
1 CULTIVO: CAÑA DE AZÚCAR	12
1.1 Aspectos generales del cultivo	12

1.2	Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital	14
1.3	Proceso de clasificación	16
1.3.1	Selección de imágenes	16
1.3.2	Obtención y selección de firmas espectrales	17
1.3.3	Clasificación multiespectral	20
1.4	Resultados	20
1.4.1	Salida gráfica	20
1.4.2	Cálculo de superficies	21
1.4.3	Validación de los resultados	22
2	CULTIVO: CITRUS	24
2.1	Aspectos generales del cultivo	24
2.2	Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital	25
2.3	Proceso de clasificación	29
2.3.1	Selección de imágenes	29
2.3.2	Obtención y selección de firmas espectrales	30
2.3.3	Clasificación multiespectral	32
2.4	Resultados	32
2.4.1	Salida gráfica	32
2.4.2	Cálculo de superficies	33
2.4.3	Validación de los resultados	33
3	CULTIVO: SOJA	34
3.1	Aspectos generales del cultivo	34
3.2	Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital	35
3.3	Proceso de clasificación	38
3.3.1	Selección de imágenes	38
3.3.2	Obtención y selección de firmas espectrales	39
3.3.3	Clasificación multiespectral	40
3.4	Resultados	40
3.4.1	Salida gráfica	40
3.4.2	Cálculo de superficies	41
3.4.3	Validación de los resultados	41
4	CULTIVO: POROTO	42
4.1	Aspectos generales del cultivo	42
4.2	Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital	43
4.3	Proceso de clasificación	44
4.3.1	Selección de imágenes	44
4.3.2	Obtención y selección de firmas espectrales	45
4.3.3	Clasificación multiespectral	45
4.4	Resultados	46

4.4.1	Salida gráfica	46
4.4.2	Cálculo de superficies	46
4.4.3	Validación de los resultados	46
5	CULTIVO: MAIZ	48
5.1	Aspectos generales del cultivo	48
5.2	Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital	49
5.3	Proceso de clasificación	51
6	CULTIVO: TRIGO BAJO RIEGO CON SISTEMA DE PIVOTE CENTRAL	52
6.1	Aspectos generales del cultivo	52
6.2	Pivotes centrales	53
6.3	Proceso de clasificación	54
6.3.1	Selección de imágenes	54
6.3.2	Identificación de las áreas irrigadas con pivote central	54
6.4	Resultados	56
6.4.1	Salida gráfica	56
6.4.2	Cálculo de superficies	56
6.4.3	Validación de los resultados	56
7	CONCLUSIONES	58
8	BIBLIOGRAFÍA	61
9	AGRADECIMIENTOS	63

**RELEVAMIENTO SATELITAL DE LA PROVINCIA DE TUCUMÁN.
DETERMINACIÓN DEL ÁREA CULTIVADA CON CITRUS Y
GRANOS, Y PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR**

Volúmen II

ANEXO

ÍNDICE:

- » FIGURAS
- » PLANILLAS DE CAMPO
- » ESTADÍSTICAS DE LAS FIRMAS ESPECTRALES
- » MAPAS TEMÁTICOS

I - OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos del presente trabajo, utilizando como fuente de información imágenes satelitales, fueron múltiples: determinar las superficies cultivadas con caña de azúcar, soja, maíz, poroto, trigo bajo riego de pivote central y citrus; estimar la producción de caña de azúcar; acumular información para la posible elaboración de modelos de predicción bajo las diferentes condiciones agroclimáticas que pudieran suscitarse y la formación y capacitación de recursos humanos.

Resume la experiencia atesorada en el transcurso de tres años de investigación para el cultivo de caña de azúcar, el primero de ellos fuera de los términos del presente contrato, dos años en el cultivo de citrus y un año en el de granos.

II - ALCANCE DEL TRABAJO

Establecer espacial y cuantitativamente, dentro del territorio provincial, el área ocupada por los cultivos de caña de azúcar, soja, poroto, trigo bajo riego de pivote central y citrus estimando, en el caso particular de la caña de azúcar, la producción global a partir de la diferenciación de sectores con distintos niveles de producción; simultáneamente acumular información que permita en el futuro la elaboración de modelos universales aplicables a la predicción bajo condiciones variables tanto climáticas como biológicas de los cultivos involucrados.

III - AREA DE TRABAJO

La Provincia de Tucumán, se encuentra situada entre los 26° y 28° de latitud sur y los 64° 30' y 66° 30' de longitud oeste; comprende una superficie de 22.524 km². Casi un 45% de su superficie se encuentra ocupada por serranías y montañas ubicadas en la mitad oeste de su territorio.

El área específica de estudio del proyecto abarca las regiones agrológicas de pedemonte, llanura y la cuenca intermontana de Tapia-Trancas, en las cuales se desarrollan preferentemente los cultivos antes mencionados.

IV - PLAN DE TAREAS

El proyecto conllevó el desarrollo secuencial de las siguientes tareas:

- Selección de lotes de control o campos de entrenamiento para todos los cultivos establecidos : áreas piloto con cultivos reconocidos a ser utilizadas para identificar las respuestas espectrales de los mismos.
- Georreferenciación de los campos o lotes seleccionados: identificación de la localización geográfica de los lotes de control a los efectos de su ulterior ubicación en las imágenes.
- Recolección de información relevante respecto de los cultivos y fincas involucrados en los campos de control
- Selección y obtención de imágenes, ajustadas al calendario agrícola de los distintos cultivos en evaluación.
- Digitalización de límites políticos (interprovincial y departamental), red vial primaria y principales cursos hidrográficos.
- Reconocimiento de las condiciones de campo imperantes en los puntos de control, al momento de las pasadas de satélite, para su utilización posterior en el análisis de las imágenes.
- Interpretación digital y clasificación de las imágenes seleccionadas para cada cultivo.
- Validación de la información inferida de las imágenes clasificadas visitando campos no incluidos entre los campos test utilizados para su clasificación.

- Elaboración de mapas temáticos discriminando las superficies ocupadas por cada cultivo.

V - PROCEDIMIENTO DE ANALISIS

V.1 - Selección de lotes de control o campos de entrenamiento

En la selección y distribución de los campos de entrenamiento se contemplaron los siguientes aspectos :

- La subdivisión en regiones agrológicas discriminadas en el trabajo "Bosquejo Agroecológico de la Provincia de Tucumán" (Zuccardi y Fadda, 1985; Anexo: figura N° 1), con el objeto de individualizar las posibles diferencias de comportamiento para un mismo cultivo en distintas zonas.
- Que el número de campos de entrenamiento diera una densidad de información uniforme para cada región agrológica y cultivo considerado.
- Que la especie cultivada fuera dominante en la zona considerada para cada caso en particular.
- Que el tamaño de los lotes cultivados permitiere una fácil identificación de los mismos en las imágenes.
- Que la localización de los lotes facilitara el acceso a los mismos de forma tal que el reconocimiento de campo ulterior, al momento de las pasadas del satélite, se viera agilizado.

Para una primera selección se identificaron campos, con las características antes citadas, sobre una imagen satelital de fecha 02/04/97, complementándosela con la información brindada por las cartas del I.G.M. a escala 1:250.000 disponibles (Hoja 2766-I, Santa María; Hoja 2766-II, San Miguel de Tucumán; Hoja 2766-III, Belén; Hoja 2766-IV, Concepción).

La distribución de los campos de control seleccionados en forma definitiva, discriminados por cultivos obran representados en la figura N° 2 del Anexo.

V.2 - Georreferenciación de los campos o lotes seleccionados

Para la georreferenciación se utilizó un equipo GPS (Sistema de posicionamiento global) con precisión en el posicionamiento de ± 15 m para la modalidad de medición adoptada, esto es con la utilización de un solo instrumento. En nuestro caso la precisión media alcanzada fue de ± 20 m con máximos de ± 35 m de deriva, con conexión a no menos de 4 satélites al realizar la lectura.

No se tuvo un criterio único para llevar a cabo esta tarea. El propósito principal fue disponer de un par de coordenadas que permitiesen identificar la unidad productiva (finca) en la cual se ubicaba el campo de control; así que fue indistinto tomar para georreferenciar la tranquera de acceso, el casco de la propiedad o bien un esquinero principal, en tanto cualquiera de ellos fuera fácilmente reconocible.

Usualmente para los cultivos de granos y citrus se utilizó un solo punto georreferenciado; en los cultivos de caña, en cambio, se densificó la referenciación hasta tres puntos por lote.

V.3 - Recolección de información relevante respecto de los cultivos y fincas involucrados en los campos de control

En simultaneidad con las tareas de reconocimiento de los campos de entrenamiento y de su georreferenciación se recabó información adicional referente a:

- propietario o encargado de la finca,
- subdivisiones de las fincas y sus superficies,
- especies cultivadas,
- variedades de las especies cultivadas,
- fechas de siembra de los distintos cultivos y manejo (tipo de labranza , fertilización, riego),

- otros aspectos de relevancia según el cultivo.

Esta información, conjuntamente con los datos de georreferenciación, fue cargada en una base de datos; impresión de la cual consta en la sección Planillas del Anexo.

V.4 - Selección y obtención de imágenes, ajustadas al calendario agrícola de los distintos cultivos en evaluación

A los fines del proyecto la E.E.A.O.C. firmó un convenio con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) para la provisión de imágenes LandSat5 TM y prestación de apoyo técnico y logístico, en la Estación Terrena Córdoba Centro Espacial "Teófilo Tabanera" (ETC), en Falda del Carmen (Provincia de Córdoba).

La Provincia de Tucumán es cubierta por dos orbitales consecutivos y dos imágenes sucesivas sobre cada uno de ellos, según se manifiesta en la figura N° 3 del Anexo.

El objetivo inicial fue el de conseguir imágenes representativas de los estadios fenológicos más significativos para cada cultivo; esto implicaba, en términos medios, la obtención de 3 imágenes de cada uno de ellos, con excepción del de citrus. Ello no fue posible, principalmente, por las particulares condiciones climáticas impuestas por el fenómeno meteorológico denominado "El Niño", cuyos efectos comenzaron a manifestarse en noviembre de 1997 y se prolongaron hasta principios de 1999, y en menor medida por los inconvenientes técnicos suscitados en la CONAE-ETC para la recepción de imágenes.

El listado de imágenes con las que en definitiva se dispuso fue el siguiente:

Orbital	Centro de imagen	Fecha de adquisición
230	78	04/10/97
230	79	04/10/97
231	78	11/10/97
231	79	11/10/97
231	78	31/01/98
231	79	31/01/98
230	78	01/06/98
230	79	01/06/98
231	78	12/09/98
231	79	12/09/98
230	78	07/10/98
230	79	07/10/98
230	78	10/12/98
230	79	10/12/98
231	78	17/12/98
231	79	17/12/98
231	78	19/02/99
231	79	19/02/99
230	78	28/02/99
230	79	28/02/99
230	78	17/04/99
230	79	17/04/99
231	78	10/05/99
231	79	10/05/99

El satélite LandSat5 TM es de origen Norteamericano, y sus principales características son:

- Altitud de órbita: 705 km
- Resolución temporal: 16 días
- Ancho de imagen: 185 km
- Sensor: Mapeador Temático

- Resolución espectral: 7 Bandas
- Resolución espacial: 30 m

Las imágenes fueron entregadas bajo formato digital, en soporte óptico (CD), Fast Format nivel 4 de Producción (CONAE-ETC), con la información de las 7 bandas.

V.5 - Digitalización de límites políticos (interprovincial y departamental), red vial primaria y principales cursos hidrográficos

Para digitalizar la información de referencia se utilizó la base planimétrica a escala 1:250.000 del I.G.M. (Hojas 2766 - I, II, III y IV) empleando el software del sistema de información geográfico (S.I.G.) PC ArcInfo, compatible con el software utilizado para el tratamiento digital de las imágenes. La resultante gráfica de dicha tarea se encuentra reproducida en las figuras N° 4 a 8 del Anexo.

El layer (capa) correspondiente al límite interprovincial fue utilizado para circunscribir la clasificación digital de la imagen exclusivamente al territorio de la provincia de Tucumán.

V.6 - Reconocimiento de las condiciones de campo imperantes en los puntos de control, al momento de las pasadas de satélite

Con el objeto de disponer de información actualizada, relativa a las distintas condiciones de campo en lo referente tanto al cultivo propiamente dicho (fenología, estado sanitario) como al del estado del campo de cultivo (enmalezamiento, evidencias de riego, anegamientos, etc.), se efectuaron controles adicionales coincidentes con las fechas de pasada del satélite. Su objeto fue el de discriminar las posibles causales en las distintas respuestas espectrales que pudieran darse al momento de la selección de firmas.

Las distancias que separaban los distintos campos de control imposibilitaba su reconocimiento en un único día; debido a ello y cuando se podía presuponer que las condiciones de nubosidad permitirían obtener una imagen apta, dichos controles comenzaban a efectuarse con hasta dos días de antelación a la fecha de pasaje. La

inestabilidad de las condiciones climáticas determinó que en definitiva se hicieran una cantidad de controles de campo mayor al de las imágenes obtenidas.

V.7- Interpretación digital y clasificación de las imágenes seleccionadas para cada cultivo

La metodología adoptada para discriminar las áreas ocupadas por los distintos cultivos fue la de Clasificación Multiespectral Supervisada, esto es con la utilización de la información brindada por dos bandas o más, en nuestro caso tres, y el conocimiento de la realidad de campo. El software empleado fue el ERDAS 8.3.1.

El conocimiento de la realidad de campo permite delimitar sobre la imagen áreas piloto representativas de las clases o categorías a clasificar; en la bibliografía anglosajona a estas áreas se las denomina "*training fields*" (campos de entrenamiento) y tal como lo indica dicho término estos campos sirven para "*entrenar*" al procesador en el reconocimiento de las clases a discriminar. Es a partir de los campos de entrenamiento que la computadora calcula los niveles digitales (ND) de los píxeles que definen cada una de estas clases, luego reconoce en la totalidad de los píxeles de la imagen aquellos que poseen iguales niveles digitales asignándoles la categoría que les corresponde en cada caso.

La información de campo y otros documentos auxiliares (planos y croquis de las fincas visitadas, puntos georreferenciados) son de gran ayuda para la precisa localización de los campos de entrenamiento.

El análisis digital se desarrolló en dos etapas. En la primera las imágenes fueron corregidas geométricamente y una vez realizado dicho ajuste se compuso un mosaico a partir de las dos imágenes contiguas de un mismo orbital, georreferenciándose el producto así obtenido.

En una segunda etapa se procedió a la clasificación propiamente dicha, la que se inicia con la selección de los campos de entrenamiento que serán utilizados para extraer las firmas espectrales del cultivo a clasificar; para esta selección se tuvo en cuenta la representatividad del lote en cuanto a los parámetros enumerados en las bases de datos

tomándose varios campos de la misma categoría a fin de reflejar su variabilidad en la zona de estudio.

En el proceso de selección, en primera instancia, de todas aquellas firmas que hubieren tenido niveles digitales semejantes se eligió una (la más representativa), luego se descartaron aquellas cuyos ND se confundían con los ND de sectores que no correspondía clasificar. En este momento del proceso fue de elevada importancia el conocimiento del área de estudio, adquirido en las sucesivas salidas a campo.

Para la clasificación, de la información contenida en las 7 bandas de la imagen, se utilizó la proporcionada por las bandas 3, 4, y 5 dado que el rango de reflectancia abarcado por ellas permite la discriminación de biomasa vegetal y cuyas características principales son:

- **Banda 3:** (0.63 a 0.69 μm) corresponde al rojo visible; esta banda es muy usada para discriminar especies vegetales, delimitación de suelos y lineamientos geológicos, como también urbanizaciones.
- **Banda 4:** (0.76 a 0.90 μm) corresponde al infrarrojo reflectivo o cercano; dentro de las bandas seleccionadas ésta resultó particularmente útil por cuanto muestra la cantidad de biomasa vegetal presente en una misma escena, lo cual la hace muy apta para estimar producciones agrícolas.
- **Banda 5:** (1.55 a 1.74 μm) se ubica en el rango de los infrarrojos medios; responde sensiblemente a la cantidad de agua en las plantas; es usada para los estudios de estrés hídrico en los cultivos y para análisis fitosanitarios.

Para la visualización durante la selección de campos de entrenamiento y firmas espectrales la combinación de bandas utilizada fue la denominada Pseudo Color Compuesto, con la asignación de filtros rojo, verde y azul a las bandas 4,5,3 respectivamente. Ejemplo de cómo se observa dicha composición se puede apreciar en la figura N° 9 del Anexo y a escala de mayor detalle en la foto subsiguiente.

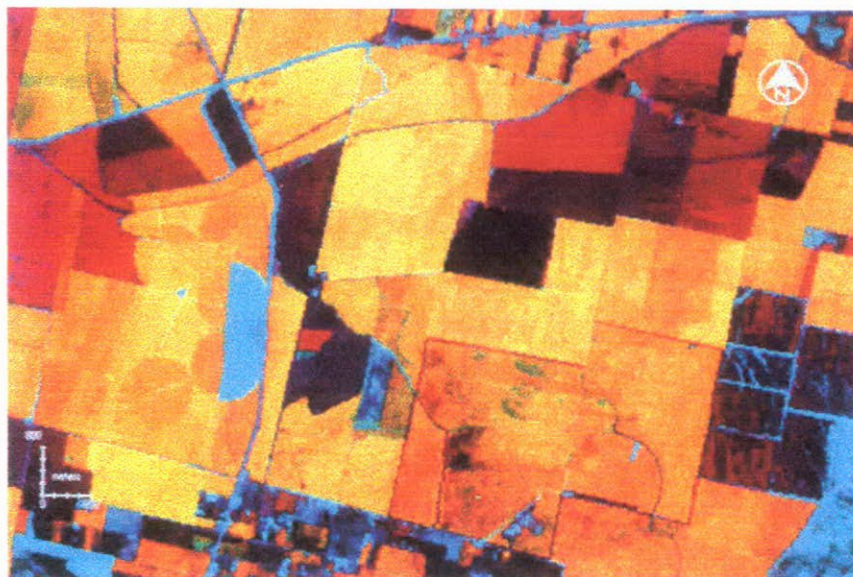


Imagen LandSat5 TM, composición Pseudo Color Compuesto, bandas 4-5-3.

Fecha: 28/02/99; lugar: Cañete (Depto. Cruz Alta); coordenadas aprox.: 3.608.670 / 7.023.310

Considerando que el área total a clasificar en el proyecto correspondía a imágenes dadas sobre orbitales distintos, por tanto con fechas de toma en el mejor de los casos con una separación temporal de 8 días, que implicaba exposiciones bajo condiciones atmosféricas y fenológicas distintas, no se consideró recomendable clasificarlas en conjunto. Atento a lo explicitado se hizo correr el proceso de clasificación sobre cada uno de los mosaicos generados con imágenes del mismo orbital y con las firmas espectrales definitivas seleccionadas en dicho conjunto de imágenes.

El producto resultante es una nueva imagen, similar a las originales en cuanto a estructura y tamaño, en la cual cada pixel no responde a un valor de reflectividad sino a una categoría, donde la información espectral original (3 bandas) se condensa en una sola clase temática que da lugar a su vez a dos subproductos, uno cartográfico (mapa) y otro estadístico (superficies).

V. 8 - Validación de la información inferida de las imágenes clasificadas

La validación de las clasificaciones obtenidas se materializó mediante dos procedimientos. El inicial consistió en corroborar la correspondencia entre los cultivos

habidos en los campos de control, no utilizados para la obtención de firmas espectrales, con los resultados brindados por la clasificación para esos mismos campos. El segundo se materializó con el reconocimiento de la existencia en campo del cultivo clasificado en parcelas distintas a las de los campos de control.

Los resultados de la validación fueron utilizados para determinar el porcentaje de error que en cada caso se le asignó a los valores areales obtenidos de la clasificación.

V. 9 - Elaboración de mapas temáticos discriminando las superficies ocupadas por cada cultivo

Para mejorar la salida gráfica del producto cartográfico temático, obtenido en el proceso de clasificación, se le aplicó un filtro de "paso bajo" para el realce de la imagen definitiva. Finalmente para su impresión se compuso un mapa temático con proyección conforme Gauss-Kruger utilizando de fondo la banda 3 en escala de grises de los mosaicos, sobreimponiéndole la imagen temática con un color que mejore el contraste visual y el límite provincial con un layer vectorial.

1 - CULTIVO: CAÑA DE AZÚCAR

1.1 – Aspectos generales del cultivo

La caña de azúcar se cultiva en las provincias de Tucumán, Jujuy, Salta, Santa Fe y Misiones, siendo la Provincia de Tucumán la principal productora.

En 1998 en la Argentina se produjeron 1.749.184 t de azúcar (Centro azucarero regional Tucumán), de los cuales el 66% corresponde a Tucumán (1.153.248 t), 32% a las provincias de Salta y Jujuy y el 2% a las provincias del litoral.

La agroindustria de Tucumán está estructurada sobre la base de 15 ingenios que procesan la materia prima propia y la de unos 9.000 productores independientes, éstos últimos con variadas características en cuanto a tamaños de explotaciones y niveles productivos. Por el contrario en la zona cañera de Salta y Jujuy la estructura productiva se basa en 5 ingenios y muy pocos cañeros independientes, de manera que en este caso se trata de explotaciones de gran escala, en tanto que en la región del litoral la producción corresponde fundamentalmente a cañeros medianos y chicos.

Para la actividad azucarera del país resulta sumamente importante estimar la producción con antelación al inicio de la zafra; de este modo se puede planificar ajustadamente los destinos de lo producido (comercialización a nivel nacional e internacional) y así brindar posibilidades a las empresas de contraer compromisos de venta que las ayudan a financiar la cosecha.

En virtud que la zona cañera de Salta y Jujuy está conformada por pocos productores es relativamente fácil tener una idea de su producción; todo lo contrario ocurre en Tucumán donde la alta participación del minifundio impide contar con estimaciones seguras, de allí el especial interés que se demuestra, a nivel gubernamental y privado, para desarrollar nuevas técnicas que, sumadas a las tradicionales, permitan lograr la mejor aproximación posible a lo que será la realidad de la campaña. Es aquí donde la utilización de la información generada por la tecnología espacial se ofrece como una herramienta que facilita y mejora las posibilidades de estimación del área cultivada con la sacarífera y su producción.

Tucumán presenta buenas condiciones climáticas y edáficas para el crecimiento de la caña de azúcar; históricamente la superficie cañera en Tucumán osciló entre 250.000 y 225.000 ha, lo que representa cerca del 50% de la superficie cultivada provincial. Su expansión territorial se encuentra limitada al norte y al oeste por el relieve serrano; al este y al sur por la disminución de las precipitaciones (isoyeta de 700 mm), el aumento del número de días de heladas y la presencia de suelos salinos.

La superficie cultivada se circunscribe a las regiones agrológicas del Pedemonte, donde compite con cultivos citrícolas y hortícolas, Llanura Deprimida y Llanura Chacopampeana.

El área cañera se encuentra bajo un régimen monzónico de lluvias cuyos valores anuales medios, variables entre los 800 a 1.500 mm, se incrementan a medida que se acercan a los cerros del oeste. Durante el periodo de frío y sequía, que va de mayo a agosto, se producen heladas moderadas (0°C a -4°C); estas condiciones de frío y sequedad interrumpen el crecimiento de la caña abruptamente, dando una estación de crecimiento más corta que en las provincias de Salta y Jujuy, lo que facilita la zafra y permite una adecuada maduración del cultivo.

Los suelos en el área de cultivo en general poseen buen drenaje con excepción de los localizados en la Llanura Deprimida, donde son afectados por fenómenos de revenimiento (ascenso de niveles freáticos y salinización de niveles edáficos). El terreno presenta una pendiente general suave hacia el sudeste y su topografía no presenta mayores impedimentos para la mecanización del cultivo.

La caña de azúcar es una planta plurianual cuya renovación en plantaciones comerciales se produce alrededor de los cinco años de implantada, siendo este lapso mayor o menor según el nivel de rendimiento que presente el cañaveral. Crece formando matas constituidas por varios tallos macizos sin ramificar y con un sistema subterráneo formado por raíces y rizomas. El tallo es el órgano que interesa desde el punto de vista de la producción de azúcar, ya que en él se almacena la sacarosa que pasa a constituir alrededor del 12% del peso fresco del mismo.

Los tallos están constituidos por alrededor de 20 a 25 entrenudos o canutos, de color, diámetro y longitud variables según las condiciones de crecimiento y las variedades de caña. Sus hojas se originan en los nudos y están constituidas por la vaina que envuelve

al tallo y la lamina que tiene una longitud de aproximadamente 1 m y un ancho de 5 a 7 cm.

La caña de azúcar se propaga asexualmente partiendo de las brotaciones de las yemas que contiene el tallo, denominándose caña semilla al trozo de tallo que se coloca en el surco. La brotación inicial origina un tallo primario, de las yemas de éste salen los tallos secundarios y de sus yemas los tallos terciarios, etc., conformando en su conjunto el “macollaje” de la caña.

Normalmente un cañaveral bien establecido está constituido por unos 100.000 tallos de caña por hectárea, pudiendo descender esa cifra a 50.000 en cultivos pobres que han sufrido algún tipo de limitante.

1.2. – Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital

A los efectos del procesamiento digital es importante identificar en el cultivo los estadios fenológicos, correlacionables con valores radiométricos significativos, que posibiliten discriminarlo de su entorno y apreciar diferencias dentro del mismo cultivo (Anexo: figura N° 10).

En el cultivo de caña de azúcar dichos estadios se localizan durante las siguientes fases evolutivas del cultivo. En los primeros 3 a 5 meses de crecimiento (foto subsiguiente) predominan las hojas y es posible diferenciar todavía las líneas de plantación, de color verde, que contrastan con el marrón característico de los suelos expuestos en las trochas entre surcos.



Finca Santa Elena (Depto. Famailla), coordenadas aproximadas 3.564.740 / 7.016.080

Cuando la planta completa su ciclo vegetativo, a los 10-12 meses, el cañaveral se muestra como una densa masa vegetal conformada por tallos y hojas, de unos 4 m de altura; en ellos los tallos presentan hojas verdes en la parte superior y hojas secas insertadas en las porciones media y basal, tal como se visualiza en la foto subsiguiente.



Colonia Lolita (Depto. Cruz Alta), coordenadas aproximadas 3.604.400 / 7.026.590

Después de una helada, o como producto de la aplicación de madurantes químicos, todo el cañaveral puede aparecer de color marrón a consecuencia de la destrucción del tejido foliar.

Luego de la cosecha, que acontece generalmente entre los meses de mayo a octubre, queda en el campo la "cepa", que son las porciones subterráneas del tallo. Posteriormente las yemas de esas cepas originarán nuevos tallos para otra cosecha y así sucesivamente año tras año hasta que sea necesario renovar el cañaveral. La renovación se realiza, principalmente, entre los meses de junio a setiembre.

1.3 – Proceso de clasificación

1.3.1 – Selección de imágenes

Con la experiencia recogida de los trabajos anteriores, "Empleo de imágenes satelitales para el relevamiento del área cañera de la provincia de Tucumán" (Scandaliaris, J. y otros, Revista Avance Agroindustrial, Año 18, Nº 70, 1997) y las pruebas preliminares realizadas en el marco del presente proyecto para la zafra 1998, se determinó que las fechas óptimas para la obtención de los resultados buscados, clasificación de superficies cultivadas y discriminación areal de niveles productivos, se ubican entre los primeros días de abril y mediados de mayo.

Durante ese período la caña de azúcar ya ha completado su ciclo de crecimiento y el cañaveral se muestra como una densa masa vegetal "verde", dentro de la cual ya se pueden realizar estimaciones de rendimiento a nivel de lotes. Por otra parte su aspecto y color todavía no se ven alterados por los efectos de la aplicación de madurantes químicos o de heladas.

La aplicación de los madurantes químicos ocurre a partir de fines de marzo y sus consecuencias comienzan a ser visibles a partir de la quinta a sexta semana posterior a su aplicación, manifestándose con un "amarillamiento" generalizado de la parte superior de la planta. En la foto que sigue pueden apreciarse las situaciones de un lote con madurante químico y otro sin su aplicación.



Finca Santa Elena Este (Depto. Famailla), coordenadas aproximadas 3.564.850 / 7.016.100
 Obsérvese la coloración amarillenta del lote aplicado con madurante químico (derecha)

Las imágenes utilizadas para la clasificación del área y de sus niveles productivos fueron:

Orbital	Centro de imagen	Fecha de adquisición
230	78	17/04/99
230	79	17/04/99
231	78	10/05/99
231	79	10/05/99

1.3.2 – Obtención y selección de firmas espectrales

Para la selección de las firmas espectrales se dispuso de 284 campos de control distribuidos en el área cañera (Anexo: planillas de caña de azúcar), con información de los mismos desagregada a nivel de:

Area: región agrológica en la que se encuentra;

Empresa: nombre de la empresa o propietario del campo;

Departamento: en la que se ubica la propiedad;

Localidad: en la que se ubica la propiedad;

apropiado, a los fines comparativos que pudieren corresponder, la discriminación de los tres rangos de rendimiento adoptados en dicha oportunidad, a saber:

Producción BAJA:	Rendimientos ≤ 56 t/ha
Producción MEDIA:	Rendimientos entre 57 y 75 t/ha
Producción ALTA:	Rendimientos ≥ 76 t/ha

La selección de firmas espectrales comprendió la siguiente secuencia:

- Selección preliminar de lotes, de los campos de control disponibles, para la obtención de firmas espectrales de cultivos con diferentes rendimientos conforme la información de campo obtenida;
- Obtención de las firmas espectrales en los lotes seleccionados;
- Comparación entre las firmas obtenidas y selección de firmas representativas de los distintos rangos de rendimiento reconocidos en campo;
- Comparación de las firmas espectrales seleccionadas para un mismo rango de rendimiento y selección dentro de dicho rango de firmas de las distintas variedades involucradas, conforme la información de campo disponible.

El proceso descrito, considerando la variación de la fecha de toma de las imágenes sobre los orbitales 231 (orbital oeste) y 230 (orbital este), se efectuó en forma individual para cada uno de los pares de imágenes involucrados en ellos; en función del empalme realizado visible en la imagen temática compuesta, el límite entre ambos corresponde a la transecta que aproximadamente une los puntos de coordenadas 3.530.000/6.919.000 y 3.580.000/7.120.000 (Anexo: mapa temático N° 1).

Las firmas espectrales fueron extractadas del conjunto de la información contenida en las bandas 3,4,5 a la que se sumó, en el caso particular de este cultivo la de la banda 7. Esta última, que registra las longitudes de onda del espectro electromagnético de la luz correspondiente al infrarrojo medio (2.08 a 2.35 μm), es usualmente utilizada para discriminar unidades litológicas y variación de contenido de humedad en suelo y vegetación; por la posibilidad de establecer contenidos de humedad diferenciales en el

cultivo correlacionables con su rendimiento a priori se consideró interesante incluir tal banda para efectuar la clasificación.

La comparación de los niveles digitales (ND) medios obtenidos en las distintas bandas involucradas en las firmas espectrales (Anexo: Firmas espectrales de caña de azúcar), permitió establecer que las diferencias más significativas, asimilables con los rangos de rendimientos preestablecidos, se manifestaba en los registros de la banda 4, con menor significación en los de la banda 5 y que el aporte de las bandas 3 y 7 a tal fin no era relevante. Lo expresado se evidencia en los histogramas de la figura N° 11 del Anexo.

1.3.3 – Clasificación multiespectral

Tal como se especificó en el punto V.7 (página N°10), el hecho que la cobertura del territorio a clasificar correspondía al dominio de dos orbitales y por lo tanto a imágenes expuestas, en el mejor de los casos, con 8 días de diferencia, esto es bajo condiciones atmosféricas de toma distintas y con ello respuestas espectrales disímiles, se adoptó clasificar las imágenes de ambos orbitales en forma independiente con sus respectivas firmas espectrales.

En nuestro caso las imágenes útiles obtenidas sobre cada orbital para efectuar la clasificación sumaron 23 días de desfase en sus fechas de toma (1.3.1, página 17), lo cual a las distintas condiciones atmosféricas imperantes en ambos casos (apreciable en la diferencia de tono en el empalme del mapa temático N°1) adicionó las fenológicas derivadas del desarrollo habido en los cultivos. Ambos aspectos se reflejan en la respuesta espectral que dan los ND medios expuestos en los histogramas mencionados precedentemente.

1.4 – Resultados

1.4.1 – Salida gráfica

Es un mapa temático que refleja la ubicación territorial y superficie ocupada por el cultivo, disponible para la zafra 1.999, dentro de la cual se registra la distribución areal de los rendimientos logrados (Anexo: mapa temático N°1).

Como se explicó en el punto V.9 (página N°11), para mejorar la salida gráfica del producto se le aplicó un filtro “paso bajo” a los efectos de realzar la imagen definitiva. La composición final es producto de la superposición de distintos layers: el fondo está dado en escala de grises por el registro de la banda 3, el temático por los resultados de las clasificaciones propiamente dichas y la delimitación del territorio provincial por un layer vectorial.

1.4.2 – Cálculo de superficies

El cálculo de la superficie deviene como producto estadístico resultante de la clasificación; el programa de procesamiento incluye el recuento de las unidades de registro del sensor (pixel) clasificadas para cada categoría establecida. A cada pixel se le asignó al realizar las correcciones de la imagen dimensiones de 30x30 m, lo que es equivalente a 0.09 ha de la superficie terrestre; éste valor resulta la constante que multiplica el recuento de pixeles para la obtención de dicha superficie.

Transformados los pixeles a valores areales se estimó una superficie **total bruta de cultivo de 238.500 ha**, que para los distintos rendimientos queda discriminada como sigue:

- rendimientos culturales bajos (≤ 56 t/ha): **145.420 ha;**
- rendimientos culturales medios (entre 57 y 75 t/ha) **73.890 ha;**
- rendimientos culturales altos (≥ 76 t/ha) **19.190 ha.**

La resolución espacial del sensor utilizado inevitablemente determina que, en la clasificación resultante queden incorporados como áreas cultivadas sectores marginales incultos aledaños a ella tales como caminos perimetrales e internos de la plantación y espacios destinados a otros servicios (acopio, vivienda, galpones, etc); en razón de lo antedicho la superficie que se logra clasificar en nuestro caso se define como bruta.

Resulta usual ponderar en promedio el área inculta de las explotaciones cañeras como un 15% del total de la propiedad (Sección Agronomía de caña de azúcar, E.E.A.O.C.), adoptando dicho factor de corrección la **superficie total neta** del cultivo en el territorio de

la provincia, estimada para el presente año, es de **202.700 ha** y su desagregamiento por niveles de rendimiento consecuente es de:

- rendimientos culturales bajos (≤ 56 t/ha) **123.600 ha;**
- rendimientos culturales medios (entre 57 y 75 t/ha) **62.900 ha;**
- rendimientos culturales altos (≥ 76 t/ha) **16.200 ha.**

Estos resultados manifiestan que del total de la superficie implantada el 61% responde a cañaverales de bajo nivel de producción, el 31% a los de rendimiento intermedio y el 8% restante a los de alta producción. Conforme lo que se puede apreciar en el mapa temático N°1 los rendimientos de nivel alto se concentran en el extremo noreste y sur del área cañera, los de rendimiento intermedio se agrupan alrededor de los anteriores localizándose preponderantemente al este del río Salí y al sur del río Gastona, en tanto que los de bajo rendimiento mayoritariamente se focalizan en la región central y sur.

1.4.3 – Validación de los resultados

La clasificación se validó confrontando sus resultados con información levantada en predios de control no utilizados en la obtención de firmas espectrales y la generada por un ulterior reconocimiento hecho sobre superficies no controladas que ofrecían dudas respecto de su categorización.

Ambos procedimientos implicaron disponer de la realidad de campo sobre 15.500 ha de cultivo, 11.500 ha pertenecientes a campos de control y aproximadamente 4.000 ha de identificación adicional, lo que importó casi el 8% de la superficie total neta clasificada.

Las verificaciones de validación determinaron, dentro de la superficie total involucrada en el proceso, diferencias respecto a lo asignado del orden del 4%, porcentual que en definitiva se adoptó como error medio general ($\pm 4\%$) para la clasificación resultante.

La mayor parte de las diferencias se focalizaron a nivel de falta de identificación en predios con bajos rendimientos culturales, en los cuales la irregular distribución y desarrollo del cañaveral, en muchos casos acompañado de crecimiento de malezas,

produjo enmascaramiento en las respuestas espectrales y una consecuente ausencia de clasificación.

La disminución de rindes observados en la categoría señalada obedeció fundamentalmente a las particulares condiciones climáticas que imperaron durante el año 1.998, que sobreimpuestas al inadecuado manejo, que usualmente suele observarse en las áreas de cultivo minifundista, potenciaron sus efectos negativos.

Los inusuales volúmenes de precipitación invierno-primaverales de ese año no solo significaron un impedimento en el normal desarrollo de la zafra al demorar el corte, también repercutieron desfavorablemente sobre los suelos por el obligado tránsito de la maquinaria de cosecha en condiciones de alta humedad (compactación); en consecuencia, los lotes cosechados en forma tardía y con limitaciones de manejo, especialmente en lo que se refiere a fertilización, control de malezas y riego, mostraron una condición claramente diferenciada en relación a aquellos que recibieron un tratamiento apropiado. Por otra parte los cañaverales localizados en la Llanura Deprimida, como respuesta al exceso hídrico habido, tuvieron retracciones diferenciales en su crecimiento según la mayor o menor anegabilidad de los lotes implantados.

Finalmente es de señalar que la clasificación inicial, esto es previa su validación, no requirió de ajustes posteriores en razón del bajo error porcentual de fallos verificados. La circunstancia de coincidir en su gran mayoría dichos fallos con predios de bajo rendimiento y reducida expresión areal y la posibilidad que, al forzar la clasificación con valores espectrales influenciados por las condiciones de fondo imperante para dichas situaciones se categorizaran áreas incultas o pertenecientes a otros cultivos hacía innecesario tal ajuste.

2 - CULTIVO: CITRUS

2.1– Aspectos generales del cultivo

La actividad citrícola en Argentina se encuentra entre los principales soportes de numerosas economías regionales, tal es el caso de Entre Ríos, Corrientes, Salta, Jujuy y Tucumán, siendo su incidencia marginal en la de Misiones .

En Tucumán la citricultura es sinónimo de limón ya que si bien se cultivan naranjas, pomelos y mandarinas, estos cultivos han decrecido en los últimos años su participación porcentual al ser desplazados por dicha especie. Según estadísticas de la Secretaría de Agricultura y Ganadería de la Provincia la producción citrícola se reparte de la siguiente manera: limones 88%, naranjas 9%, pomelos 2% y mandarinas 1% . En la actualidad Argentina es el primer exportador de limones a nivel mundial siendo Tucumán la provincia de mayor producción (76% del total nacional) y la que más exporta.

El cultivo del limón y su correspondiente industria es el segundo subsector agroindustrial en importancia en la provincia después de la caña de azúcar, pero con un ritmo de crecimiento muy superior a esta. Desde su inicio a fines de la década del '60, la producción de limón, a diferencia de otros cítricos, se relaciona con su aprovechamiento industrial; Tucumán cuenta con un complejo integrado por 7 fábricas orientadas a la elaboración de aceites esenciales, jugos de limón concentrados y cáscara deshidratada, al que hay que sumar las plantas de empaque, que seleccionan y embalan la fruta que se destina a la comercialización en fresco. En los últimos años el sector se vio beneficiado por el proceso de reconversión de la producción primaria con inversiones canalizadas a la incorporación de nuevas tierras al cultivo y mejoramiento tecnológico en el manejo de las plantaciones, lo cual ha acentuado el liderazgo de aquellos productores más avanzados en materia de rendimientos agrícolas y calidad de fruta fresca.

Los cítricos se distribuyen en la provincia a lo largo de una delgada faja que se extiende desde Burruyacú, en el extremo noreste, hasta La Cocha en el sur. Esta zona es coincidente en su mayor parte con la agrológica de Pedemonte y se caracteriza por ser un área de transición térmica y pluvial. Los valores térmicos medios y extremos, la escasa incidencia de heladas y la disponibilidad de precipitaciones, de entre 800 a 1200 mm/año, definen su aptitud para el cultivo del limonero.

Los límites de la zona citrícola están fijados principalmente por las temperaturas, cuya distribución está definida por la topografía, que actúa como patrón dominante muy homogéneo, dado que las isotermas se distribuyen con un trazado más o menos paralelo al de las curvas de nivel. La temperatura máxima media anual en ella es de 25-26°C, uno a dos grados inferior a la registrada para la llanura, como efecto de la atenuación que sobre ella ejecuta la altura (superior a los 400 m.s.n.m.) y las pendientes.

El límite occidental próximo al faldeo de la sierra está delimitado por el inicio del pedemonte disectado, aproximadamente a partir del cual en altitud se desarrolla la selva subtropical, cuyo desmonte se encuentra regulado por ley. El límite oriental, desde la ciudad de La Cocha hasta San Miguel de Tucumán queda fijado aproximadamente por el trazado de la ruta nacional N° 38 y desde San Miguel de Tucumán hacia el norte por la ruta provincial N° 304; al este de las mismas las condiciones edáficas y climáticas limitan el cultivo de estos frutales.

El término "cítricos" o "agrios" comprende las especies de importancia económica del género *Citrus* y de los géneros *Poncirus* y *Fortunella* y se aplica tanto a los árboles como a sus frutos. La planta cítrica comercial se compone de un tronco integrado por una porción que deriva del portainjerto o pie que soporta el sistema radical y otra que deriva del injerto, ésta última que da origen a las ramas, hojas, flores y frutos; da lugar a arbustos o árboles de follaje persistente y denso de color verde oscuro, cuya altura puede oscilar entre los 3 y 7 m en estado adulto. Comercialmente se considera que una plantación entra en producción a los 4 años de implantada, y su vida útil es de 25 a 30 años.

2.2. – Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital

En el caso particular de los cítricos, por ser cultivos perennes, la identificación de valores radiométricos significativos que permitan la discriminación del cultivo de su entorno no se correlacionó solamente con sus estadios fenológicos, sino también con la edad de las plantas, el tipo de manejo y las condiciones generales de la vegetación circundante ya que son éstos los factores que generaron principalmente variaciones de importancia en las firmas espectrales.

A continuación se detallan etapas del ciclo evolutivo y manejo que influyeron en la selección y obtención de las firmas espectrales.

Los cítricos se propagan en almácigos, luego son llevados a viveros donde se realiza el injerto y finalmente son transplantados a campo. Al momento del trasplante los plantines se podan (descopan) a unos 60 cm de altura, implantándose los mismos a distancias variables lo cual depende del manejo de la finca, situación que se ve reflejada en la siguiente foto.



Finca El Nogal (Depto. La Cocha), coordenada aproximada 3.533.810 / 6.935.920

Por el tipo de relieve en donde se encuentran predominan las plantaciones sistematizadas en curvas de nivel, separadas entre sí a una distancia de 7 a 10 m, con una distancia entre plantas de 2.5 a 6 m. Hasta los 2 primeros años de la plantación el reducido tamaño de las plantas y la espaciada disposición en el terreno, determinan que la firma espectral obtenida responda al fondo y no a las plantas cítricas, situación que puede apreciarse en la foto subsiguiente. La firma espectral de este fondo es similar a las banquinas de caminos, riberas de ríos y áreas urbanas residenciales lo que origina una confusión de firmas espectrales que dificultan una adecuada discriminación.



Finca San Pablo (Depto. Lules), coordenadas aprox. 3.567.250 / 7.029.970

Esta dificultad para identificar plantaciones menores a los 2 años no reviste mayor importancia desde el punto de vista comercial si se tiene en cuenta que las plantaciones cítricas entran en producción a partir del cuarto año.

Entre el tercer y cuarto año, aproximadamente, estas situaciones de confusión tienden a desaparecer, presentándose la plantación más uniforme y con copas de mayor tamaño que definen una firma espectral propia; obsérvese en la foto subsiguiente la altura y el diámetro de copa alcanzados.



Finca Victoria (Los Cochamolles, Depto. Chicligasta), coordenadas aprox. 3.533.820 / 6.986.990

A partir de esta edad comienza a tener relevancia en la respuesta espectral del cultivo el manejo que se haga del mismo. La poda, tanto lateral como de techo, la fertilización; el riego, densidad de plantas por hectárea y el control de malezas son factores que influyen sobre las respuestas espectrales. Ejemplos de los diferentes aspectos que presentan las plantaciones se observan en las siguientes fotos.



Finca Campo Solco (Depto. Chichigasta), coordenadas aprox. 3.523.580 / 9.983.560
Plantación de 10 años en curvas de nivel, distancia de plantación 6x8 m, poda lateral y de techo



Finca al oeste de Tafi Viejo (Depto. Tafi Viejo), coordenadas aprox. 3.571.330 / 7.042.190
Plantación de mas de 20 años, no sistematizada, distancia de plantación 4x8 m, sin poda.

2.3 – Proceso de clasificación

2.3.1 – Selección de imágenes

Se debe destacar que en el caso de los cítricos, por la condición perenne de los mismos, en la selección de imágenes prácticamente no existen limitantes fenológicas, sino más bien, las limitaciones están dadas por las condiciones del entorno, que en menor o mayor medida dificulta la discriminación del cultivo. Esta condición se evidenció en el desarrollo del presente proyecto.

Para el cálculo de la superficie ocupada con citrus durante el año 1.998 se hizo una primera experiencia utilizando imágenes adquiridas en el mes de octubre de 1.997; cabe recordar las especiales condiciones meteorológicas que hubieron durante esa campaña, lo que significó que sea la única imagen completa de la provincia en condiciones de ser clasificada parcialmente, ya que la misma presentaba una fuerte cobertura nubosa en el extremo sudoeste de la misma.

Si bien esta clasificación fue parcial, solo se calculó la superficie ocupada con plantaciones de citrus en producción ubicadas al norte del río Gastona (figura N° 12 del Anexo), sirvió de gran experiencia para la clasificación definitiva.

Durante los años 1998 y 1999 fue posible la obtención de imágenes de la totalidad de la provincia en los meses setiembre-octubre, diciembre, febrero y abril-mayo; a partir del análisis de las mismas se determinó que la imagen de abril-mayo era la optima para realizar el trabajo. Este cambio de fecha de imagen obedeció a las distintas condiciones que presentaban los cultivos circundantes en las imágenes de octubre de 1997 y setiembre-octubre de 1998; en el primer caso prácticamente todo el cañaveral circundante ya había sido cosechado y no se presentaba ningún otro cultivo relevante; al contrario en el segundo caso el retraso en la zafra y una campaña triguera de gran envergadura, ambas como consecuencia de las elevadas precipitaciones invierno-primaverales, dificultaban una precisa discriminación de las plantaciones de citrus.

Las imágenes utilizadas para la clasificación del área citrícola fueron:

Orbital	Centro de imagen	Fecha de adquisición
230	78	17/04/99
230	79	17/04/99
231	78	10/05/99
231	79	10/05/99

2.3.2 – Obtención y selección de firmas espectrales

Para la selección de las firmas espectrales se dispuso de 157 campos de control distribuidos en el área citrícola (Anexo: planillas de citrus), con información de los mismos discriminada a nivel de:

Area: región agrológica en la que se encuentra;

Ruta: ruta o camino de acceso a la finca;

Departamento: en la que se ubica la propiedad;

Empresa: nombre de la empresa o propietario del campo;

Localidad: en la que se ubica la propiedad;

Finca: nombre del establecimiento;

Lote: nomenclatura de identificación de lotes citrícolas;

Especie: nombre de la especie cultivada en el campo de control;

Copa: nombre de la especie que forma la copa (parte superior de la planta);

Pie: nombre de la especie del portainjerto (parte inferior de la planta);

Año de plantación: año en el que se realizó el trasplante en la plantación definitiva;

Distancia de plantación: distancia entre plantas y entre líneas de plantación;

Manejo: prácticas culturales realizadas al cultivo;

Riego: si el campo tiene riego artificial o no;

Fertilización: si el campo fue fertilizado o no;

Observaciones: otra información de relevancia;

Latitud: coordenada geográfica en grados;

Longitud: coordenada geográfica en grados;

X: coordenada plana en metros;

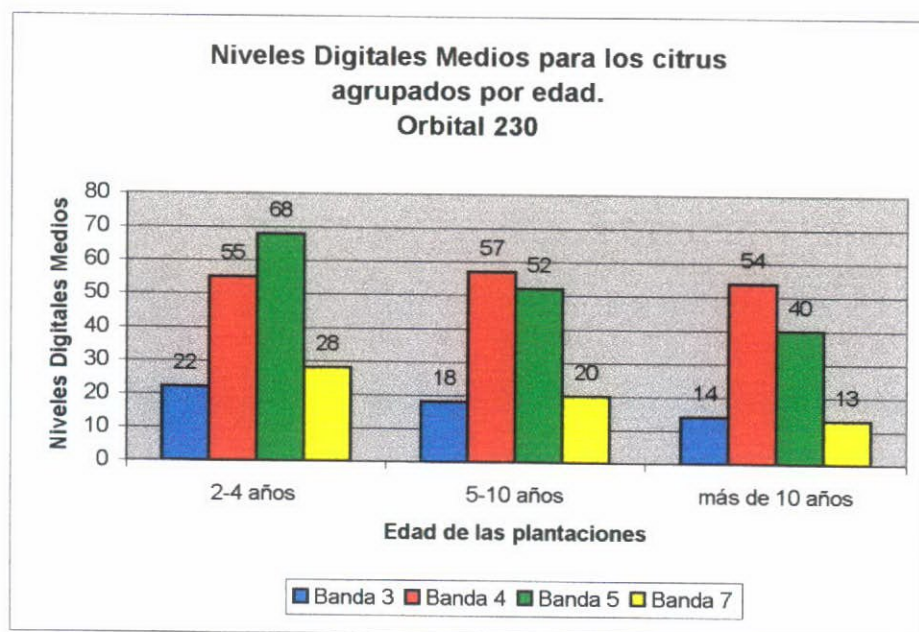
Y: coordenada plana en metros.

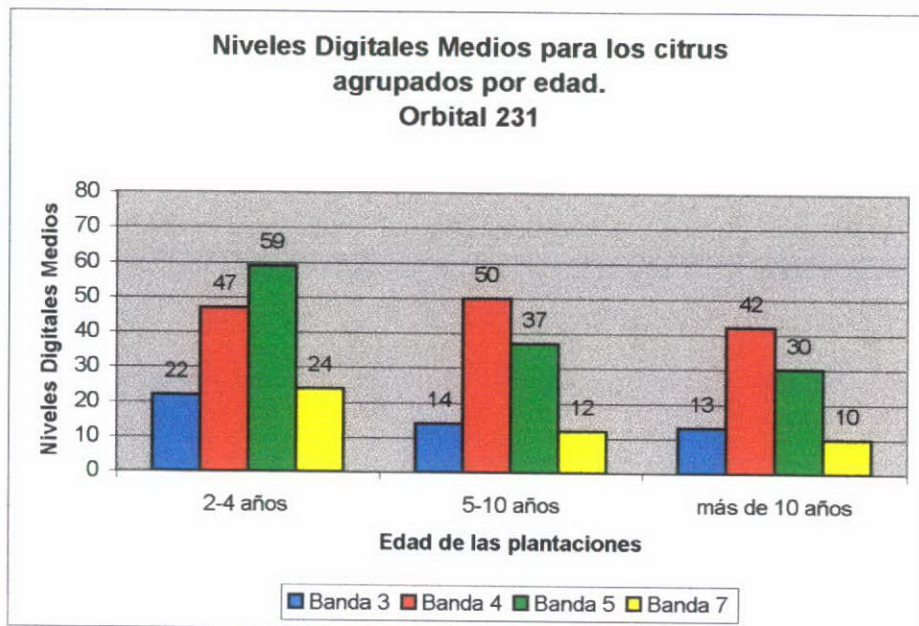
La información relativa a los campos de control se encuentra referenciada dentro de las distintas fincas mediante planos y/o croquis.

En el proceso de obtención de las firmas espectrales fue de gran utilidad la experiencia realizada con la imagen de octubre de 1997. Se siguieron los pasos descritos en la metodología general (paginas 8 a 11 del informe), poniendo énfasis en la selección de firmas de lotes de diferentes edades, en especial en los transplantados a campo en los últimos 4 años.

Se realizaron varias pruebas para seleccionar las firmas definitivas; durante este proceso se limitó la clasificación a plantaciones de citrus de más de dos años, esto debido, como se explicó anteriormente, al reducido tamaño de las copas que presentan las plantas durante sus dos primeros años, lo que determina una firma espectral confusa ya que refleja más el fondo o piso del cultivo que las plantas de citrus en si.

La obtención y selección de firmas espectrales se realizó independientemente sobre los orbitales 230 y 231 incluyendo en el proceso las bandas 3,4,5 y 7. Los valores estadísticos del conjunto de firmas espectrales figuran en la sección firmas espectrales del Anexo y sus valores medios pueden apreciarse en los siguientes histogramas:





2.3.3 – Clasificación multiespectral

Definidos los juegos de firmas espectrales para el orbital 230 y para el orbital 231 se hizo correr el proceso de clasificación sobre cada uno de ellos, obteniéndose los siguientes resultados.

2.4 – Resultados

2.4.1 – Salida gráfica

El mapa temático resultante de la clasificación digital refleja el área total implantada con citrus de dos y más años en la provincia de Tucumán para el año 1.999 (Anexo: mapa temático N° 2).

La salida gráfica tiene las mismas características que las enumeradas para el mapa de caña de azúcar.

2.4.2 – Cálculo de superficies

De la transformación de los píxeles incluidos en la clasificación a hectáreas resultó que la superficie bruta total ocupada con plantaciones de citrus de dos y más años en la provincia de Tucumán fue de **36.800 ha** para el año 1.999.

2.4.3 – Validación de los resultados

Siguiendo la metodología general descrita se contrastaron los resultados obtenidos en la clasificación con la información de los campos de control no utilizados para extraer las firmas espectrales definitivas, que en conjunto suman 3.900 ha, aproximadamente el 11% de la superficie bruta total calculada. Con posterioridad se visitaron campos no incluidos entre los campos de control y que resultaron clasificados en el proceso, un total de 520 ha.

Como resultado del proceso de verificación de la clasificación se estimó un error de $\pm 3\%$. Este error se origina en la confusión creada al intentar clasificar campos de citrus con menos de 3 años de edad. Con antelación se mencionaron los problemas que implicaban los campos de reciente implantación. Esto motivó que algunos campos de 2 años de implantados no se clasifiquen y en menor medida que campos sin plantaciones de citrus se clasifiquen como tales, esto último sucedió con campos ocupados con soja en el noroeste de la provincia.

3 - CULTIVO: SOJA

3.1 - Aspectos generales del cultivo

En la provincia de Tucumán la región agrológica de la Llanura Chacopampeana es el área donde se desarrolló el cultivo de granos como actividad principal, ocupando el cultivo de la soja el primer lugar en importancia. Esta zona tiene un régimen de lluvias de tipo monzónico, con una concentración del 80 a 85% de las precipitaciones en la estación húmeda, de noviembre a abril, con valores anuales promedio que oscilan entre 600 y 750 mm.

La soja es una planta anual cultivada comercialmente por su contenido de aceite y proteínas, los cuales se encuentran contenidos en la semilla. Si bien existen diferencias morfológicas, la soja es en general una planta que alcanza una altura de 90 a 120 cm, cuyas dos primeras hojas son simples y opuestas, y todas las demás alternas y trifoliadas, siendo posible el desarrollo de ramas a partir de yemas situadas en las axilas de las hojas inferiores. Las flores se desarrollan a partir de todas las axilas foliares, produciéndose de 0 a 5 chauchas (vainas) por nudo, las cuales a su vez tienen de 1 a 5 semillas cada una. Las plantas pueden ser determinadas o indeterminadas en lo que a floración y hábito de desarrollo se refiere.

En la provincia de Tucumán el cultivo de la soja se concentra en dos zonas bien definidas, la primera de ellas, con mejores características agrológicas, comprende la franja central de los departamentos de Burruyacú, Cruz Alta y norte de Leales; y franja norte y centro del departamento de La Cocha. La segunda que abarca la franja oriental de los departamentos Burruyacú, Cruz Alta, Leales, La Cocha y parte del departamento Graneros, presenta precipitaciones inferiores a los 600 mm anuales considerándose una zona marginal.

El inicio de la siembra de soja está en función del agua acumulada en el perfil del suelo, por lo general comienza a mediados de noviembre, cuando ya se produjeron precipitaciones importantes que permitieron la acumulación de un buen contenido de humedad, y se generaliza en el mes de diciembre; solo un pequeño porcentaje se siembra hasta mediados del mes de enero, lo que está supeditado a las sequías estacionales durante la época óptima de siembra (diciembre).

Se debe destacar que la duración del ciclo del cultivo depende del grupo de maduración al que pertenece la variedad. En la provincia de Tucumán, las variedades sembradas corresponden a los grupos de maduración V al VIII, con duraciones de ciclo de siembra a cosecha de 120 a 150 días respectivamente. Actualmente, del total de variedades sembradas, el 70% corresponde al grupo VII de maduración.

Con respecto al tipo de labranza, más del 80% de la superficie con soja se siembra bajo el sistema de labranza conservacionista, principalmente siembra directa. Este sistema se caracteriza por el mínimo movimiento del suelo, quedando cubierto con rastrojo al término de la cosecha.

La cosecha se inicia cuando los tallos y las vainas están lo suficientemente secos, lo cual se relaciona con un contenido de humedad del grano del 13 a 14%. La misma se generaliza en el mes de mayo y culmina a fines de junio.

3.2 – Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital

En el procesamiento digital cobran importancia los diferentes estadios del ciclo evolutivo del cultivo, en donde éste presenta características homogéneas que permiten diferenciarlo claramente de su entorno. Esta consideración es válida para todos los cultivos de grano estudiados en el presente proyecto (Anexo: figura N° 10).

Las etapas relevantes del ciclo evolutivo del cultivo de la soja a los fines de la clasificación digital se indican en los párrafos subsiguientes.

Antes del inicio de la siembra el campo se encuentra cubierto de malezas o de rastrojo, en caso de haberse realizado un cultivo invernal. Previo a la siembra propiamente dicha, al campo enmalezado se le aplican productos químicos (herbicidas) para lograr el “quemado” de las malezas, lo cual da al lote el aspecto de una plantación seca con diversos tonos de marrón, según sea la maleza predominante. El lote mantiene este aspecto alrededor de 20 días posteriores a la siembra, momento en el cual las plantas de soja tienen una altura aproximada de 10 cm, situación que se muestra en la siguiente foto:



Finca La Casualidad (Depto. Leales), coordenadas aprox. 3.614.300 / 6.996.870
Campo con soja en siembra directa, aproximadamente a 20 días de la siembra.

A los 40 a 45 días de la siembra, que coincide con el período comprendido entre mediados de enero y mediados de febrero, según la fecha de siembra, el lote adquiere una coloración verde intensa (foto subsiguiente) ya que las plantas de soja cubren totalmente el espacio entre las líneas de siembra. Esta tonalidad se mantiene, aproximadamente, hasta los 110 días del ciclo (segunda quincena de marzo), período durante el cual se produce la floración, cuaje y llenado de vainas lo que no altera la fisonomía general del cultivo.



Finca Los Morros (Depto. Burruyacú), coordenadas aprox. 3.629.030 / 7.074.670

Campo de soja en la etapa de "cierre" del cultivo

A partir de esta fecha las hojas comienzan un proceso de "amarillamiento", generalizándose con el tiempo este color y produciéndose luego la necrosis y caída de las hojas. Las plantas secas, sin hojas, se muestran de color marrón-grisáceo, el cual difiere según la variedad. Es en este momento que la soja está lista para ser cosechada. Las situaciones descritas se aprecian en las siguientes fotos:



Finca La Cruz (Depto. Burruyacú), coordenadas aprox. 3.617.250 / 7.055.430

Soja en proceso de amarillamiento.



Finca La Cruz (Depto. Burruyacú), coordenadas aprox. 3.617.230 / 7.055.420
Soja lista para cosecha, las tonalidades se deben a las distintas variedades del cultivo.

3.3 - Proceso de clasificación

3.3.1 – Selección de imágenes

Para realizar la clasificación digital del cultivo de soja se dispuso de imágenes que correspondían a dos de los estadios antes descritos, el primero en donde el campo se muestra totalmente verde y el segundo cuando la soja ya está en los estadios finales de su ciclo. Al observar ambas imágenes se apreció que en la imagen de febrero la soja presentaba un color más uniforme y un muy buen contraste con su entorno, en cambio en la imagen de abril-mayo los cultivos de soja presentaban colores variados confundiéndose con campos de otros cultivos.

Por lo antes expuesto se utilizaron las siguientes imágenes:

Orbital	Centro de imagen	Fecha de adquisición
231	78	19/02/99
231	79	19/02/99
230	78	28/02/99
230	79	28/02/99

3.3.2 – Obtención y selección de firmas espectrales

Se dispusieron de 206 campos de control para la selección de las firmas espectrales (Anexo: planilla de granos), con información de los mismos discriminada a nivel de:

Area: región agrológica en la que se encuentra;

Ruta: ruta o camino de acceso a la finca;

Empresa: nombre de la empresa o propietario del campo;

Departamento: en la que se ubica la propiedad;

Localidad: en la que se ubica la propiedad;

Sección - Lote: nomenclatura de identificación de los lotes ;

Superficie: área del campo de control expresada en hectáreas ;

Especie: nombre de la especie cultivada en el campo de control;

Variedad: nombre de la variedad cultivada en el campo de control;

Fecha de siembra: fecha en que el lote fue sembrado;

Observaciones: otra información de relevancia;

Manejo: sistema de labranza;

Latitud: coordenada geográfica en grados;

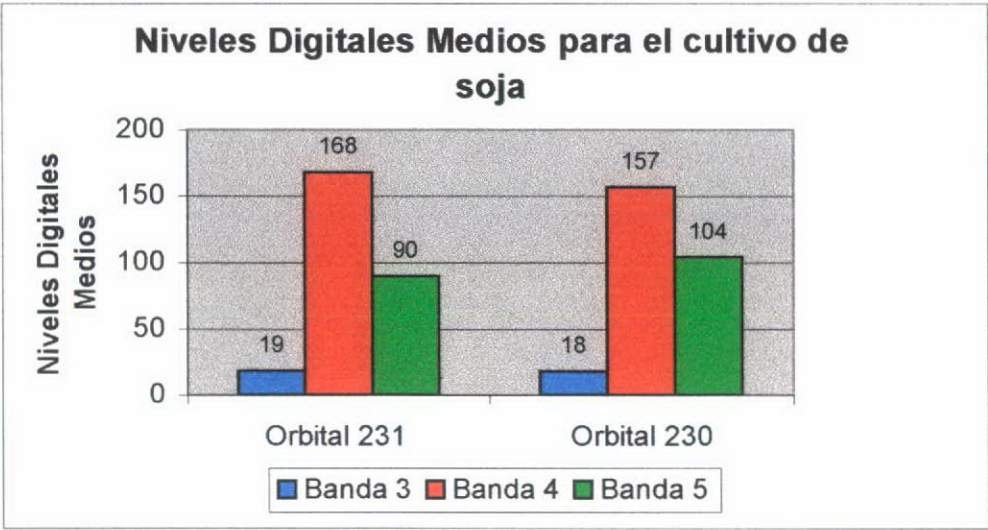
Longitud: coordenada geográfica en grados;

X: coordenada plana en metros;

Y: coordenada plana en metros.

Se hace la observación que la planilla descripta es común a los cultivos de poroto y maíz; la información incluida en ella se encuentra representada en planos y/o croquis de las fincas.

Para la obtención y selección de firmas espectrales se procedió de acuerdo a la metodología general, incluyendo en el proceso las bandas 3,4, y 5. En el caso particular del cultivo que nos ocupa las firmas espectrales (Anexo: firmas espectrales de soja) debieron ser representativas de las distintas variedades y fechas de siembra que se presentaron. Las diferencias de niveles digitales habidas entre orbitales pueden apreciarse en el siguiente histograma.



3.3.3 – Clasificación multiespectral

Siguiendo la metodología general descrita se obtuvieron los siguientes resultados.

3.4 - Resultados

3.4.1 – Salida gráfica



El mapa temático resultante de la clasificación digital muestra el área ocupada con cultivos de soja en la campaña 1.998/1.999 (Anexo: mapa temático N° 3).

Las características cartográficas de la salida gráfica son las mismas que las del mapa temático de caña de azúcar.

3.4.2 – Cálculo de superficies

Realizada la conversión de los píxeles a valores areales, la clasificación digital arrojó una superficie bruta total ocupada con cultivos de soja para la campaña 1.998/1.999 de 160.000 ha.

3.4.3 – Validación de los resultados

Los campos de control no utilizados en la extracción de firmas espectrales definitivas sumaron 16.300 ha, prácticamente un 10% de la superficie bruta total calculada; los campos verificados, no incluidos entre los campos de control, totalizaron aproximadamente 4.100 ha.

El error calculado sobre la base de la validación fue de $\pm 5\%$. Este error estuvo dado por la existencia de campos de soja enmalezados y campos que fueron sembrados muy tardíamente los cuales no se clasificaron en su totalidad; por otra parte quedaron incluidos en la clasificación algunos lotes de poroto sembrados con mucha antelación, esto último en muy escasa proporción.

4 - CULTIVO: POROTO

4.1– Aspectos generales del cultivo

El poroto es una planta anual de porte herbáceo, que se cultiva comercialmente por su semilla, la cual se destina al consumo humano.

Argentina es el segundo productor de poroto dentro del Mercosur, encontrándose el 95% de la producción centralizada en el N.O.A., especialmente en las provincias de Salta, Tucumán y oeste de Santiago del Estero.

Si bien la superficie sembrada en la provincia de Tucumán presenta variaciones anuales importantes debido a factores climáticos, se diferencian tres zonas productoras: al noroeste del departamento de Trancas (zona productora de semilla); al este de los departamentos de Burruyacú, Cruz Alta y Leales y al sur de la provincia, en los departamentos de Graneros y La Cocha.

La planta de poroto presenta un tallo cuya altura es variable y depende del hábito de crecimiento, el cual puede ser desde erecto con pocas ramificaciones hasta postrado con abundantes ramificaciones. Las dos primeras hojas son simples y opuestas y todas las demás alternas y trifoliadas. Las flores, que se desarrollan a partir de las axilas de las hojas y en el caso de variedades determinadas, también en el brote apical, originan las vainas que contienen las semillas de colores variables.

El ciclo del cultivo oscila entre 90 y 110 días desde la siembra hasta la cosecha según la variedad. La época de siembra está condicionada por el régimen hídrico y la ocurrencia de heladas tempranas o tardías ya que el poroto es un cultivo sensible a estas últimas. La siembra más importante, por la superficie involucrada, se realiza en la zona de la llanura desde mediados de enero a fines de febrero. En la cuenca de Tapia-Trancas se producen dos siembras al año, una en primavera (setiembre) limitándose a los campos que disponen de riego y destinada principalmente a la producción de semillas; y otra en verano más importante en cuanto a superficie, ya que abarca campos en secano. Esta última siembra se inicia en los primeros días de enero y culmina en la primera quincena de febrero.

A diferencia de la soja sólo un 30% del poroto es producido en siembra directa, el resto se cultiva bajo el sistema de labranza convencional, sistema que recurre a la roturación de suelos para lograr el control mecánico de las malezas.

La cosecha depende de las condiciones climáticas y se produce desde mediados de mayo a fines de julio.

4.2 – Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital

En el desarrollo del cultivo del poroto de verano se destacan los siguientes estadios para el proceso de clasificación digital (Anexo: figura N° 10).

A raíz del movimiento de suelo, durante la preparación de la cama de siembra y siembra propiamente dicha, en el campo predomina el color marrón típico de los suelos, manteniéndose así de 25 a 30 días después de la siembra.

El “*cierre*” del cultivo (cobertura completa del terreno por el cultivo), ocurre en la segunda quincena de marzo, alrededor de los 50-55 días de iniciado el ciclo. En este momento el campo se presenta de color verde que se mantiene incluso durante los estadios de floración, cuaje y llenado de granos (foto subsiguiente).



Finca Javicho (Depto. Cruz Alta), coordenadas aprox. 3.631.200 / 7.014.900

Campo de poroto en proceso de “cierre” del cultivo.

A los 90-100 días de la siembra, según la variedad, el cultivo alcanza la madurez fisiológica. Se inicia entonces el “amarillamiento” de las hojas que culmina con la caída de las mismas. El aspecto de las plantas listas para ser cosechadas es de un color grisáceo que se acentúa a medida que se demora la cosecha.

4.3 - Proceso de clasificación

4.3.1 – Selección de imágenes

En el proceso de la selección de imágenes se tuvo en cuenta la similitud morfológica existente entre la soja y el poroto, lo cual podría provocar interferencias en la clasificación digital de dichas especies. Por esta razón se trató de identificar los periodos en que ambos cultivos se encuentren netamente diferenciados. Estos momentos estarían dados por:

- las distintas fechas de siembra, las cuales determinan que al momento de la siembra del poroto un gran porcentaje de los campos de soja presenten una cobertura casi completa de los suelos;
- el “cierre” del cultivo de poroto (cobertura completa del campo) que se inicia en el momento en que la soja comienza a “amarillear” y
- el desfase entre las cosechas, esto último con ciertas restricciones, ya que al inicio de la cosecha de poroto todavía quedan campos de soja sin cosechar.

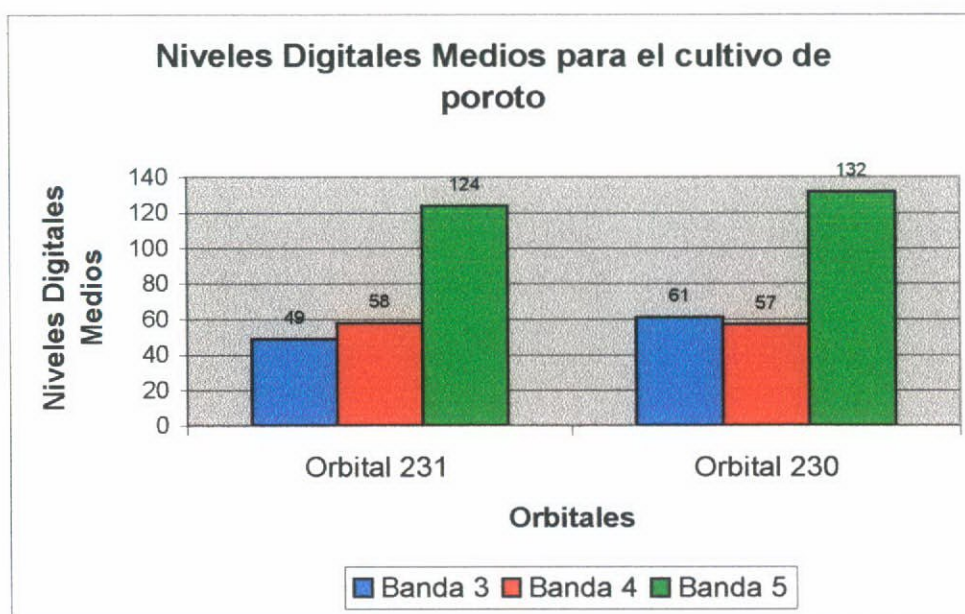
Entre las imágenes disponibles la que mejor marcó las diferencias entre ambos cultivos fue la de febrero. Si bien se clasificaron terrenos recientemente sembrados, estos se diferenciaban netamente de los campos de soja, caña de azúcar y maíz. El detalle de las imágenes utilizadas es el siguiente:

Orbital	Centro de imagen	Fecha de adquisición
231	78	19/02/99
231	79	19/02/99
230	78	28/02/99
230	79	28/02/99

4.3.2 – Obtención y selección de firmas espectrales

Para la selección de las firmas espectrales se dispuso de 37 campos de control con su información desagregada en los mismos ítems que los campos de control de soja (Anexo: planilla de granos).

Durante el desarrollo de la tarea se siguieron los pasos descriptos en la metodología general, utilizándose también las bandas 3, 4 y 5. En la obtención de firmas espectrales el principal criterio de selección fue la fecha de siembra del lote (Anexo: firmas espectrales de poroto). Los valores medios de los niveles digitales obtenidos se grafican a continuación:



4.3.3 – Clasificación multiespectral

Siguiendo la metodología general descripta se obtuvieron los siguientes resultados.

4.4 - Resultados

4.4.1 – Salida gráfica

El mapa temático resultante de la clasificación digital representa el área ocupada con cultivo de poroto para la campaña 1.999 en la provincia de Tucumán (Anexo: mapa temático N° 4).

La salida gráfica tiene las mismas características cartográficas antes mencionadas para el mapa de caña de azúcar.

4.4.2 – Cálculo de superficies

El resultado de la clasificación digital del área ocupada con poroto para la campaña 1.999 fue de **47.600 ha** de superficie bruta total, pudiéndose discriminar claramente dos áreas: el área de la llanura con 40.400 ha y el área de la cuenca Tapia-Trancas con 7.200 ha.

4.4.3 – Validación de los resultados

Los resultados obtenidos de la clasificación digital fueron contrastados con la información obtenida de los campos de control no utilizados para la selección final de las firmas espectrales, que sumaron un total de 3.300 ha, un 7 % de la superficie bruta total calculada. Además se verificaron aproximadamente 900 ha de campos clasificados como poroto, que no estuvieron incluidos entre los campos de control.

Al estimar el error final de la clasificación digital se debió discriminar el mismo para las dos grandes áreas antes mencionadas, el área de la llanura y el área de la cuenca Tapia-Trancas, debido fundamentalmente a las características agrológicas, a las diferencias en cuanto a manejo, tamaño de los campos y diversidad de cultivos presentes en cada una de ellas.

Por otra parte, como se explicó en párrafos anteriores, la selección de firmas espectrales y la clasificación se hicieron sobre campos recientemente sembrados, momento en que todavía el cultivo no cubre la totalidad del mismo. Esto significó que el criterio se basara, prácticamente, en clasificar suelos que por las labores de siembra se encontraban semidesnudos.

En el sector de la llanura este criterio dio resultados confiables, ya que para la época en el área no se realizan labores en otros cultivos que dejen suelos al descubierto, es así que tanto los cultivos de soja, como los de caña de azúcar y maíz, presentaban una mayor cobertura del suelo que se expresaba en niveles digitales (ND) totalmente diferenciados de los ND tomados en los campos de poroto recientemente sembrados.

En la cuenca Tapia-Trancas la confiabilidad del resultado de la clasificación digital fue menor. Las principales causas que originaron esta imprecisión en la clasificación digital estuvieron dadas por la presencia de un importante número de lotes con riego artificial, en los cuales es posible la realización de otros cultivos en esa época del año, confundiendo el laboreo de los mismos con las labores de siembra del poroto y por su condición de cuenca lechera con existencia de pasturas, que cobraban importancia tanto por la superficie ocupada como por la confusión espectral que generaban los campos recientemente pastoreados, los cuales se confundían con suelos semidesnudos. Esto llevó a que en la clasificación definitiva fueran incluidos campos de otros cultivos distintos al poroto.

El error calculado en base a las verificaciones, consecuente con los aspectos negativos enumerados anteriormente, fue para el área de la llanura de $\pm 6\%$, mientras que para la cuenca Tapia-Trancas fue de $+ 20\%$ (el valor positivo se debe a que la superficie resultante se considera sobrestimada).

5 - CULTIVO: MAIZ

5.1– Aspectos generales del cultivo

En la producción de granos, el maíz ocupa el segundo lugar en importancia luego de la soja en la provincia de Tucumán. La difusión a principios de la década del '90 de los híbridos tropicales de alto rendimiento y la necesidad de disminuir los efectos del monocultivo de oleaginosas han reafirmado a ésta especie en los sistemas de producción.

El maíz es una planta anual cuyo tallo es una caña maciza de 1 a 4 m de altura; las hojas, que nacen en cada nudo de la caña, presentan una coloración desde verde amarillenta a verde azulado o violáceo. Cuenta con flores masculinas y femeninas en inflorescencias separadas. Las flores masculinas integran la panoja o inflorescencia terminal del tallo. La inflorescencia femenina del maíz es una espiga cilíndrica muy modificada, conocida comúnmente como mazorca, que se desarrolla en la axila de una hoja inferior o central de la planta. Es frecuente el desarrollo de una sola mazorca pero pueden producirse dos o más si las condiciones son favorables para la planta. La mazorca contiene los granos que son los órganos de importancia económica.

La zona de cultivo se reparte entre los departamentos de Burruyacú, Cruz Alta, Leales, Alberdi y La Cocha; el departamento de Trancas produce con riego suplementario. La mayor producción se realiza en el área de la llanura, en campos de considerable superficie y en condiciones de secano. Cabe destacar que, si bien en el este de la provincia los campos cultivados con maíz son, por lo general de tamaño relevante, los mismos no llegan a conformar grandes áreas homogéneas, sino que se presentan como lotes dispersos rodeados por otros cultivos.

La siembra se realiza entre la segunda quincena de noviembre y el 31 de diciembre, registrándose el mayor porcentaje de siembra en la segunda quincena de diciembre. En el caso de retrasos en la siembra por sequía o exceso de precipitaciones en diciembre, la misma puede prolongarse durante la primera quincena de enero. La cosecha se registra entre mediados de mayo y fines de julio.

5.2 – Estadios del cultivo con significación para el procesamiento digital

En el cultivo del maíz se destacan los siguientes estadios a los fines de la clasificación digital (Anexo: figura N° 10).

Al igual que la soja, más del 80% del maíz se produce en siembra directa, por lo que el aspecto del campo durante los primeros días del ciclo es el de un campo seco (por el tratamiento químico que se practica a las malezas).

A los 40-45 días de la siembra (entre la segunda quincena de enero y primera quincena de febrero), los espacios entre líneas dejan de ser visibles porque las plantas cubren totalmente el terreno, dando al lote un color verde claro que progresivamente toma tonalidades más intensas. Este color verde intenso se mantiene hasta que se produce la floración masculina (aparición de la panoja), que tiene lugar entre los 90 y 100 días del ciclo (durante el mes de marzo); si se realiza una observación “en planta” del lote, se aprecian distintas tonalidades que van desde los castaños claros a castaños oscuros, lo que depende del color de la panoja de la variedad sembrada, manteniéndose este aspecto incluso cuando se produce la aparición de la espiga (flor femenina), el cuaje y llenado de los granos. Aspectos del maizal en dichos estadios se observan en las fotos subsiguientes.



Finca Giordano (Depto. Burruyacú), coordenadas aprox. 3.641.300 / 7.062.370

Maizal en proceso de “cierre” del cultivo.



Finca Pozo Grande (Depto. Burruyacú), coordenadas aprox. 3.633.890 / 7.092.160
 Campo de maíz en floración, obsérvese el color de la panoja enmascarando el verde de las hojas.

El cultivo alcanza la madurez fisiológica alrededor de los 120 días de iniciado el ciclo (mes de abril), momento a partir del cual comienzan las hojas y el tallo a tornarse "amarillentos".

A los 150-160 días, el maizal ya se encuentra seco y está listo para su cosecha, presentando un color pardo amarillento generalizado como se observa en la siguiente foto.



Finca La Cruz (Depto. Burruyacú), coordenadas aprox. 3.617.250 / 7.055.430

5.3 - Proceso de clasificación

Durante la presente campaña no pudieron obtenerse imágenes en las cuales se logre discriminar efectivamente la superficie ocupada con maíz. Los factores que impidieron la clasificación fueron de diversa índole, algunos de ellos ya enunciados en párrafos precedentes.

Por la naturaleza de su ciclo de crecimiento el maíz presentaba, en un mismo momento, distintos aspectos morfológicos, lo que inducía a su confusión con cultivos y vegetación natural aledaña.

En las imágenes disponibles de febrero y abril-mayo, su clasificación presentaba serias limitaciones. En la imagen de febrero se confundía con los cultivos de caña de azúcar ubicados en el área marginal de la misma y con los relictos de bosque chaqueño dispersados en toda el área, como así también con los humedales presentes en la llanura.

En la imagen de abril-mayo el problema estuvo dado por la variedad de estados evolutivos que presentaban los maizales, algunos campos todavía verdes mientras que en otros campos los maizales estaban totalmente secos, listos para cosecha. Esta variedad de situaciones provocaba que la clasificación se viera comprometida por la similitud que el maizal presentaba fundamentalmente con los campos de soja y de poroto. Para la fecha la soja estaba en el final de su ciclo y en algunos casos ya cosechada, mientras que los lotes de poroto sembrados tempranamente ya comenzaban a "amarillear".

Las dificultades antes expuestas causaban en la clasificación del cultivo de maíz un elevado margen de error que se consideraba no aceptable a los fines del presente trabajo, es por esto que se hace necesario un estudio más profundo que abarque el análisis de imágenes de fechas similares con condiciones ambientales distintas y de fechas intermedias a las analizadas en el actual estudio a los fines de avanzar en la técnica.

6 - CULTIVO: TRIGO BAJO RIEGO CON SISTEMA DE PIVOTE CENTRAL

6.1– Aspectos generales del cultivo

El trigo, en la provincia de Tucumán, es uno de los granos tradicionales, sin embargo su cultivo comenzó a incrementarse a partir de la década del '70. La consolidación del mismo se debió a su bajo costo de producción, a las escasas alternativas invernales y a la posibilidad de un ingreso que ayude a solventar los costos del cultivo de verano.

El trigo es una planta anual cuyo tallo es erecto, cilíndrico y hueco con 5 a 7 nudos, presentando formación de macollos que son ramificaciones que se producen en la base y dan lugar a tallos que se desarrollan paralelamente al principal. Las hojas presentan 2 partes bien diferenciadas, la vaina, que es la sección que se inserta en el nudo y que envuelve al tallo y la lámina, de forma linear o linear lanceolada.

La inflorescencia del trigo es una espiga con espiguillas sésiles. Mide generalmente de 7 a 10 cm y lleva en promedio de 15 a 20 espiguillas. Las flores son completas y se disponen en número de 1 a 2 en cada espiguilla. El grano o cariopse contiene células de almidón de las que se obtiene el gluten, que es una sustancia cohesiva que proporciona a la harina su capacidad para mantenerse unida y permitir el estiramiento de la masa.

En la mayoría de los casos el trigo sucede a la soja y la época de siembra varía desde comienzos de mayo a fines de junio dependiendo de las condiciones de humedad de los suelos y de la cosecha del cultivo de verano. La cosecha de trigo se realiza desde mediados de setiembre a mediados de noviembre.

Con respecto a su ubicación, la mayor superficie se reparte en las regiones agrológicas del Pedemonte y la Llanura Chacopampeana en los departamentos Burruyacú, Cruz Alta, La Cocha y Alberdi; restringiéndose el trigo con riego en pivote central a la Llanura Chacopampeana. En esta región el período invierno-primaveral se caracteriza por la escasez de precipitaciones, siendo normal que después de sembrado el trigo, no reciba más de 50 mm de lluvia en todo su ciclo.

6.2 - Pivotes centrales

La continua incorporación de tecnología es la base del aumento de los niveles de productividad y calidad, parámetros que permiten el incremento de la competitividad de las empresas agropecuarias. Todos los desarrollos tecnológicos se ven potenciados con la práctica del riego, de allí la importancia y alto nivel de difusión de esta tecnología.

Entre los sistemas de riego adoptados, el de pivote central es uno de los de mayor difusión. Estos forman parte de los sistemas de riego por aspersión, por lo cual proveen agua al suelo intentando emular la lluvia natural. Se trata de equipos automáticos, programables, que giran alrededor de un punto central, dando como resultado una superficie regada de forma circular.

En detalle, el equipo de pivote central consiste de un punto piramidal, donde se encuentra el panel de control programable y la toma de agua desde la fuente de provisión. A este punto central se une un número variable de tramos de estructuras de acero que sostienen las tuberías de conducción. El agua se aplica a través de aspersores o rociadores instalados en la tubería. Cada tramo suele medir 50-54 m, es sostenido por torres, y los tramos son unidos por bridas abulonadas, se suele instalar un tramo final voladizo, de 29.7 m de largo con un cañón en su extremo. El riego se realiza con el equipo instalado con una posición pivotal y el avance se realiza produciendo la alineación entre torres, mediante motores eléctricos ubicados en cada una de ellas, es decir que la estructura y la tubería giran alrededor del pivote (en avance o retroceso).

En la provincia de Tucumán, por lo general, los cultivos que se desarrollan bajo riego son los mismos que en secano (trigo, soja, maíz, poroto), con algunos cambios en la tecnología de manejo. En todos los casos la fuente de agua para estos equipos de riego son las perforaciones, en la mayoría se extraen por bombeo caudales de 250.000 a más de 400.000 litros por hora. Estas perforaciones son profundas (80 a 180 m), encamisadas con tuberías metálicas y normalmente el nivel dinámico está entre 20 y 40 m. Los equipos de riego tienen dimensiones que varían entre 450 y 780 m de largo, siendo en todos los casos transportables entre dos y cuatro posiciones, por lo que cada pozo con un equipo de riego, se utiliza sobre una superficie de 200 a 600 ha aproximadamente.

6.3 – Proceso de clasificación

6.3.1 – Selección de imágenes

Las imágenes disponibles para realizar la identificación de los campos de trigo irrigados mediante equipos de pivote central fueron:

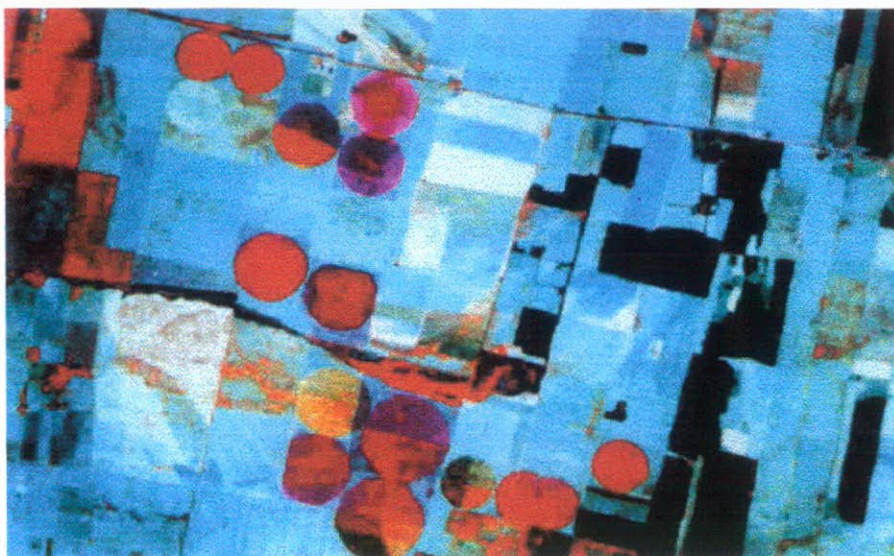
Orbital	Centro de imagen	Fecha de adquisición
231	78	12/09/98
231	79	12/09/98
230	78	07/10/98
230	79	07/10/98

Para la visualización de las imágenes en pantalla se utilizó la combinación de bandas 4-5-3.

6.3.2 – Identificación de las áreas irrigadas con pivote central

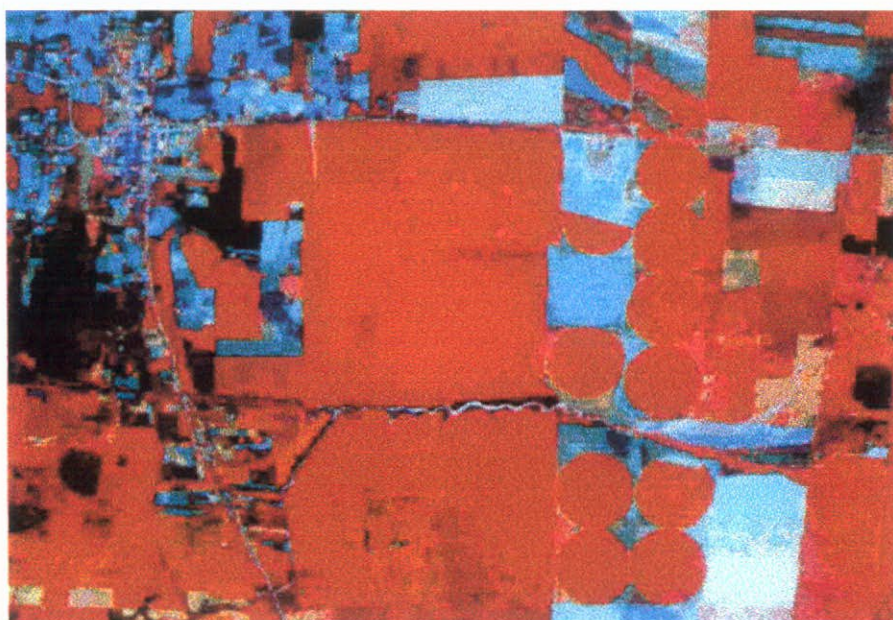
La metodología utilizada para este fin difiere de la aplicada en los cultivos anteriores, en este caso se realizó un análisis visual (analógico) para la interpretación de las imágenes. Este criterio permitió incorporar al análisis elementos como color, textura, forma, estructura y emplazamiento o disposición. Por la naturaleza del objeto de estudio esta metodología resultó idónea.

La identificación de los campos de trigo con riego de pivote central en las imágenes se basó en la inconfundible forma circular que adquieren los campos regados, esta apariencia distintiva permite su discriminación de los lotes rectangulares o irregulares de su entorno; además su coloración contrasta con la de los campos circundantes, hecho que se acentúa en los años en que no se cultiva trigo en seco como puede apreciarse en la siguiente foto .



Finca Las Marías (Depto. La Cocha) octubre de 1.997, coordenadas aprox. 3.548.160 / 6.927.930

El análisis visual se desarrolló en dos etapas, en la primera se procedió a la identificación y ubicación de los trigales bajo riego sobre imágenes que recibieron el mismo tratamiento de corrección y ajuste que las utilizadas en los cultivos anteriores. Este se realizó tanto en el monitor de la computadora como sobre copias fotográficas, una copia de las mismas se adjunta a continuación.



Finca Las Marías (Depto. La Cocha) octubre de 1.998, coordenadas aprox. 3.548.160 / 6.927.930

Obsérvese las diferencias con la foto anterior, en este caso se cultivó trigo en secano.

En una segunda etapa, utilizando las herramientas de medición del software, se mensuraron los círculos identificados con el fin de calcular su superficie.

6.4 - Resultados

6.4.1 – Salida gráfica

El mapa temático resultante de la clasificación analógica muestra los campos sembrados con trigo bajo riego con sistema de pivote central en la campaña 1.998 (Anexo: mapa temático N° 5).

La salida gráfica mantiene las características cartográficas antes mencionadas para el mapa de caña de azúcar.

6.4.2 – Cálculo de superficies

Los resultados del cálculo de las superficies de los campos cultivados con trigo bajo riego con sistema de pivote central para el año 1998, discriminados por departamentos, se exponen en la siguiente tabla:

Departamento	Superficie (ha)
Burruyacú	410
Cruz Alta	415
Leales	115
Graneros	425
La cocha	1560
Total de la provincia de Tucumán	2925 ha

6.4.3 – Validación de los resultados

La clasificación de las áreas trigueras bajo riego por sistema de pivote central para el año 1.998 se realizó durante el primer semestre del año 1.999. En consecuencia, la validación

debió hacerse con los datos aportados por los productores, sin que pudiera realizarse una verificación a campo del cultivo por parte de los técnicos en el momento de toma de la imagen.

Se dispuso de la información de 14 círculos (áreas regadas con sistema de pivote central), que totalizaban aproximadamente 1.370 ha, confrontando esta información con los resultados obtenidos se determinó que no había error en la identificación del cultivo; con respecto al cálculo de la superficie se infiere un error de $\pm 3\%$, debido principalmente a imprecisiones en la medición y a las restricciones dadas por la resolución espacial de las imágenes.

7 - CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La metodología adoptada (clasificación multiespectral supervisada) se mostró efectiva y confiable en función de los bajos índices de error alcanzados; una vista general de la clasificación de los cultivos involucrados se aprecia en el mapa temático resumen que se adjunta en el Anexo (mapa temático N° 6).
- La diferenciación de especies cultivadas entre sí y de éstas con la vegetación natural estuvo directamente relacionada con las distintas etapas del ciclo evolutivo de los cultivos estudiados. En el caso particular de los citrus, por su condición de perennes, la fenología de los mismos, como condicionante para su discriminación, perdió preponderancia ante las condiciones generales del entorno, lo que quedó manifestado en la variación temporal de las imágenes utilizadas en su clasificación: para el año 1.997 fue óptima una imagen de octubre, mientras que para la clasificación de 1.999 resultó más adecuada la imagen del mes de mayo.
- En los cultivos de caña de azúcar y soja la clasificación se realizó en el momento en que los mismos presentaban una cobertura vegetal homogénea, verde y abundante, por lo tanto los niveles digitales medios de los modelos generados son representativos de dichos cultivos. En el caso de la clasificación del poroto, como se explicitó en su momento, la selección de firmas espectrales se realizó sobre el campo recién sembrado, cuando el suelo se encontraba semidesnudo, por lo tanto el modelo obtenido no representa en absoluto a la especie, si bien el criterio asumido resultó positivo para la clasificación del área ocupada por el cultivo de poroto.
- Las dificultades encontradas en la clasificación del cultivo de maíz causaban un margen de error no aceptable a los fines del presente proyecto. Para realizar la misma, con un mayor grado de confiabilidad, forzosamente se deben profundizar los estudios que incluyan el análisis de imágenes de fechas similares en condiciones ambientales distintas y de fechas intermedias a las analizadas en el actual estudio, así también se podría incluir en el futuro la utilización de imágenes hiperespectrales que permitan una mayor desagregación de la información espectral.

- Los modelos empleados para la clasificación de cada uno de los cultivos estudiados tienen validez únicamente para las imágenes utilizadas en el presente proyecto; no deben ser tomados como modelos universales. Lo expresado anteriormente indica que los mismos son inaplicables a otras imágenes.

Para alcanzar modelos universales que sean aplicables a imágenes de distintos años, condiciones ambientales, variedades, etc., se deberá realizar el procesamiento, interpretación y evaluación de numerosas imágenes bajo diferentes condiciones fenológicas y ambientales; esto acompañado, necesariamente, de las tareas de campo requeridas en las distintas etapas del proceso.

- A continuación, a modo de ejemplo y para subrayar la importancia que tiene el desarrollo de la técnica de estimación de superficie y producción por medio de imágenes satelitales, se analizan los métodos de estimación tradicionales para el cultivo de la caña de azúcar.

Al examinar los costos de ejecución de los distintos métodos de estimación de superficie y producción de caña de azúcar se observa que los métodos expeditivos tradicionales se basan fundamentalmente en encuestas, cuya veracidad depende de la fuente consultada, lo cual determina un grado de confiabilidad menor, en otras palabras el margen de error de este método de estimación es elevado. En caso de necesitarse una estimación con mayor precisión, se realiza una estimación detallada terrestre, que demanda un gran esfuerzo y un costo elevado. Para realizar este tipo de estimación se llevan a cabo durante el periodo prezafra las siguientes actividades:

1. Encuestas para estimar la variación de la superficie cultivada en la provincia. Costo estimado \$8.000.
2. Realización de análisis prezafra en puntos estratégicos de la provincia para conocer la evolución de la maduración de la caña de azúcar y poder estimar a partir de estos resultados la calidad de materia prima del año. Costo estimado: \$5.000.
3. Evaluación del rendimiento cultural de los cañaverales, en una superficie del 20% del mismo, para contemplar todas las variaciones posibles producidas por clima, suelo, manejo del cañaveral, etc. Se considera que el costo para estimar la

producción de una hectárea es de \$5, lo que multiplicado por 40.000 ha que deben ser evaluadas, da un total de \$200.000.

En definitiva, el costo total para realizar una estimación detallada terrestre de producción de azúcar con un grado de error bajo, inferior al 5%, es de \$213.000.

Conocer la cantidad de caña de azúcar disponible para la fabricación de azúcares es de significativa importancia, ya que se puede saber antes del inicio de la zafra la cantidad de caña que se deberá moler para satisfacer la demanda doméstica y cuales son las posibilidades de producción de azúcar destinada a exportación, discriminada entre azúcar crudo y refinado, por lo que se justifica el realizar un elevado gasto anual a tal fin.

El uso de la técnica de imágenes satelitales con el complemento del apoyo de campo demandaría un esfuerzo sensiblemente inferior al que se viene realizando y posibilitaría contar con buenos resultados en forma más ágil, segura y económica.

8 - Bibliografía

- Albertz, J.** 1991. Grundlagen der interpretation von luft und satellitenbildern. Alemania.
- Anderson, J. R.; Hardy, E.; Roach, J. T.; Witmer, R.E.** 1979. Sistema de clasificación del uso de la tierra y cobertura de suelos para su utilización con datos de sensores remotos. Río de Janeiro. Brasil.
- Andrade, F.; Cirilo, A.; Uhart S.; Otegui M.** 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce INTA. Buenos Aires. Argentina.
- Bähr, H. P.** 1991. Procesamiento Digital de Imágenes, Aplicaciones en Fotogrametría y Teledetección. Alemania.
- Chuvieco, E.** 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid. España.
- Fogliata, F. A.** 1995. Agronomía de la caña de azúcar. Tucumán. Argentina.
- Fontquer, P.** 1953. Diccionario de Botánica. España.
- Gastellu Etchegorry, J.P.** 1990. Satellite Remote Sensing for Agricultural Projects. World Bank Technical Paper Number 128. Washington. Estados Unidos.
- González Aguayo, R.E.** 1994. Diccionario de Términos SIG. Instituto de Economía y Geografía. Madrid. España.
- González Lelong, A.** 1997. Proyecto de estudio de la reconversión productiva del sector agropecuario. C.F.I.-E.E.A.O.C. Tucumán. Argentina.
- Hellmann, D. B.; Wallace M. G.; Platford, G. G.** 1995. Interpreting farm sugarcane yields using a geographic information system (GIS). Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association. Sudáfrica.
- Lee-Lovick G.; Kirchner, L.** 1991. Limitations of Landsat TM data in monitoring growth and predicting yields in sugar cane. Proceedings of Australian Society of sugar cane technologists. Australia.

- Norman A. G.** 1983. Fisiología, Mejoramiento, Cultivo y Utilización de la soja. Michigan. Estados Unidos.
- Ploper, J.; Bulacio E.** 1998. El poroto. Facultad de Agronomía y Zootecnia de la U.N.T. Tucumán. Argentina.
- Romano, A. M.** 1999. Cultivos bajo riego por pivote central. Revista de los CREA 219. Buenos Aires. Argentina.
- Scandaliaris, J. Et al.** 1997. Empleo de imágenes satelitales para el relevamiento del área cañera de la provincia de Tucumán. Avance Agroindustrial E.E.A.O.C. Tucumán. Argentina.
- Zuccardi, R. B. ; Fadda, G.** 1985. Bosquejo Agroecológico de la Provincia de Tucumán. Miscelánea 86. Facultad de Agronomía y Zootecnia de la U.N.T. Tucumán. Argentina.

9 - Agradecimientos

- Al Ing. Agr. Guillermo Fadda, Director Técnico de la E.E.A.O.C., por el apoyo y confianza brindados a lo largo de todo el proyecto.
- Al Ing. Agr. Jorge Scandaliaris, Director Asistente de la E.E.A.O.C., por sus acertadas sugerencias y la valiosa información proporcionada, dando por descontado el apoyo y confianza recibidos.
- Al Ing. Agr. Franco Fogliata, Ministro de la Producción de la Provincia de Tucumán al momento de iniciarse el presente proyecto.
- A los productores y empresas agropecuarias que brindaron la información de sus campos, indispensable para la ejecución del trabajo.
- A los Técnicos de la Estación Terrena Córdoba – Centro Espacial T. Tabanera, en especial al Ing. Agr. Jorge Izaurrealde, Ing. Bogdan Teianu, Ing. Daniel Perroni y al personal del departamento de Producción, por el asesoramiento y apoyo técnico brindado.
- A los Técnicos de las secciones Agronomía y Mejoramiento de Caña de Azúcar, Cultivos Industriales, Economía y Fruticultura de la E.E.A.O.C., particularmente a los Ingenieros Agrónomos Eduardo Romero, Manuel Roncedo, Mariana Rufino, Luis Sotomayor, Daniela Pérez, Fernando Ledesma Rodríguez y a los Doctores Graciela Salas y Federico Pérez Zamora.
- Al Instituto de Estudios Geográficos de la Universidad Nacional de Tucumán, por facilitar el uso del equipamiento existente para el desarrollo de cartografía digital (SIG).
- A la Dirección de Medio Ambiente de la Provincia de Tucumán por el material facilitado.