



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN



**IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN  
DE SOJA EN EL MUNDO  
Y EN ARGENTINA**

**UBICACIÓN DEL CULTIVO DE SOJA  
EN EL NOROESTE ARGENTINO  
Y CARACTERÍSTICAS DE SU EXPANSIÓN**

**ENFOQUE AGROECOLÓGICO  
DEL CULTIVO DE LA SOJA  
EN EL NOROESTE ARGENTINO**



# IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL MUNDO Y EN ARGENTINA

Mario R. Devani - Oscar Ricci - Daniela R. Pérez - Fernando Ledesma - Julián M. Lenis

La soja [*Glycine max* (L) Merr] es el cultivo oleaginoso de mayor producción y consumo a nivel mundial. La producción mundial de poroto de soja en la campaña 2004/2005, estuvo en el orden de los 213 millones de toneladas, superando a la de cualquier otra oleaginosa comestible, y tuvo un crecimiento anual promedio del 5% durante el último quinquenio. Si bien son aproximadamente 50 los países que producen soja, el 90% de la producción la concentran, EEUU (40%), Brasil (24%), Argentina (18%) y China (8%).

En los últimos seis años, de acuerdo a las estimaciones del United State Department of Agriculture (USDA), la producción de EEUU experimentó un crecimiento anual promedio del 3,16% hasta la campaña 2004/2005. En tanto

la producción de Argentina tuvo una tasa creciente del 8,83%, pasando de 27,8 a 39 millones de t, Brasil creció a un ritmo del 6,94%, pasando de 39 a 51 millones de t. Por último, China también incrementó su producción, pero en el orden del 3% promedio por año (Gráfico I.1).

Aunque de la soja se pueden obtener numerosos derivados, en el comercio mundial adquieren gran importancia, el poroto, la harina, y el aceite de la oleaginosa. Estados Unidos es el principal exportador de grano de soja, en segundo lugar están Brasil y Argentina (Gráfico I.2). En lo referente a la harina de soja, se producen anualmente en el mundo alrededor de 138 millones de t. El principal productor con aproximadamente 37 millones de t es EEUU. Los otros productores relevantes son Brasil, Argentina,

Gráfico I.1. Producción de grano, aceite y harina de soja, en el mundo, en miles de t, 2000/2001-2004/2005.

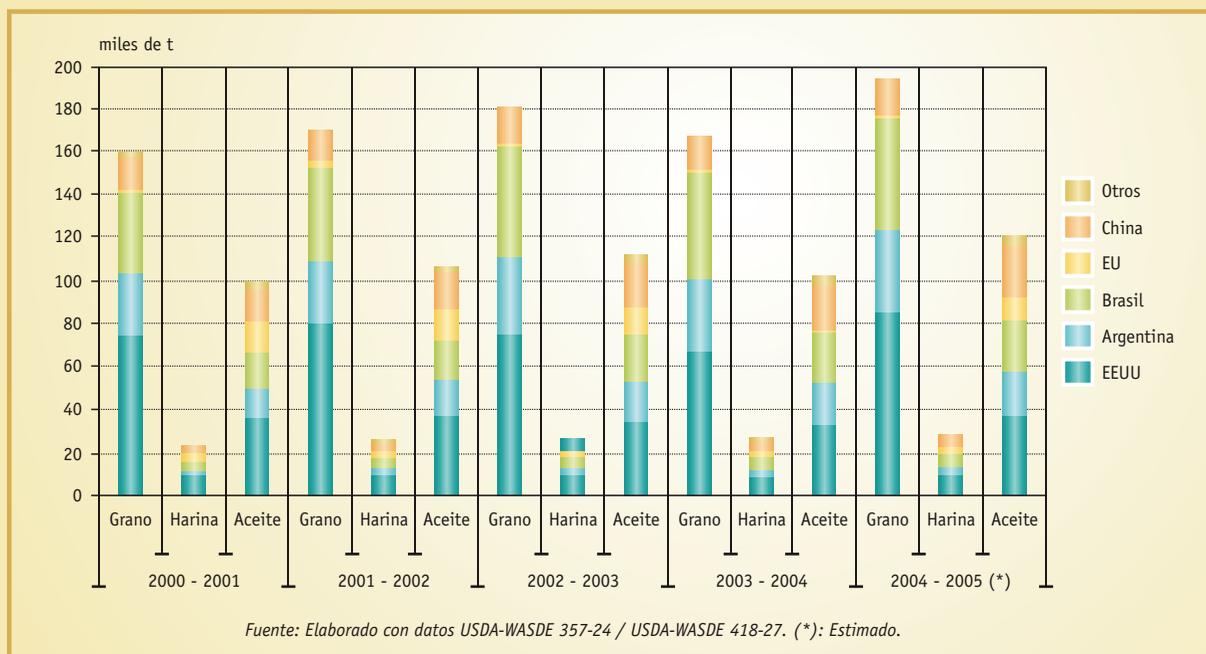
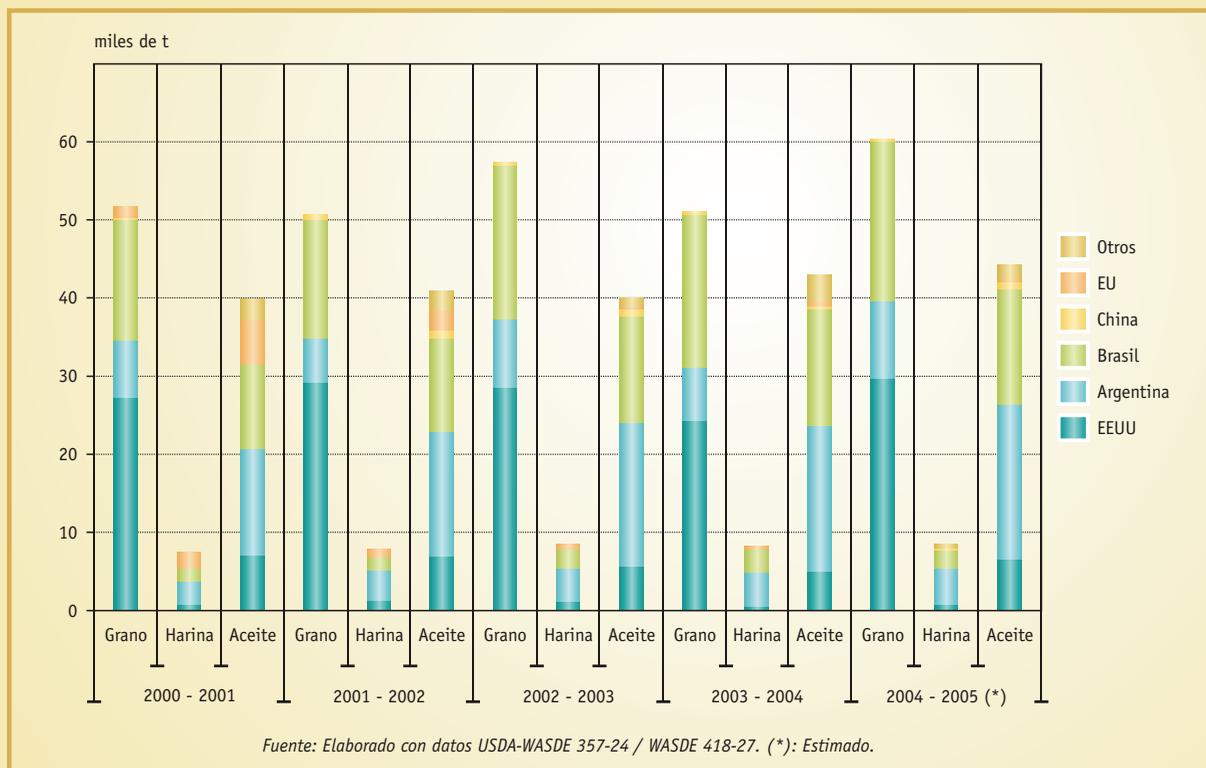


Gráfico I.2. Exportaciones de grano, aceite y harina de soja, en el mundo, en miles de t, 2000/2001-2004/2005.



China, la Unión Europea e India (Gráfico I.1). Mundialmente se exportan más de 46 millones de toneladas de harina de soja. Argentina, con un 42% del mercado es el principal exportador, seguida por Brasil (32%) y EEUU (14%). En el último quinquenio las exportaciones de Argentina y Brasil experimentaron un crecimiento promedio anual positivo de 10,11% y 8,19% respectivamente; en cambio, EEUU tuvo una tasa decreciente del 1,35% hasta el 2004/2005 (Gráfico I.2).

En cuanto a la producción mundial de aceite de soja, en los últimos años fue de aproximadamente 32 millones de toneladas. El principal productor con 8,76 millones de t es EEUU, le siguen en orden de importancia Brasil, Argentina, China y la Unión Europea (Gráfico I.1). Durante los pasados cinco años, en el mundo se han exportado anualmente alrededor de 8,7 millones t de aceite de soja. Argentina, con una participación aproximada del 52%, es el primer exportador mundial, siguiéndole en orden de importancia Brasil y EEUU. Los principales importadores son China y Pakistán.

Es importante destacar el crecimiento que han tenido Brasil y Argentina como productores de grano, aceite y harina, de la misma forma que el crecimiento de su participación como exportadores de estos productos en el mercado mundial (Gráficos I.1 y I.2).

### IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN ARGENTINA

La Argentina es la tercera productora mundial de grano, aceite y harina de soja, y la primer exportadora de aceite y harina de la oleaginosa (Gráficos I.1 y I.2). Además, el cultivo de soja es el de mayor importancia en Argentina, tanto por la superficie que abarca como por los volúmenes producidos y exportados de grano y sus productos (aceite y harina). El complejo agroindustrial sojero en el país se ubica desde los 40° hasta los 22° de LS, comprendiendo la región pampeana (provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fé, Entre Ríos y La Pampa), el noreste (NEA, que abarca las provincias de Chaco, Formosa, Entre Ríos, Corrientes, Misiones y este de Santiago del Estero) y el noroeste (NOA, que incluye las provincias de Salta, Tucumán, Catamarca, Jujuy y oeste de Santiago del Estero). Cabe destacar que las plantas procesadoras se encuentran principalmente en las cercanías de los puertos.

El área sembrada con soja en Argentina, que en la campaña 2004/2005 fue de 14,4 millones de hectáreas, se incrementó en los últimos seis años a un ritmo promedio anual del 10,37% (Gráfico I.3). La producción de soja de Argentina fue en la campaña 2004/2005 de 39 millones de t, experimentando un crecimiento del 18% con relación al

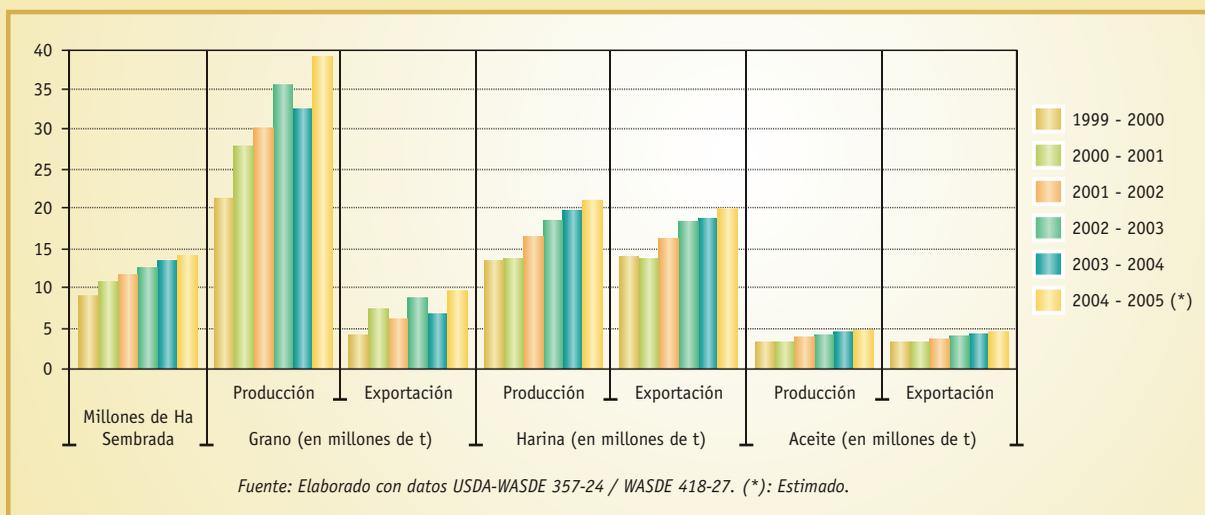
## IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL MUNDO Y EN ARGENTINA

ciclo anterior y una tasa de crecimiento anual promedio del 13% en las últimas seis campañas (Gráfico I.3).

El país presentó prácticamente en todo el pasado decenio un crecimiento sostenido de la producción y del área implantada con soja, pero también la molienda y la exportación de grano, harina y aceite de la oleaginosa crecieron. En este mismo período entre un 70 y un 80% de la soja producida anualmente se destinó a la molienda para elaboración de aceite y harinas. Prácticamente la totalidad

del aceite y de la harina de soja producidos en el país se destinaron a la exportación. En el 2004/2005 se exportaron alrededor de 5 millones de toneladas de aceite de soja y 20,7 millones de toneladas de harina (Gráfico I.3). Los destinos principales son China, Egipto, Irán, Malasia, Bangla Desh, Colombia, India, Venezuela, Brasil y Madagascar. En los últimos años también creció la exportación del grano de soja. Actualmente se exportan más de 9 millones de toneladas de proto de soja principalmente a China, Filipinas y Malasia.

Gráfico I.3. Argentina. Millones de ha sembradas con soja, producción y exportación de grano, harina y aceite de soja, en millones de t, 1999/2000-2004/2005





# UBICACIÓN DEL CULTIVO DE SOJA EN EL NOROESTE ARGENTINO Y CARACTERÍSTICAS DE SU EXPANSIÓN

Oscar Ricci - Mario R. Devani - Daniela R. Pérez - Fernando Ledesma - Julián M. Lenis

Cuando se hace referencia al cultivo de soja, la región del noroeste argentino (NOA) tradicionalmente comprende la zona ubicada entre los 22° y 29° de latitud sur y los 63° y 68° de longitud oeste. En Tucumán se ubica en el este de la provincia (ocupando parte de las regiones agrológicas del Pedemonte Subhúmedo Seco y la llanura Chacopampeana) en los departamentos Burruyacu, Cruz Alta, Leales, J. B. Alberdi, La Cocha, Graneros y también en pequeñas áreas en Simoca, Lules y Capital. En la provincia de Salta el cultivo se localiza en los departamentos San Martín y Orán al norte, en el departamento Anta en el centroeste, y en los de Rosario de la Frontera y Metán al sur. En Jujuy el desarrollo del cultivo es limitado y en Catamarca se sitúa al sudeste de la provincia. Por último, cabe destacar que en éste escrito, en la región NOA sólo se incluye el oeste de Santiago del Estero (departamentos Pellegrini, Jiménez y Río Hondo) (Figura I.1). La zona este de la provincia de Santiago se incluye en la región del noreste argentino (NEA), debido a diferencias agroecológicas y de manejo tecnológico del cultivo.

En el NOA, el cultivo de soja se inició en Tucumán, adquiriendo importancia recién a partir de la década de 1960. El proceso de expansión del mismo en esta provincia

puede dividirse básicamente en tres etapas. En un primer momento la soja ocupó zonas ganaderas o con montes que no eran aptas para el desarrollo de los cultivos tradicionales como caña de azúcar, citrus, tabaco, etc. En una segunda etapa desplazó a estos cultivos de áreas que eran marginales para los mismos. Finalmente, el empleo de un paquete tecnológico de avanzada, siembra directa, uso diferencial de genotipos, empleo de fertilizantes, etc., le permitió establecerse en áreas que con anterioridad le hubieran resultado de muy difícil ocupación y que en muchos casos se destinaban a poroto, principalmente zonas con precipitaciones anuales de aproximadamente 500 mm, entre otros factores adversos. Las características del proceso de colonización del cultivo de soja en la provincia de Tucumán, en general, pueden extrapolarse al resto del NOA, donde hoy la soja ocupa alrededor de 781.000 hectáreas (ha) distribuidas según se muestra en el Cuadro I.1. En Salta la soja está ocupando áreas tradicionalmente dedicadas al poroto y en Santiago del Estero, se ubica en zonas antes dedicadas al poroto y al algodón, así como también en nuevos desmontes.

El crecimiento de la producción de soja en el NOA es consecuencia del aumento tanto de la superficie implantada como de los rendimientos. Ambas situaciones se originaron en el significativo trabajo de investigación que proporcionó importantes mejoras en la productividad del cultivo a lo largo de todo este período. Las series estadísticas indican que en la década de 1970 los rindes promedios estaban en 1.200 kg/ha, llegando en la actualidad (bajo condiciones normales de precipitación) a rendimientos promedios para el NOA del orden de los 2.500 kg/ha. Si consideramos solamente a la provincia de Tucumán, en la campaña 2001/2002, alcanzó un

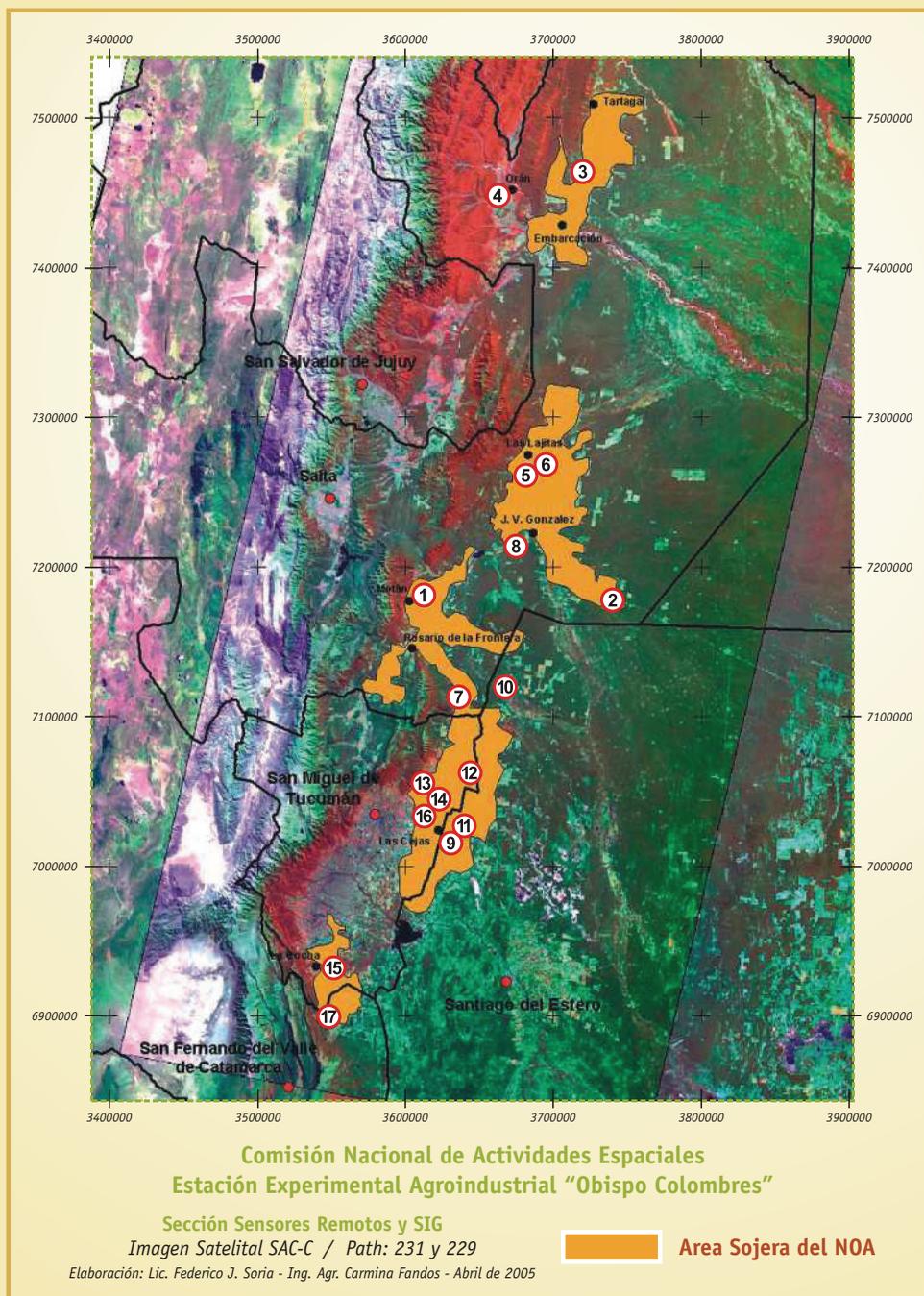
Cuadro I.1. Superficie sembrada con soja en el NOA en la campaña 2004/2005.

Provincia	Superficie (hectáreas)
Salta	425.715 <sup>1</sup>
Tucumán	257.100 <sup>2</sup>
Oeste de Santiago del Estero	69.720 <sup>2</sup>
Sudeste de Catamarca	23.630 <sup>2</sup>
Jujuy	5.070 <sup>1</sup>

1: Datos ProReNOA INTA.

2: Sección Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica - EEAOC.

Figura I.1. Ubicación del área con soja en el NOA.



rendimiento promedio de 2.850 kg/ha (Devani *et al.*, 2002). Actualmente la producción de soja en el NOA está en el orden de 1.900.000 t. A pesar de que este volumen en valores relativos sólo representa un 5% de la producción nacional, el cultivo tiene un importante impacto en la economía regional. Si bien Tucumán prácticamente no presenta posibilidades para que el área implantada con soja siga creciendo, esta provincia es la que más se destaca por su activa participación en la investigación, desarrollo

productivo y difusión de la oleaginosa en la región. Por otro lado las provincias de Salta y Santiago del Estero, disponen todavía de amplias áreas para ser incorporadas al cultivo.

#### BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Devani M., C. Lamelas, F. Ledesma y J. D. Forciniti. 2002. Soja: Récord Histórico de Producción. Avance Agroindustrial Vol. 23 - Nº 2: 40-41.

# ENFOQUE AGROECOLÓGICO DEL CULTIVO DE LA SOJA EN EL NOROESTE ARGENTINO

César M. Lamelas - Jorge D. Forciniti - Claudia Funes

El territorio argentino apto para el cultivo de la soja en secano ubica dos regiones diferenciadas por el régimen de precipitaciones: la más importante, al oriente, abarca el área pampeana, región mesopotámica y noreste argentino, aportando el 95% de la producción nacional; y la concentrada en el noroeste argentino (NOA), con el restante 5%. Aún cuando la contribución del NOA resulta pequeña al total del país, este cultivo tiene una significativa importancia en la economía de esta región. El proceso evolutivo del cultivo en la región, que tiene sus inicios en la década del 60, fue permanentemente apoyado por el desarrollo tecnológico, fruto de la investigación aplicada en mejoramiento genético, evaluación de cultivares, prácticas de manejo, plagas y enfermedades, a los que se agregan, el estudio de la relación clima-cultivo y la zonificación por aptitud agroclimática y agroecológica. Es propósito de este apartado analizar los conocimientos generados localmente con relación a las condiciones del ambiente y el cultivo de la soja.

## CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CLIMA DE LA REGIÓN

El NOA, que por su ubicación latitudinal entre los 22° y 29° S, se corresponde con los climas subtropicales, encuentra en el sistema montañoso, que abarca el occidente de la región, el principal factor del clima. Éste influye marcadamente en el régimen térmico y en la distribución espacial de las precipitaciones, generando una notable diversidad de climas. En el caso de la provincia de Tucumán se encuentran todos los tipos climáticos de la clasificación de Thornthwaite, desde los climas per-

húmedos, donde los excedentes hídricos superan los 1.000 mm anuales, hasta los climas áridos, con déficit hídrico en todos los meses del año, (Torres Bruchmann, 1976).

En relación con la soja, el límite del área de cultivo hacia el oeste es térmico y corresponde a la isohipsa de los 1.500 msnm, que coincide con la temperatura media de 20 °C en el mes más caliente del año; y hacia oriente el límite está dado por el gradiente en disminución de las precipitaciones.

La temperatura del aire es uno de los elementos del ambiente de mayor importancia en el crecimiento y desarrollo de los vegetales, y determina, en gran medida, la distribución geográfica de las comunidades vegetales naturales y cultivadas. La acción positiva de este elemento bioclimático se mide a través de la suma de temperaturas a partir del cero de crecimiento o umbral térmico, variable con cada especie vegetal, con los cultivares de cada especie e incluso con las distintas etapas fenológicas. Sin embargo, para estudiar la disponibilidad calórica regional, se acepta un solo umbral térmico por cada grupo bioclimático de cultivos. Para los cultivos anuales estivales que requieren altas temperaturas para iniciar un crecimiento activo (soja, sorgo, tabaco, algodón, caña de azúcar) se utiliza un umbral de 15 °C.

Para la provincia de Tucumán se estableció que, debido a la influencia del área serrana, la duración del bioperíodo de 15 °C y la disponibilidad calórica se incrementan de oeste a este, correspondiendo al área de llanura niveles coincidentes con los de la región chaqueña (Lamelas *et al.*, 1993). Para la región pedemontana y de llanura, en términos medios, el período térmico apto para el cultivo de la soja comienza a mediados de agosto y finaliza a fines

## PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL NOROESTE ARGENTINO

de mayo, con lo que se disponen entre 280 y 300 días. Sin embargo, por tratarse de un cultivo con alta sensibilidad a heladas se sugiere acotar la duración a las fechas de ocurrencia de heladas probables en el 10% de los años. De tal manera, la iniciación se desplazaría al 10 de septiembre y la finalización se adelantaría a mediados de mayo.

Cuando se trate de producción en secano, las siembras deberán postergarse hasta el inicio de las lluvias primaverales, que provean la humedad edáfica necesaria, en los meses de noviembre y diciembre, con lo que se comprueba que en la región existe una disponibilidad energética no aprovechable de 3 a 4 meses.

Otro aspecto a considerar es la ocurrencia de temperaturas muy elevadas durante el ciclo del cultivo, que pueden afectar los rendimientos. Los efectos negativos comienzan a manifestarse cuando la temperatura supera los 30°C y su

magnitud dependerá de la intensidad y duración del calentamiento y de otros factores como la disponibilidad de humedad, estado fenológico, condiciones sanitarias, etc. Habitualmente la ocurrencia de temperaturas muy altas está asociada a condiciones de sequía, lo que tiende a agravar la situación. En toda la región la posibilidad de ocurrencia de temperaturas máximas superiores a 35-40°C se incrementa de oeste a este. Los datos de máximas absolutas (Cuadro I.2) indican que en áreas cercanas al pedemonte se registraron valores superiores a 40°C desde septiembre-octubre hasta enero y en las zonas de llanura se superaron los 40°C desde agosto hasta marzo. Los valores superiores a 35°C ocurrieron desde julio hasta abril-mayo en áreas pedemontanas y todo el año en las zonas más cálidas de la llanura.

Los totales anuales de precipitación en el área sojera muestran un gradiente en disminución de oeste a este y van

Cuadro I.2. Temperaturas máximas absolutas mensuales y anuales de localidades seleccionadas del NOA (\*).

Localidad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Extrema
S. M. Tucumán	40,5	39,5	37,4	34,2	31,8	28,4	39,1	38,5	40,2	40,7	40,3	41,3	41,3
Famaillá	41,1	37,1	37,8	33,9	30,9	27,5	37,4	34,1	36,8	40,2	40,7	42,1	42,1
Santiago	43,9	42,7	40,7	39,4	35,6	32,6	37,3	40,5	41,1	43,1	46,4	45,2	46,4
Campo Gallo	44,8	44,8	41,8	39,1	36,4	34,6	36,6	41,0	42,2	44,3	44,7	46,5	46,5
Orán	41,5	42,1	39,6	35,8	34,5	31,5	35,4	38,9	40,8	42,4	43,6	44,4	44,4
Tartagal	40,6	36,6	28,2	35,2	31,5	29,8	37,7	36,6	42,2	41,0	44,8	39,3	44,8
Rivadavia	44,1	43,7	42,0	39,0	37,3	35,0	38,0	40,0	43,7	44,7	45,3	45,1	45,3
Salta	35,6	33,7	34,0	32,5	34,2	32,5	37,2	36,3	37,2	38,8	39,9	38,5	39,9
Catamarca	45,7	44,4	42,0	38,0	35,8	34,7	38,6	38,6	40,5	42,2	43,6	43,9	45,7
La Cocha	43,6	41,3	40,1	36,0	35,2	31,0	34,1	37,3	40,2	43,5	41,8	43,8	43,8

(\*): Datos obtenidos de las Estadísticas Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Periodos: 1941 - 1950; 1951 - 1960; 1961 - 1990.

desde más de 1.000 mm hasta menos de 600 mm. La distribución temporal muestra una marcada estacionalidad de las lluvias, colectándose desde noviembre hasta abril más del 80% del total anual. También cobra significativa importancia la marcada variabilidad espacial y temporal de las lluvias, determinante de condiciones de sequía o excesos hídricos que impactan sobre los rendimientos del cultivo.

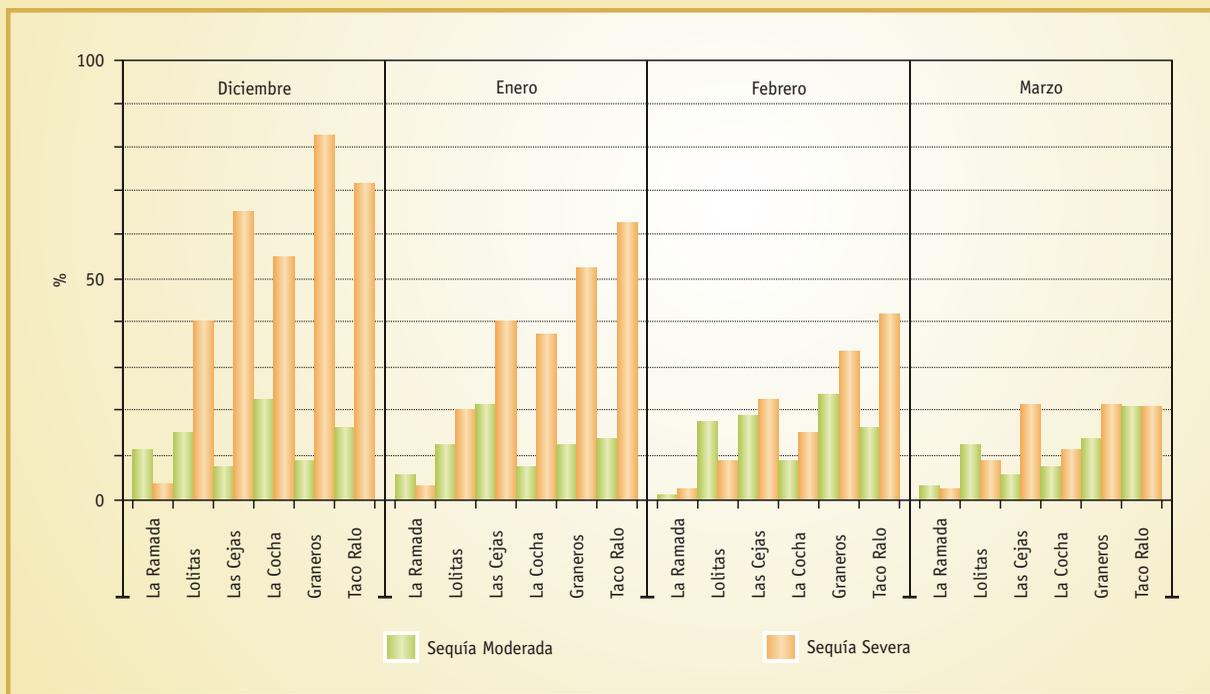
Los aspectos principales que definen las características hídricas del "este tucumano", que en general se corresponden con el resto de la región, fueron descriptos por Lamelas y Suárez (1988). Para el análisis se eligió el período diciembre-marzo, que es el más importante para los cultivos de verano. Con respecto a las precipitaciones, además de mostrar el gradiente en disminución de oeste a este, se señala que la variabilidad interanual de las lluvias es mayor en las zonas de menor pluviometría.

Las situaciones hídricas (excesos, equilibrio o déficit de humedad) exhiben, en términos medianos, un patrón

temporal que muestra a diciembre como el mes con condición más desfavorable y que ésta mejora paulatinamente en enero y febrero, presentando marzo la condición de mayor favorabilidad. Esto obedece al aumento de las precipitaciones y disminución de la evapotranspiración a medida que progresa el verano. Sin embargo, esta resultante del balance hidrológico manifiesta una elevada variabilidad interanual como consecuencia del comportamiento de las precipitaciones.

Con respecto a las sequías (Gráfico I.4), se determinó que en las localidades más secas (este y sudeste de la provincia) la frecuencia de ocurrencia de sequías severas (déficit mayor a 50 mm) es superior que la de sequías moderadas (déficit hídrico entre 25 y 50 mm). Por el contrario, en las localidades más húmedas, cercanas al pedemonte, son más frecuentes las sequías moderadas. En general, para toda el área estudiada, la frecuencia de sequías severas disminuye a medida que progresa la estación.

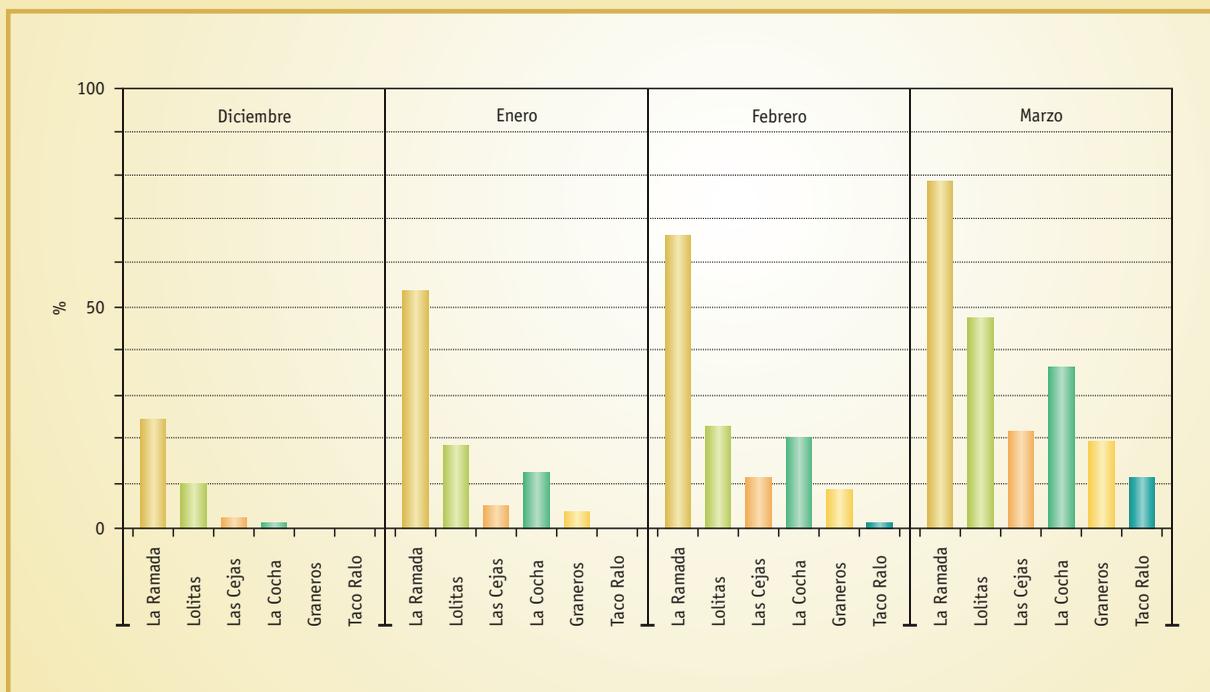
Gráfico I.4. Frecuencias de sequías moderadas y severas en los meses de verano, para 6 localidades del este tucumano.



Para completar el análisis se determinó la frecuencia de años con disponibilidad de humedad edáfica adecuada (Gráfico I.5), considerando los casos en que el almacenaje estuvo en el rango del agua fácilmente aprovechable (igual o mayor a 155 mm). En las áreas más húmedas, la

condición de humedad adecuada progresa desde un 25% en diciembre hasta un 75% en marzo. Por el contrario, las zonas más secas del sudeste provincial mostraron carencia de humedad adecuada en diciembre y enero, llegando a sólo un 11% en marzo.

Gráfico I.5. Porcentaje de años con disponibilidad adecuada de humedad edáfica en los meses de verano para 6 localidades del este tucumano.



## EVOLUCIÓN DEL ÁREA CULTIVADA

Las estadísticas del cultivo de la soja en el NOA elaborada con las estimaciones de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA), que incluye a las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán, Catamarca y la totalidad de Santiago del Estero, permiten describir la evolución a través del tiempo y mostrar el impacto de las condiciones ambientales. El Gráfico 1.6 muestra la evolución de la superficie cultivada en el NOA a través de 30 años. Puede verse que hasta mediados de la década del 70 la superficie se mantuvo sin cambios apreciables, desde entonces y hasta promediar la década de los 90 se observó un crecimiento sostenido y lineal del área cultivada. En el último período que va desde fines de los 90 hasta la campaña 2003/2004 el crecimiento fue exponencial, duplicándose la superficie sembrada en el término de 5 años. Este crecimiento del área cultivada estuvo asociado al desarrollo tecnológico, a situaciones de mercado y a condiciones ambientales favorables.

## EVOLUCIÓN DEL ÁREA PERDIDA

La superficie perdida se estimó como diferencia entre la superficie sembrada y la cosechada. El Gráfico 1.7 muestra la evolución temporal de la superficie perdida expresada como porcentaje del área sembrada. Los mayores porcentajes se correspondieron con años con sequía severa (campañas 1971/1972, 1974/1975, 1986/1987 y 1988/1989). Otros episodios de sequía produjeron pérdidas significativas (campañas 1995/1996 y 2002/2003) y, aún cuando el porcentaje resulta inferior al 10%, la superficie involucrada es importante ya que corresponden a mayores superficies sembradas.

## EVOLUCIÓN DE LOS RENDIMIENTOS

El Gráfico 1.8 exhibe la evolución de los rendimientos medios del NOA y un suavizado por media móvil de 5 años. Esta variable muestra también una tendencia creciente a través de los años, adjudicable a la mejora tecnológica y a condiciones ambientales favorables. Sin embargo, las caídas de rendimientos o desvíos negativos de la tendencia general, se relacionan con situaciones de sequía, destacándose las campañas 1971/1972, 1986/1987, 1988/1989 y 1995/1996.

## EVOLUCIÓN DE LAS LLUVIAS EN EL NOA

Desde hace algunos años las investigaciones en el campo de la climatología y agroclimatología estuvieron orientadas a poner en evidencia la ocurrencia de un cambio en los principales elementos del tiempo clima, siendo la precipitación la más estudiada por su impacto directo en la producción agropecuaria, según se concluye del análisis de algunos trabajos. Minetti y Sierra (1984) estudiaron el avance de la frontera agrícola de Tucumán, asociada a un período con aumento de las precipitaciones; Pascale *et al.*, (1990) señalaron las anomalías positivas de las lluvias durante la década del 70 en Tucumán; Castañeda y Barros (1994) demostraron la tendencia positiva de las precipitaciones en la mayor parte del territorio argentino, particularmente a partir de fines de la década del 50; Lucero (1994) identificó un cambio climático sobre la ciudad de Córdoba, a partir de un aumento de la media poblacional de las lluvias anuales a partir de 1962; Sierra *et al.*, (1994) consideraron que el cambio en el régimen hídrico es el responsable de la migración de los cultivos de grano hacia el área marginal oeste de la región pampeana. Minetti (1995) describió el salto climático de la década del 50 en las precipitaciones mensuales en el este tucumano y oeste santiagueño.

## CAMBIO EN EL PROMEDIO ANUAL DE PRECIPITACIONES EN EL NOA

Los Gráficos 1.9 (a y b) y 1.10 (a y b) muestran el cambio en el promedio anual de precipitaciones, para algunas localidades del área sojera, de las provincias de Salta, Tucumán y Santiago del Estero. La información de base para la Provincia de Salta fue obtenida de Bianchi (1992) y para Tucumán y Santiago del Estero del archivo pluviométrico de la EEAOC. Como las extensiones de las series consideradas eran variables, se dividió a cada una por mitades, de tal manera que para cada localidad la comparación de promedios se hizo sobre muestras de igual número de datos.

Todas las localidades mostraron un crecimiento del promedio anual en las últimas décadas, aunque el porcentaje de incremento no fue homogéneo en toda la región. Fue mayor en la provincia de Salta ubicándose entre el 27% y 47%, en tanto que para Tucumán y el oeste de Santiago del Estero fluctuaron entre 10% y 30%.

Gráfico I.6. Evolución del área cultivada con soja en el NOA en el período 1970/1971 a 2003/2004.

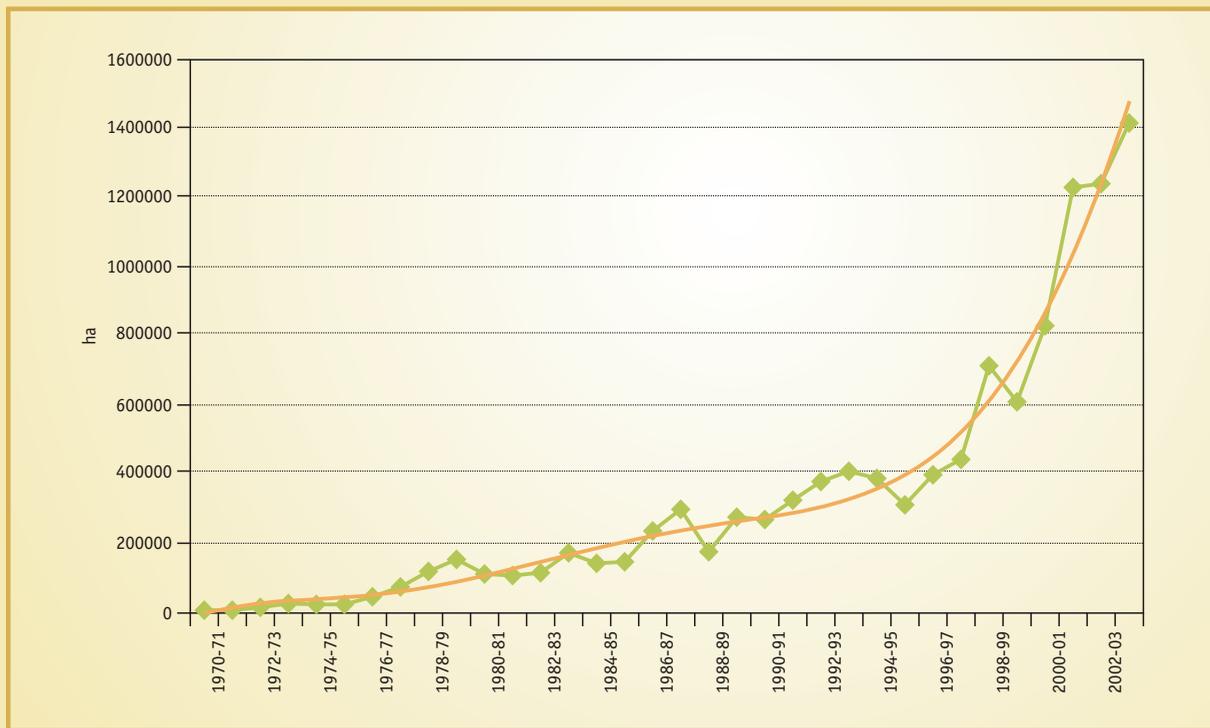
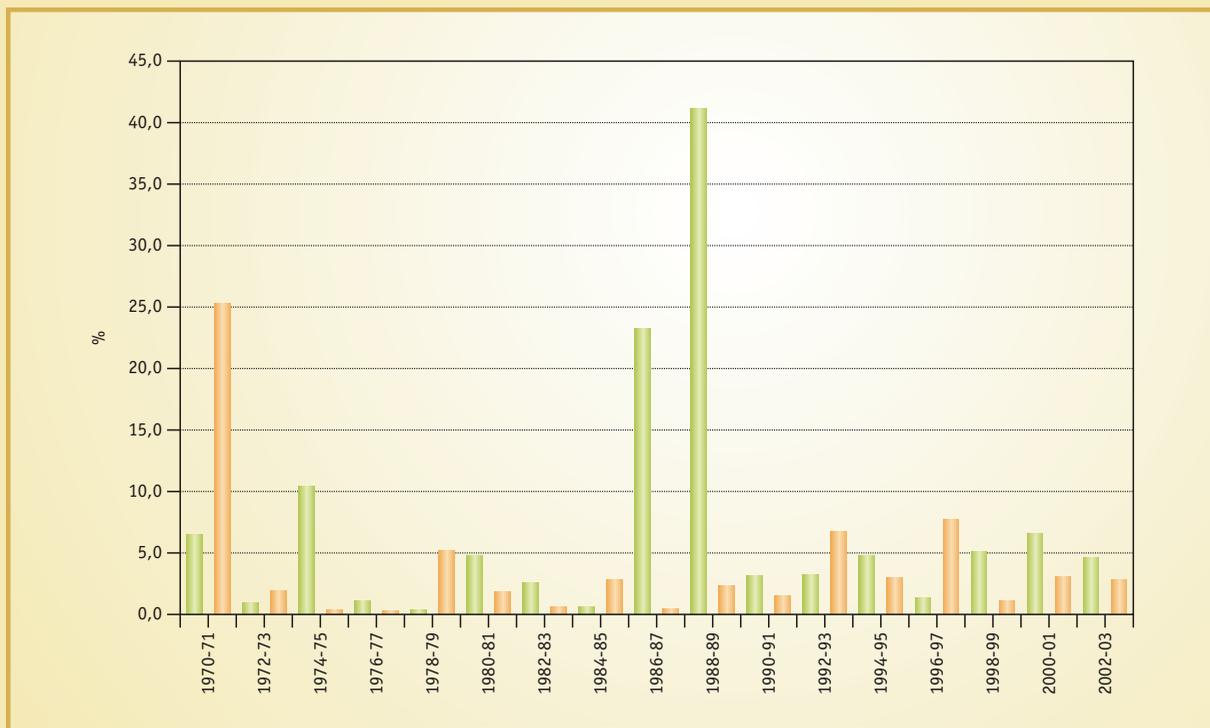


Gráfico I.7. Evolución del área perdida en el cultivo de soja en el NOA, en el período 1970/1971 a 2003/2004.



## PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL NOROESTE ARGENTINO

Gráfico I.8. Evolución de los rendimientos promedios de soja en el NOA, en el período 1970/1971 a 2003/2004.

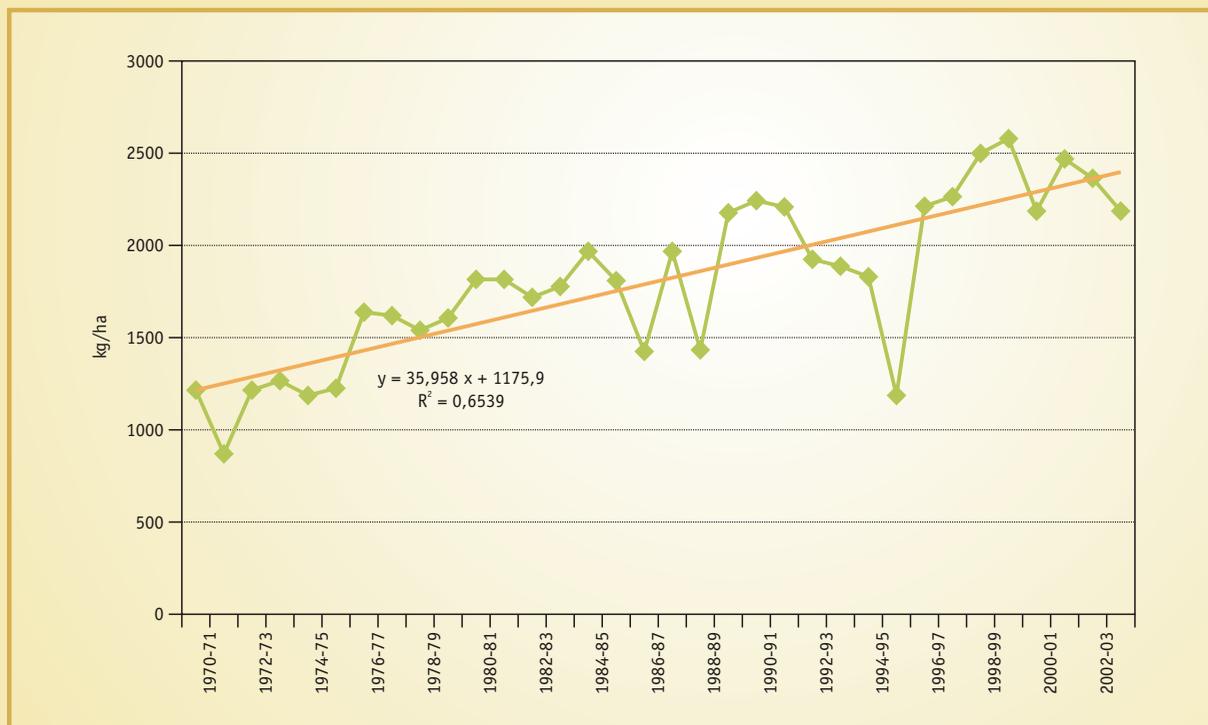


Gráfico I.9a. Comparación de promedios de totales anuales de localidades de la Provincia de Salta.

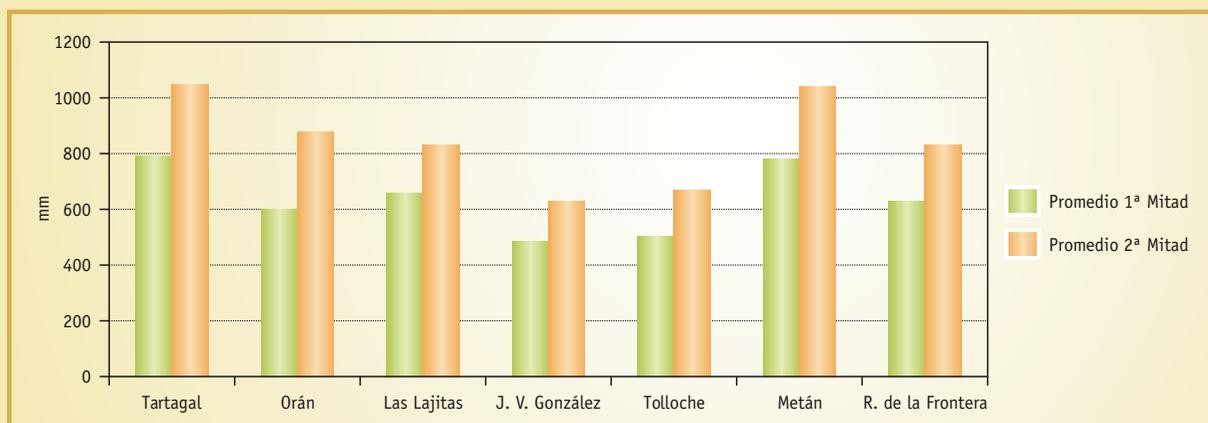


Gráfico I.9b. Incremento porcentual del promedio anual de lluvias para localidades de la Provincia de Salta.

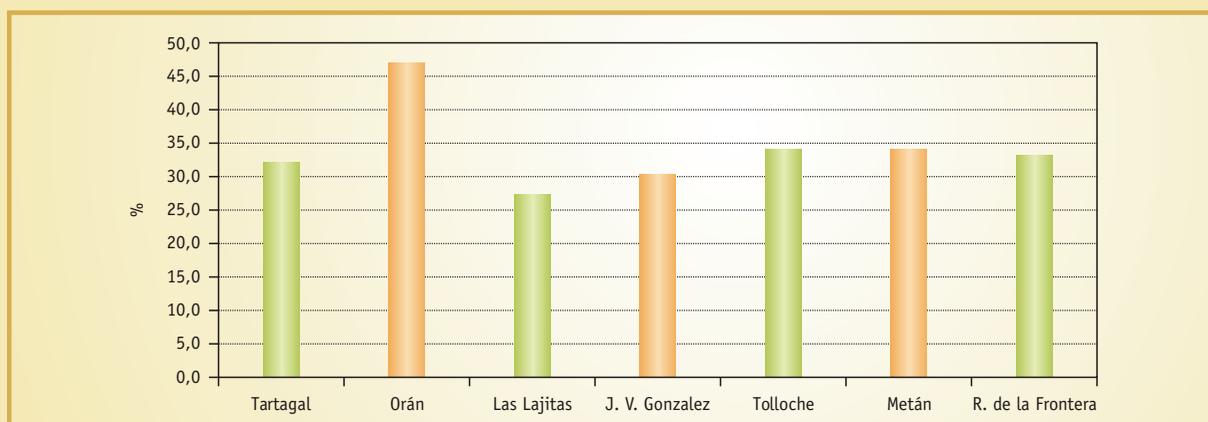


Gráfico I.10a. Comparación de promedios de totales anuales de localidades de las Provincias de Tucumán y Santiago del Estero.

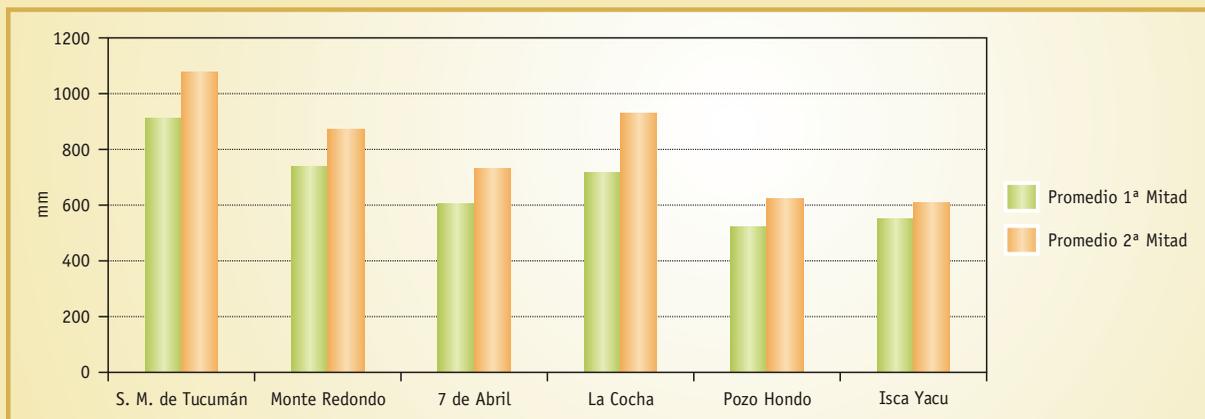


Gráfico I.10b. Incremento porcentual del promedio anual de lluvias para localidades de las Provincias de Tucumán y Santiago del Estero.



### EVOLUCIÓN DE LAS LLUVIAS: CASO SAN MIGUEL DE TUCUMÁN

A los fines de complementar el estudio del régimen pluviométrico y generar información para el seguimiento de las condiciones de humedad en diferentes escalas temporales, se aplicó el método del índice de anomalía normalizado adoptado de Türkes (1996), a la serie pluviométrica del siglo 20 de San Miguel de Tucumán.

$$IAN = \frac{x_i - X}{SD}$$

donde:

IAN: Índice de anomalía normalizado.

$x_i$ : Total anual de la campaña  $i$ .

$X$ : Promedio anual de la serie.

$SD$ : Desvío estándar de la serie.

El Gráfico I.11 muestra la evolución del IAN de las precipitaciones totales por campaña agrícola, para todo el siglo 20, en San Miguel de Tucumán. Puede verse que las anomalías negativas predominaron desde comienzos del siglo hasta mediados de la década del 50, cuando ocurrió el "salto climático" descrito por Minetti (1989), dando para éste período una tendencia lineal en disminución de las lluvias. Desde entonces y hasta el fin del siglo dominaron las anomalías positivas, con tendencia lineal en crecimiento de las precipitaciones, y trajo como consecuencia un incremento del 24,5% en el promedio anual de los últimos 45 años.

Este comportamiento de las precipitaciones se verificó en toda la región del NOA, como lo indican los Gráficos I.12 y I.13, correspondientes a Orán y La Cocha, ubicadas en los extremos latitudinales del área, y que determinó la posibilidad de expansión del área de cultivo ya comentada.

## PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL NOROESTE ARGENTINO

Gráfico I.11. Evolución del índice de anomalías normalizadas de las precipitaciones, por campañas agrícolas, para la localidad de San Miguel de Tucumán (26° 48' S, 65° 12' W, 481 msnm) en el periodo 1900-1901/2000-2001.



Gráfico I.12. Evolución del índice de anomalías normalizadas de las precipitaciones, por campañas agrícolas, para la localidad de Orán (23° 9' S, 64° 19' W, 357 msnm) en el periodo 1934-1935/1988-1989.

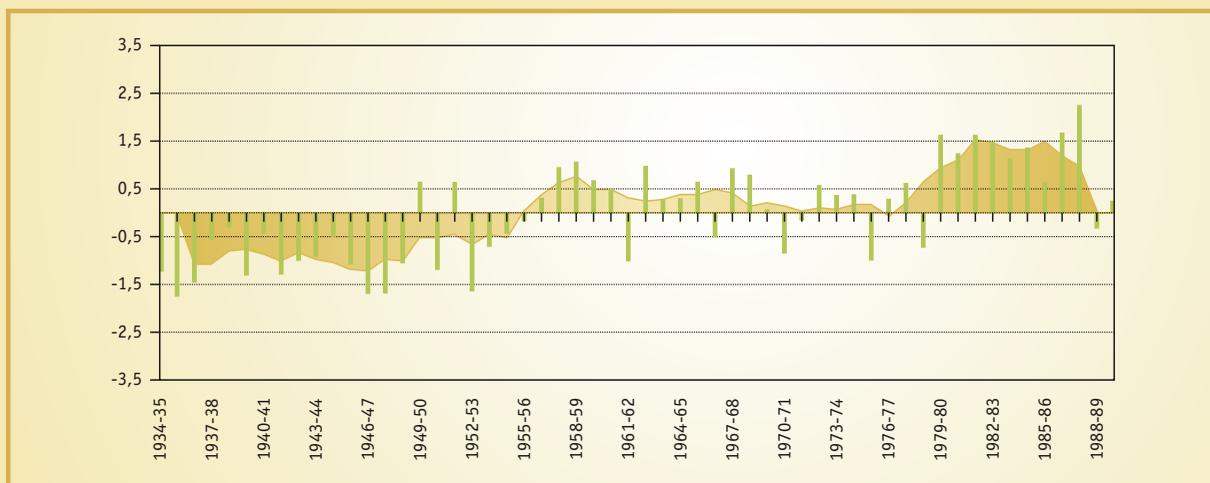
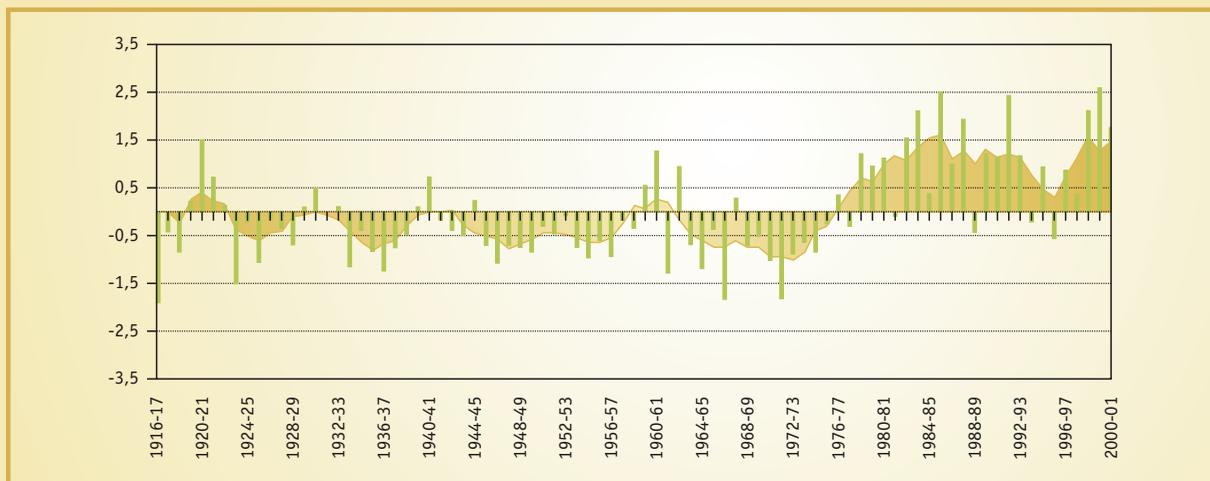


Gráfico I.13. Evolución del índice de anomalías normalizadas de las precipitaciones, por campañas agrícolas, para la localidad de La Cocha (27° 47' S, 65° 34' W, 443 msnm) en el periodo 1916-1917/2000-2001.



## ENFOQUE AGROECOLÓGICO DEL CULTIVO DE LA SOJA EN EL NOA

Por otra parte, el IAN aplicado a la serie de San Miguel de Tucumán, permitió generar un criterio para identificar ciclos de anomalías en las precipitaciones por campañas agrícolas, cuyos resultados se muestran en el Cuadro I.3.

Cuadro I.3. Análisis temporal de la ocurrencia de ciclos húmedos, secos e intermedios para San Miguel de Tucumán, en el período 1901/2000.

Ciclos Húmedos			Ciclos Secos			Ciclos Transición	
Fechas	Duración	Interrupciones	Fechas	Duración	Interrupciones	Fechas	Duración
1903-04/1905-06	3		1906-07/1908-09	3		1900-01/1902-03	3
1956-57/1960-61	5		1918-19/1921-22	4	1922-23 (1 Año)	1909-10/1917-18	9
1975-76/1985-86	11		1923-24/1926-27	4		1927-28/1932-33	6
1990-91/1993-94	4	1994-95/1995-96	1933-34/1939-40	7	1940-41 (1 Año)	1961-62/1974-75	14
1996-97/1999-2000	4	(2 Años)	1941-42/1945-46	5	1946-47 (1 Año)	1986-87/1989-90	4
Años ciclos húmedos	27		1947-48/1955-56	9		Años ciclos transición	36
Años c/ húmedos a/ Salto climático	3		Años ciclos secos	32		Años c/ transición a/ Salto climático	18
Años c/ húmedos d/ Salto climático	24		Años c/ secos a/ Salto climático	32		Años c/ transición d/ Salto climático	18
			Años c/ secos d/ Salto climático	0			

Se consideran ciclos húmedos o ciclos secos cuando la persistencia de anomalías positivas o negativas es mayor de 2 años. En los ciclos de transición se observan cambios rápidos en el signo de las anomalías. De acuerdo a este criterio, todos los ciclos secos se ubicaron antes del salto climático, en tanto que la gran mayoría de los ciclos húmedos ocurrieron después del salto climático. La cantidad de años involucrados en los ciclos de transición o normales se repartieron por igual antes y después del salto climático. El análisis de esta información permite inferir qué en las interrupciones de los ciclos húmedos y en los ciclos de transición o normales, ocurrieron procesos de sequía, algunos de los cuales fueron muy severos y ocasionaron pérdidas significativas en el cultivo de soja.

### RELACIÓN CLIMA-CULTIVO

La asociación existente entre los rendimientos de los cultivos y la variabilidad interanual del clima sumado a los efectos tecnológicos ha sido objeto de estudio en otros países productores de granos (Shaw y Durost, 1965; Thompson, 1963, 1969) y en diversas regiones de la Argentina, (Sierra y Pórfido, 1980; Minetti *et al.*, 1982 a, b; Rebella *et al.*, 1980; Sierra y Brynsztein, 1989; Lamelas *et al.*, 1991).

Para el cultivo de la soja, Minetti y Lamelas (1995) utilizaron un modelo multilineal, asociando variables climáticas de escala mensual o estacional con datos de rendimientos promedios regionales anuales, en el

período 1966-1989. El área estudiada correspondía a parte de los departamentos Burruyacú y Cruz Alta, como se muestra en la Figura I.2, que incluía aproximadamente el 70% de la superficie sembrada con soja en la provincia de Tucumán.

En la generación del modelo se usaron variables regionales como la precipitación, conformada por el promedio areal-mensual del agua caída en el área de estudio, habida cuenta que la precipitación no es una variable extensiva. En las otras variables como la temperatura, humedad, amplitud térmica, etc., los datos correspondieron a San Miguel de Tucumán, por ser éstas de tipo extensiva y representar en alguna medida lo ocurrido en la región.

Partiendo de una matriz de correlación donde se probaron todas las asociaciones posibles entre las variables predictoras (climáticas) y predictiva (rendimiento), se seleccionaron para conformar el modelo final aquellas que explicaban el mayor porcentaje de la varianza y no tenían efectos de colinealidad.

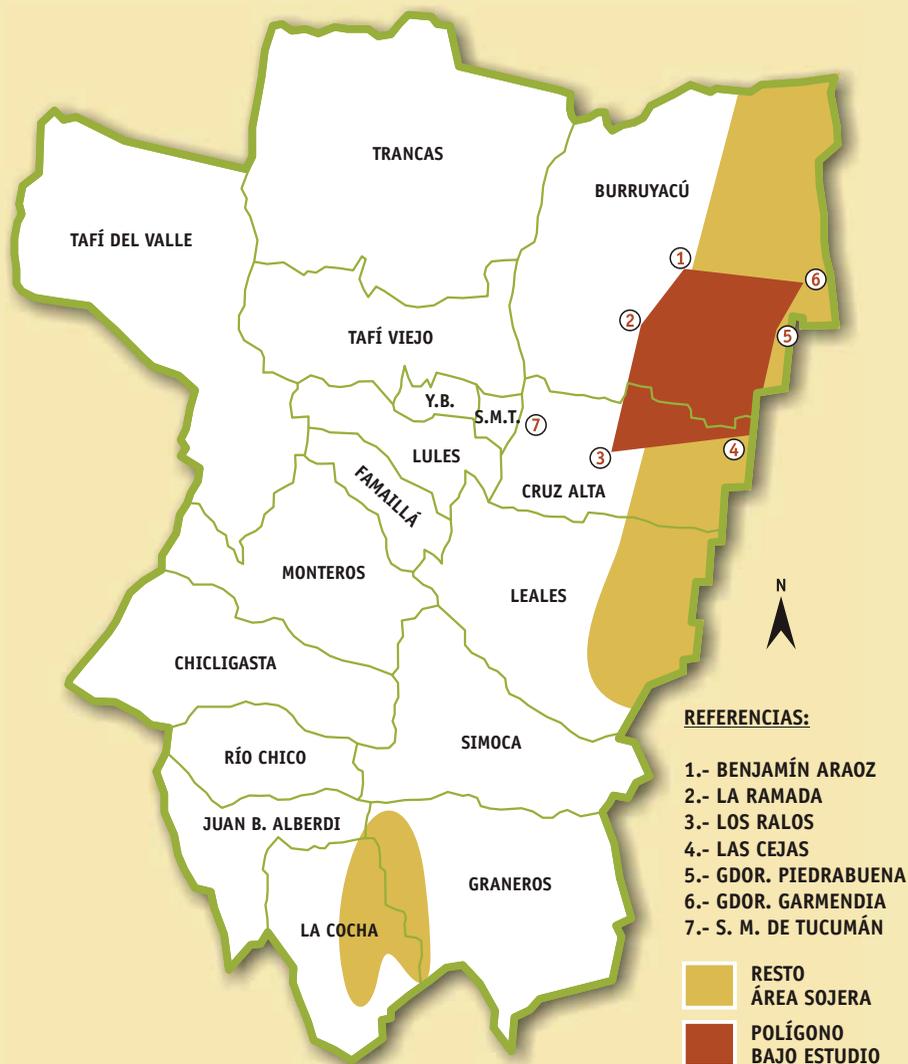
El Cuadro I.4 muestra las asociaciones de mayor significancia de noviembre a mayo. Los valores de correlación significativos al 1% de los meses de diciembre y febrero, señalan la dependencia hídrica del cultivo en dos etapas importantes de su ciclo evolutivo. El mes de diciembre se corresponde con la siembra-implantación del cultivo, etapa crítica en nuestra región por la escasez de agua almacenada en los suelos, en coincidencia con la finalización de la primavera

## PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL NOROESTE ARGENTINO

normalmente seca, y por lo tanto marcadamente dependiente de las precipitaciones. Febrero resulta crítico ya que se corresponde con la floración y comienzo de llenado de grano, el periodo de máxima demanda de

agua de la soja. Además, febrero acumula la mayor parte de asociaciones significativas con variables climáticas, lo que indica la alta sensibilidad del periodo reproductivo a las condiciones ambientales.

Figura I.2. Área sojera de la provincia de Tucumán y polígono encerrado por localidades con información pluviométrica que se promedia. Se ubica además a la estación meteorológica de San Miguel de Tucumán.



Cuadro I.4. Correlaciones significativas entre los rendimientos medios de soja con variables climáticas medias mensuales de San Miguel de Tucumán y la precipitación regional, período 1966 - 1989.

Variables	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
T° Media	----	----	----	----	----	----	----
T° Mínima	----	----	----	----	----	----	----
T° Máxima	----	----	----	-0,4	----	-0,4	----
Hum. Relativa	----	----	----	----	----	----	----
Heliofanía	----	----	----	-0,45	----	-0,6	----
Amp. Térmica	----	----	-0,5	-0,54	-0,62	-0,6	----
Precipitación	----	0,56	----	0,48	----	----	----

*N = 24 datos,  $r = 0.48$  y  $r = 0.38$  significativas al 1% y 5%.*

Todas las variables seleccionadas (elevada insolación, altas temperaturas diurnas y gran amplitud térmica) revelan situaciones de sequía climática y por lo tanto condiciones de estrés hídrico y térmico para el cultivo, que deprimen los rendimientos regionales.

El modelo de regresión múltiple finalmente seleccionado para la descripción de los rendimientos resultó:

$$Rto(t) = 2411.9 + 3.308 Rd(t-1) - 109.0 Af(t) + E$$

donde:

Rto(t) = rendimiento de soja promedio de la provincia en el año (t).

Rd(t-1) = precipitación promedio regional para el mes de diciembre en el año anterior a la cosecha (t-1).

Af(t) = amplitud térmica media del mes de febrero del año de la cosecha, en San Miguel de Tucumán (t).

E = error de estimación o residuo no explicado por los predictores.

Este modelo con  $R^2 = 0.486$  explica el 48.6 % de la variabilidad de los rendimientos en el período 1966-1989.

El Gráfico I.14 muestra los rendimientos promedios observados y los valores generados por el modelo propuesto. Ambos poseen tendencia lineal creciente, lo cual sostiene la hipótesis de que parte de la tendencia de los rendimientos se debería a motivos de tipo climatológico. En este caso, la diferencia entre las pendientes de los datos reales observados ( $br = 34,7 \text{ kg/ha/año}$ ) y de los datos del modelo ( $bm = 8,8 \text{ kg/ha/año}$ ), es la tendencia de la variabilidad no explicada por motivos climáticos y que se asigna como responsable a la tecnología. Esta diferencia es de "b" =  $25.9 \text{ kg/ha/año}$ , o sea que la tecnología habría generado un aumento de los rendimientos promedios de la provincia de Tucumán de  $621.6 \text{ kg/ha}$ , en el período 1966-1989.

El Gráfico I.15 representa los valores obtenidos por el modelo en el período 1966-1989 con variables climáticas y el agregado del período anterior a 1966 obtenidas como un proceso de simulación en el período donde no existía el cultivo de soja.

En ella se observan dos promedios de largo plazo diferenciados, uno anterior a 1951 de  $1.380 \text{ kg/ha}$  y otro posterior de esa fecha con  $1.620 \text{ kg/ha}$ . Ese salto de  $+240 \text{ kg/ha}$  en el promedio de supuestos rindes sería el resultado del impacto del salto climático, ocurrido alrededor de 1954, cuando el clima de la región pasa de un estadio más seco y cálido a otro más fresco y húmedo (lluvioso) en las

Gráfico I.14. Evolución temporal de los rendimientos medios reales (línea llena) y su tendencia lineal (br) comparada con los rendimientos estimados por el modelo (línea quebrada) y su tendencia lineal (bm), en el período 1966/1989.

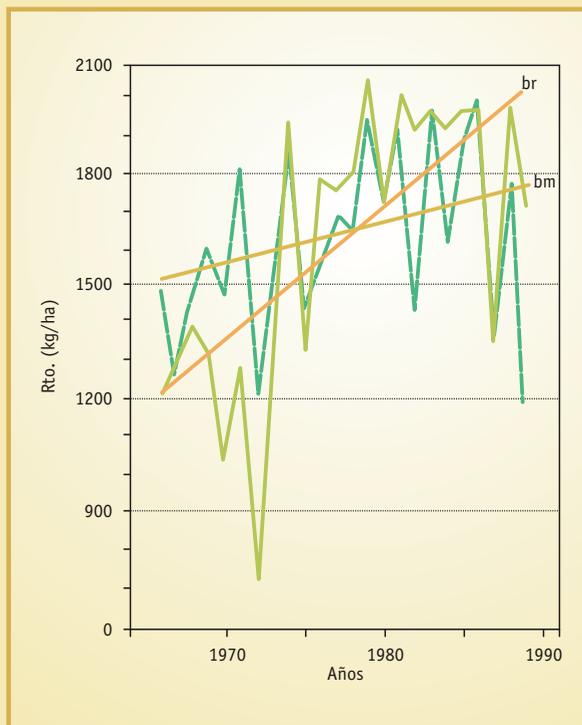
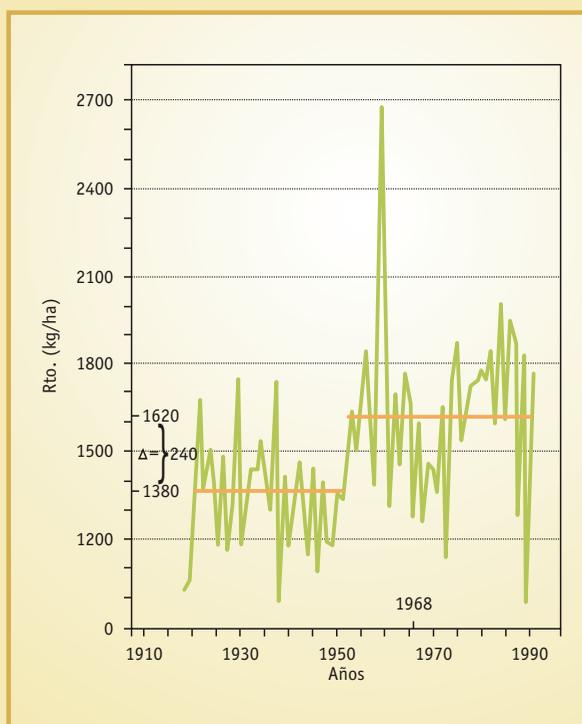


Gráfico I.15. Rendimientos promedios de soja simulados por el modelo multilínea en el período 1916/1989 y cambio en el promedio de largo plazo generado por el salto climático de la década de 1950.



últimas décadas. Este fue el mismo fenómeno que contribuyó a la expansión de la agricultura de granos hacia la región semiárida del este de la provincia en décadas recientes, (Minetti y Sierra, 1984).

### ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DEL NOA

El régimen térmico favorable para el cultivo de la soja en el NOA, permite valorar climáticamente la región sólo con índices agroclimáticos hídricos (Pascale *et al.*, 1979), metodología similar a la utilizada para la provincia de Tucumán (Pascale *et al.*, 1989). En este estudio se consideraron 77 estaciones pluviométricas de Salta y 17 de Jujuy, con un período de lluvias en su mayoría entre 1934 y 1978 (Bianchi, 1992) y 54 localidades de Tucumán para el período 1916-1980 (Pascale *et al.*, 1986).

Los valores pluviométricos mensuales de cada año se procesaron según el método de balance hidrológico seriado (Pascale y Damario, 1977), calculándose dos índices

agroclimáticos: el Índice de Sequía (Iss) y el Índice de Humedad (Ihs) (Pascale *et al.*, 1979).

$$Iss = \frac{\text{mm deficiencia en hHH 'h' (*) (p = 0.50)}}{\text{Nº días del hHH 'h' (p = 0.50)}} \times 30$$

$$Ihs = \frac{\text{mm de exceso en hHH 'h' (*) (p = 0.50)}}{\text{Nº días del hHH 'h' (p = 0.50)}} \times 30$$

(\*) período ER/EP x 100 entre valores superiores al 75%; donde ER es la evapotranspiración real y EP es la evapotranspiración potencial.

La combinación de los valores de Iss e Ihs para cada sitio generan diferentes calificaciones de aptitud agroclimática (Cuadro I.5).

La valoración de los suelos en su aptitud para el cultivo de la soja se estableció mediante cuatro categorías (Cuadro I.6).

Cuadro I.5. Condiciones de humedad y aptitud climática del NOA para el cultivo de la soja en secano.

Característica Hídrica Zonal	Valor de Iss	Aptitud Agroclimática	Valor de Ihs	Aptitud Agroclimática
Muy Húmeda	0	no apta	> 30	no apta
Húmeda	1 - 4	no apta a marginal	21 - 30	marginal
Sub-Húmeda Húmeda	5 - 8	apta	11 - 20	apta a marginal
Sub-Húmeda a Seca	9 - 12	apta a marginal	1 - 10	apta
Seca	> 12	no apta	0	no apta

Cuadro I.6. Criterios adoptados para valorar la aptitud de los suelos del NOA para el cultivo de la soja.

Aptitud Edáfica	Criterios de Valoración
<b>Apta</b>	Más del 50 % de la superficie es apta para el cultivo, ligeras a moderadas limitaciones o riesgos al uso y manejo de los suelos.
<b>Medianamente Apta</b>	Más del 50 % de la superficie es apta para el cultivo, moderadas a severas limitaciones o riesgos al uso y manejo de los suelos.
<b>Marginalmente Apta</b>	Entre el 25 % y 50 % de la superficie es apta para el cultivo.
<b>No Apta</b>	Menos del 25 % de la superficie es apta para el cultivo.

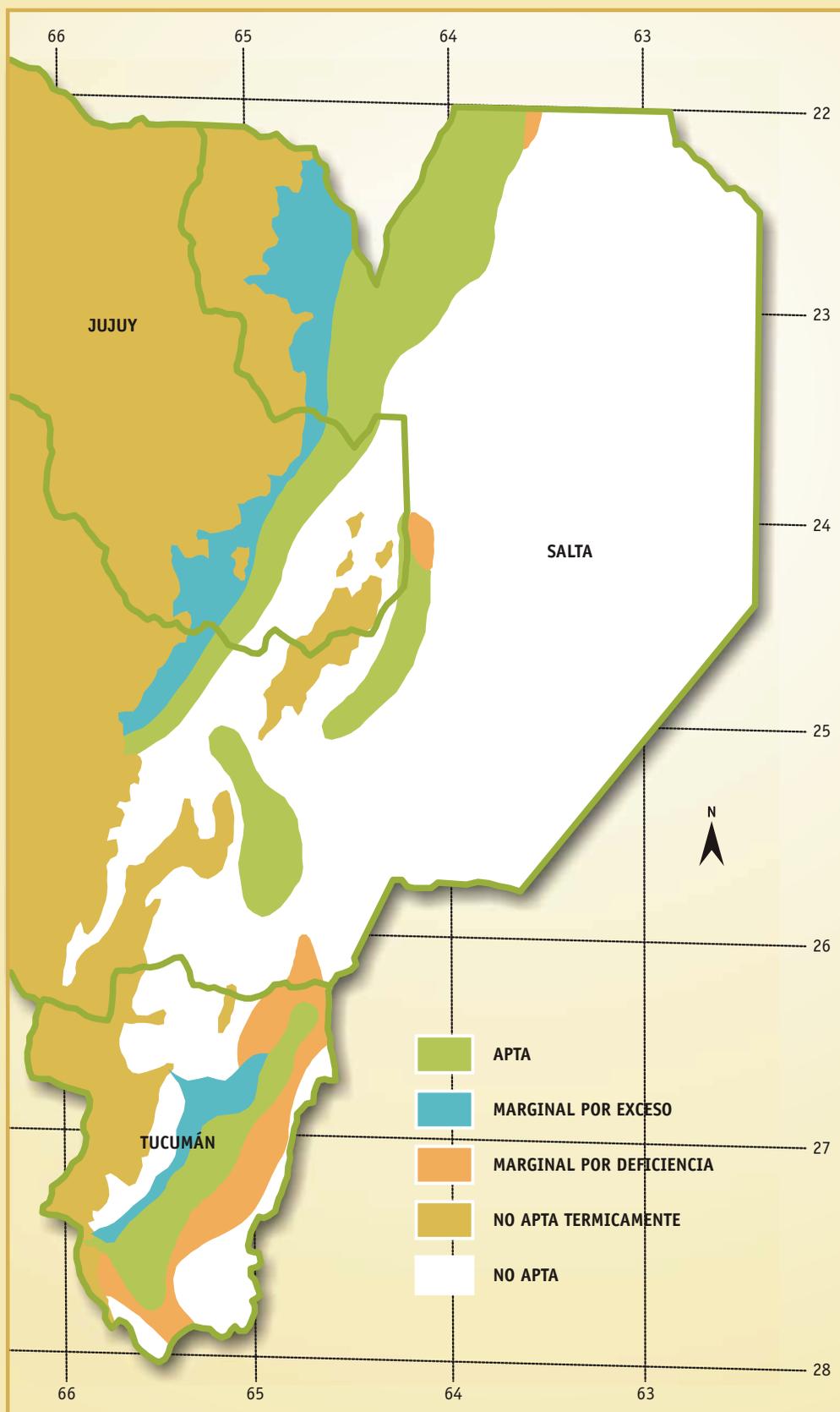
### APTITUD CLIMÁTICA

La carta de la Figura I.3 marca la diferente aptitud climática regional según la valoración resultante de la combinación de los Iss e Ihs, al considerar que los límites del cultivo señalan los Iss superiores a 12 e Ihs = 0 ó Iss = 0 e Ihs mayor de 30. Las combinaciones entre estos extremos califican las

áreas del NOA como: aptas, marginales por exceso hídrico, marginales por deficiencia hídrica y no aptas.

De norte a sur, entre los meridianos de 64° y 66° W, se encuentra una estrecha zona climáticamente apta, que a oriente linda con ineptitud por falta de agua y a occidente con áreas marginales por creciente exceso hídrico durante el ciclo vegetativo de la soja.

Figura I.3. Aptitud climática del NOA para el cultivo de la soja en seco.



## APTITUD EDÁFICA

Como consecuencia de distintas clases y grados de limitaciones al uso y manejo de los suelos, las tierras aptas para el cultivo de la soja en el NOA (Figura I.4) se localizan en áreas de los valles intermontanos, umbral al Chaco y sectores de la Llanura chaqueña en Salta y Jujuy y en la Llanura chacopampeana en Tucumán, correspondiendo, en general, a tierras desde suavemente inclinadas a casi a nivel, con suelos profundos, moderadamente a bien drenados, buena a mediana retención de agua, bien a moderadamente bien provistos de materia orgánica, reacción ligeramente ácida a ligeramente alcalina, presentando ligeras a moderadas limitaciones por riesgos de erosión hídrica y moderada a baja capacidad de retención de agua, en algunos suelos del área.

Las tierras medianamente aptas se localizan en valles intermontanos, pedemonte y sectores de la Llanura chaqueña. Se trata de tierras suavemente inclinadas u onduladas hasta a nivel, con suelos medianamente profundos, imperfecta o excesivamente drenados, presentando moderadas a severas limitaciones por riesgos de erosión hídrica, condiciones de drenaje, capacidad de retención de agua y salinidad.

Las tierras marginalmente aptas se localizan en áreas montañosas y en la Llanura chaqueña, siendo las limitaciones más importantes para el cultivo los riesgos muy severos de erosión hídrica, texturas extremas, exceso de agua en o sobre el suelo y/o contenidos salinos que superan los límites críticos en el 50 al 75 % de la superficie del área.

Las zonas no aptas corresponden en la mayor parte a tierras de relieve o salinidad excesivos para el cultivo en más del 75 % de la superficie.

## APTITUD ECOLÓGICA

La superposición de las Figuras I.3 y I.4 produce distintas áreas con aptitud ecológica diferente y que se representa en la Figura I.5.

Surge evidente que la zona ecológicamente óptima para el cultivo en Salta se reduce apreciablemente debido al déficit de humedad durante el período vegetativo, pues la buena aptitud edáfica es mucho más amplia. De igual forma en Tucumán, la mejor aptitud ecológica también representa escasa superficie, tanto por limitantes

hídricas como edáficas, siendo éstas últimas bien marcadas en el centro de la provincia. En Jujuy la pequeña franja climática apta es bien acompañada por la aptitud edáfica.

Las áreas de aptitud ecológica menos favorables (buenas, regulares y marginales) tienen una distribución acorde con las disminuciones de favorabilidad climática y/o edáfica, especialmente en Tucumán, en tanto que en Salta y Jujuy pasan bruscamente de la zona óptima a la no apta sin pasar por una zonificación intermedia, debido al pronunciado gradiente en disminución de la precipitación hacia el este o por la falta de definición de las unidades de suelos en las áreas pedemontanas lindantes con la isohipsa de 1500 msnm. Sin embargo, la marginalidad regional existe ya que, en años con favorabilidad climática, se observa un desplazamiento de las áreas cultivadas hacia el este a favor del aumento de las precipitaciones estivales, como aconteció en los años de la década del setenta. Este avance del cultivo en el NOA hacia oriente en áreas de características semiáridas con gran variabilidad en las precipitaciones anuales, son alternativas riesgosas para el equilibrio ecológico y la economía agrícola. No hay que olvidar que estas cartas de zonificación agroecológicas (Figura I.5) se trazan con la ocurrencia probable de la humedad basados en series pluviométricas extensas que incluyen todas las situaciones posibles sin considerar, separadamente, los ciclos húmedos o los secos.

El Cuadro I.7 muestra la superficie y la distribución porcentual de las distintas aptitudes ecológicas para la región NOA en su conjunto.

La superficie cultivada con esta oleaginosa podría extenderse hasta 920.000 hectáreas en las áreas óptimas y buenas, que representan un 7,6% de la región térmicamente apta. En esta superficie la soja debe competir por el espacio con importantes cultivos de la región, como caña de azúcar, citrus, hortalizas, tabaco, maíz y poroto.

La posibilidad de expansión en áreas regulares y marginales en el NOA, con 590.000 hectáreas (4,9% de la región térmicamente apta) cobra mayor importancia en Tucumán (461.000 hectáreas), que en Salta (89.000 Hectáreas) y en Jujuy (40.000 hectáreas). Esto exige la obtención y difusión de cultivares adaptados y la generación de tecnología agronómica más eficiente que permita mejorar la calificación de estas áreas.

Figura I.4. Aptitud edáfica del NOA para el cultivo de la soja en seco.

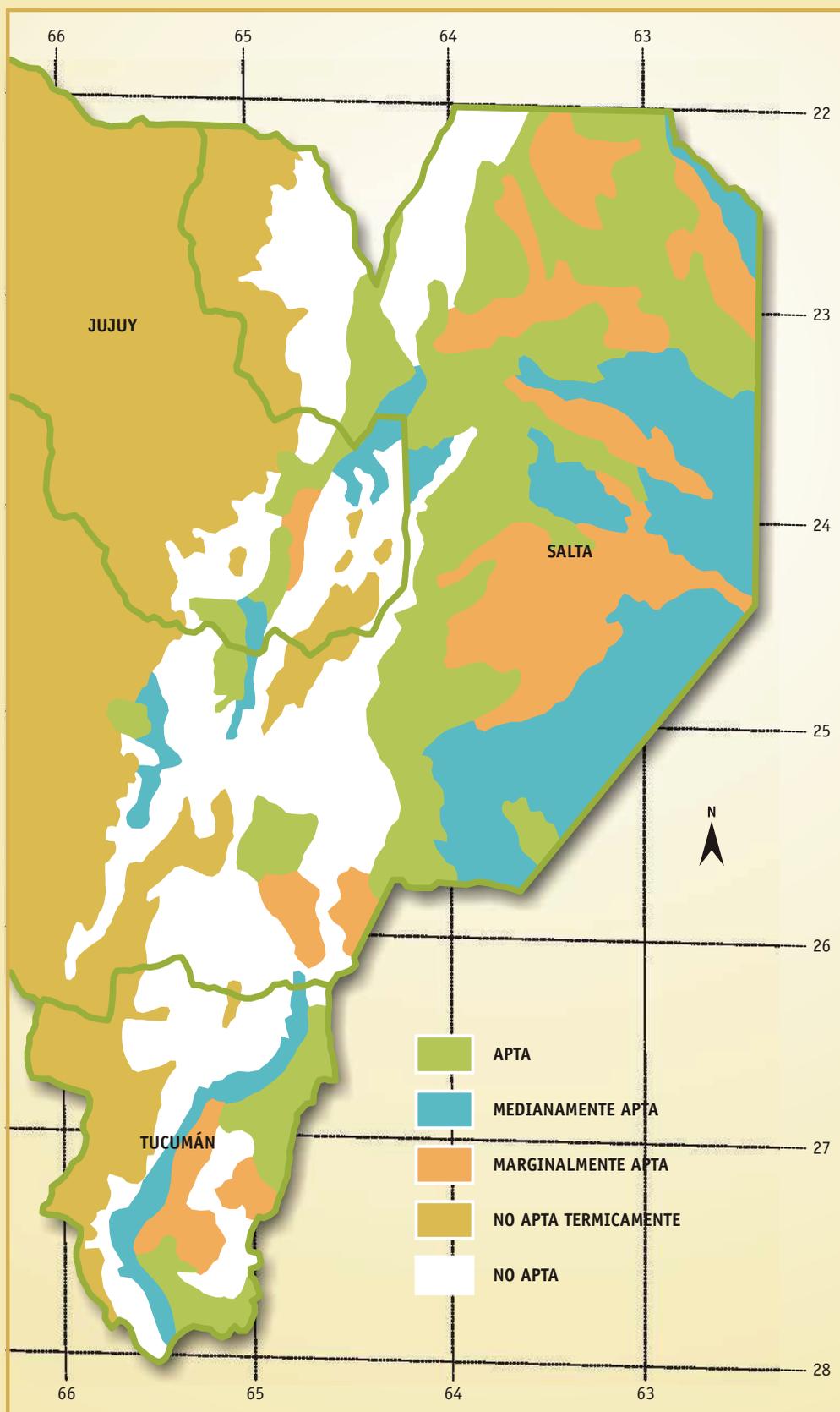
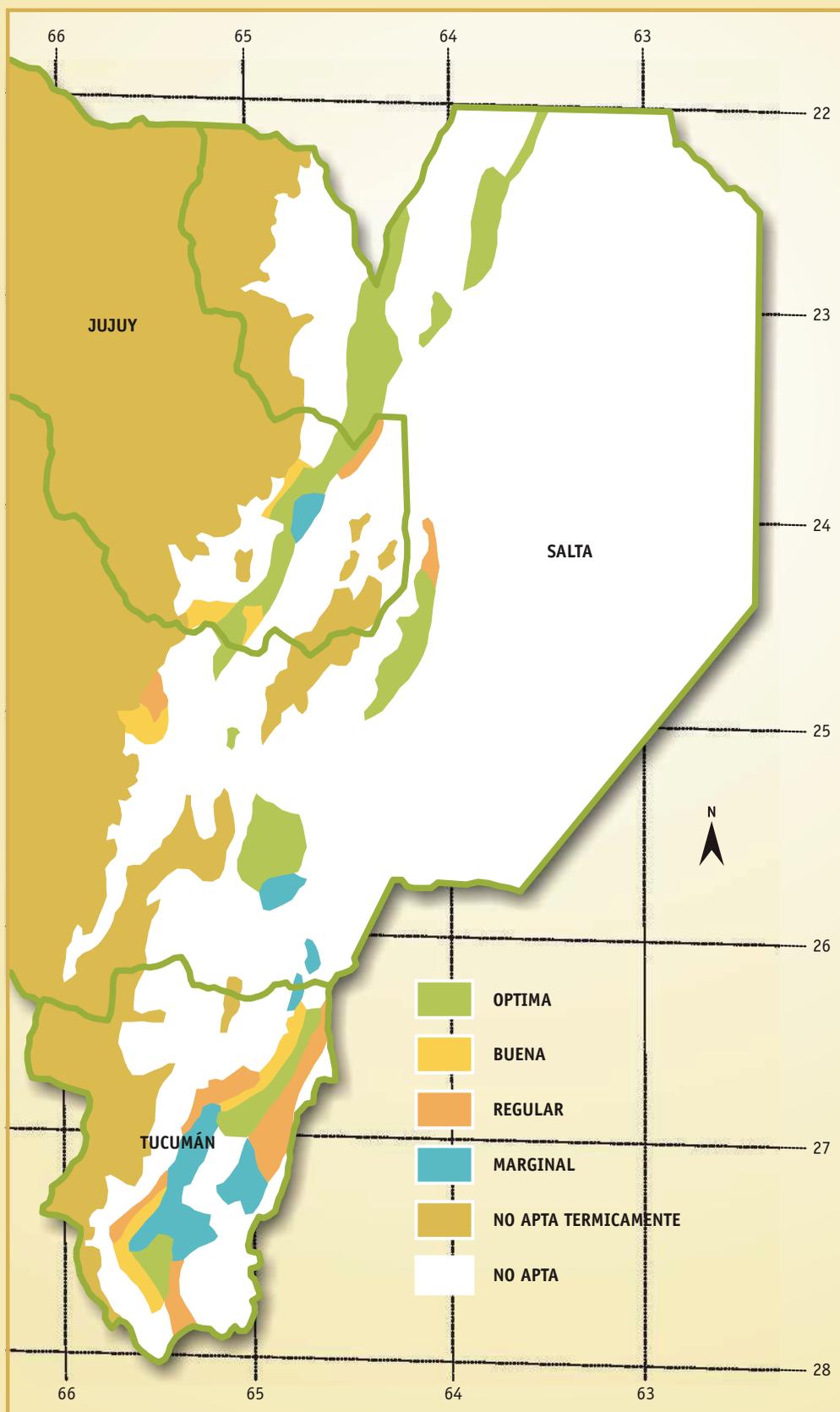


Figura I.5. Aptitud ecológica del NOA para el cultivo de la soja en seco.



Cuadro I.7. Inventario de las áreas correspondientes a las zonas ecológicas de la región del NOA para el cultivo de la soja en seco.

Zona	Superficie en Hectáreas		
	NOA		
	X 1000	% Sobre	
		Superficie Total	Superficie Térmicamente Apta
<b>Térmicamente no apta</b>	11.029	48,0	
<b>Térmicamente apta</b>	12.022	52,0	
<b>Óptima</b>	736	3,0	6,1
<b>Buena</b>	183	0,7	1,5
<b>Regular</b>	292	1,1	2,4
<b>Marginal</b>	298	1,2	2,5
<b>No Apta</b>	10.513	46,0	87,5

La Figura I.6 muestra la superficie cultivada con soja en la campaña 2002-2003 (elaborada por la Sección Sensores Remotos y SIG de la EEAOC, 2003) obtenida por procesamiento de imágenes satelitales. Puede verse que el sector oriental del área de cultivo se corresponde con zonas ecológicas no aptas exhibidas en la Figura I.5, lo que indica, tal como se señalara anteriormente, un mayor grado de riesgo en estas zonas incorporadas al cultivo.

### MODIFICACIÓN DE LA APTITUD AGROCLIMÁTICA SOJERA EN TUCUMÁN COMO CONSECUENCIA DEL SALTO CLIMÁTICO

En un estudio realizado por Lamelas *et al.*, (1995) se determinaron las modificaciones de la aptitud agroclimática de la provincia de Tucumán para el cultivo de la soja, como consecuencia del incremento de las precipitaciones evidenciado a partir de mediados de la década del 50.

Se utilizaron series de precipitaciones mensuales del período 1961-1990 correspondientes a 49 localidades, que abarcan el pedemonte y la llanura de la provincia de Tucumán y parte del oeste de Santiago del Estero. El resto de la metodología fue idéntica a la descripta anteriormente.

La Figura I.7a muestra la nueva zonificación por aptitud agroclimática para la soja, con las precipitaciones del período 1961-1990, en tanto que la Figura I.7b representa la zonificación anterior realizada con series de precipitaciones del período 1916-1980. Por comparación de ambas cartas se puede apreciar la importante transformación de la aptitud regional debida al salto climático de mediados de la década del 50.

Los valores del índice de sequía para la soja (Iss) disminuyeron significativamente en el período 1961-1990 y, en consecuencia, los límites de aptitud se desplazaron hacia el este de la provincia. Gran parte de la región limitante con Santiago del Estero, antes calificada como marginal por deficiencia, se transformó en apta, quedando con condición de marginalidad por sequía una angosta franja ubicada al sur, que penetra en la provincia en dirección este-oeste. La región no apta por deficiencia quedó relegada al sudeste de la provincia. A su vez, los valores del índice de humedad para la soja (Ihs) crecieron marcadamente, en particular en la zona pedemontana y oeste de la llanura. De tal manera el límite de marginalidad por exceso de agua se desplazó también hacia el este, abarcando en su mayor proporción a la zona cañera y a parte del área de cultivo de granos en el departamento de Burruyacú.

El incremento de los promedios de precipitación anual y del trimestre enero-marzo, en el período 1961-1990, resultó importante y mostró marcada irregularidad espacial. Este comportamiento de las precipitaciones, se reflejó en las variables determinantes de la aptitud agroclimática, produciendo:

- Aumento de la duración del período hídrico apto para el cultivo.
- Disminución de las deficiencias hídricas e incrementos de los excesos de agua acumulados en el período hídrico apto para el cultivo.

A pesar de la mejora de la aptitud agroclimática descripta, el nivel de riesgo continua siendo importante por la alta variabilidad interanual de las condiciones hídricas, lo que

Figura I.6. Área sojera del NOA en la campaña 2002/2003.

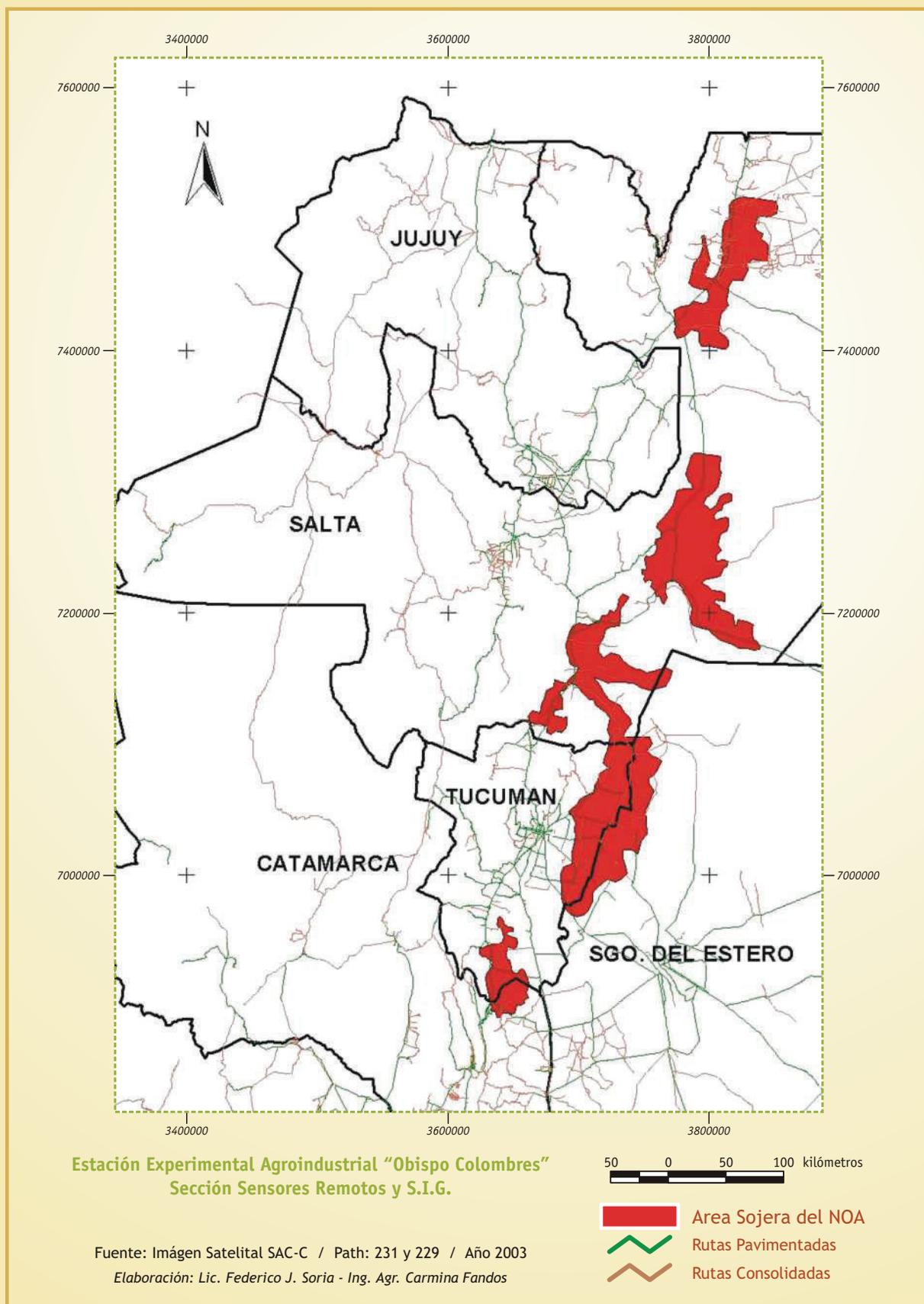
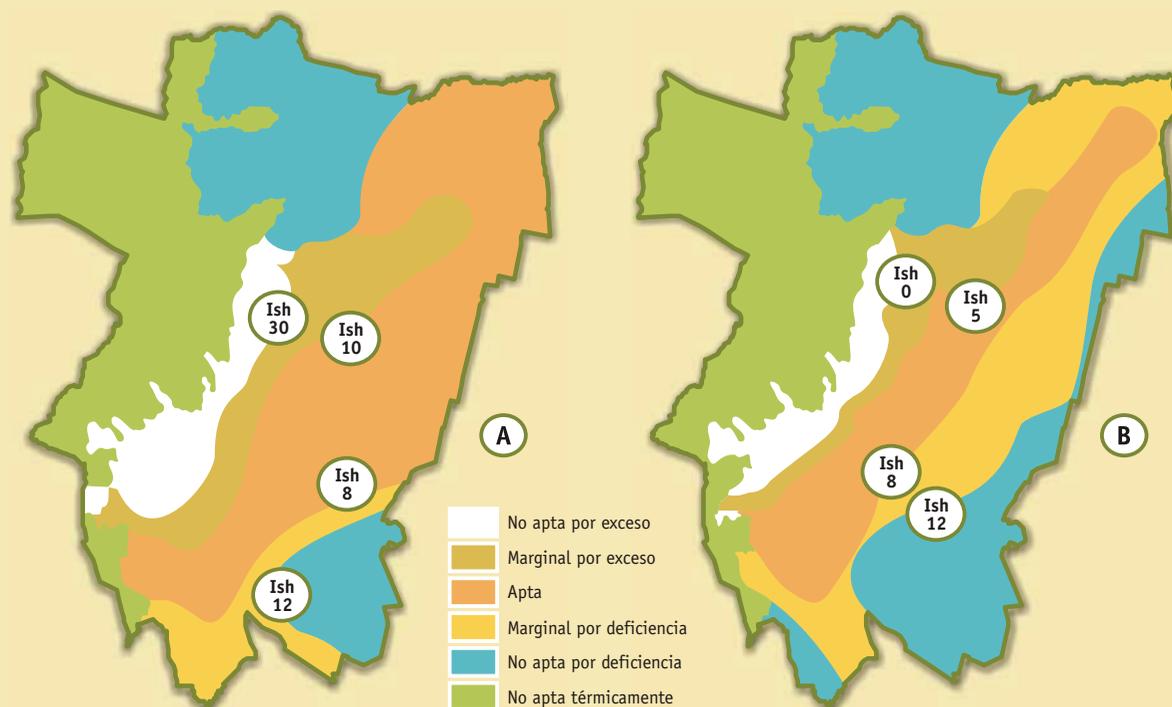


Figura I.7. Aptitud Agroclimática de la Provincia de Tucumán para el cultivo de la soja en seco.  
a) período 1961/1990. b) período 1916/1980.



implica la posibilidad de ocurrencia de sequías intensas o de excesos perjudiciales para el cultivo.

Así como un ciclo húmedo expandió las áreas aptas para el cultivo, un retorno a condiciones de menores precipitaciones, probable estadísticamente, podría afectar la productividad regional y especialmente las de aquellas áreas calificadas como marginales o no aptas con datos de series más extensas. Las evaluaciones de campañas con sequías, realizadas por la EEAOC, a través de los últimos 20 años, mostraron mayor severidad de afectación en áreas marginales, lo que podría avalar esta hipótesis.

### ESTIMACIÓN DE LA AGRESIVIDAD PLUVIAL EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN

El incremento de las precipitaciones que operó favorablemente para la habilitación de nuevas áreas al cultivo y que contribuyó en parte al incremento de los rendimientos en la región, implica también un aumento del riesgo de erosión hídrica. La erosión hídrica afecta a gran parte de los sistemas agrícolas del mundo, provocando pérdidas crecientes en el potencial productivo por la degradación de los suelos y daños en infraestructura hidráulica, vial, ferroviaria, energética, etc.

En la provincia de Tucumán la expansión de la frontera agrícola fue tan significativa en los últimos 30 años que, prácticamente, no quedan áreas aptas para incorporar a la producción (Soria y Fandos, 2003). De lo dicho se desprende que los procesos de erosión de los suelos tendrían un fuerte impacto socio económico.

Existen numerosos modelos para estimar las pérdidas de suelos por erosión hídrica. El más difundido es la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) (Renard, 1996), donde la contribución de las lluvias es valorada a través del factor R (Wischmeier, 1959). Este índice requiere de información pluviográfica, lo que limita marcadamente su utilización a escala geográfica debido a la escasez de este tipo de información. Las estimaciones realizadas para la Provincia de Tucumán corresponden a muy pocos sitios que sólo tienen representatividad local. A los fines de superar esta dificultad, se han generado índices que utilizan la información pluviométrica convencional para describir el efecto erosivo de las lluvias.

Con el propósito de estudiar este aspecto se utilizaron índices de agresividad pluvial aplicados a series pluviométricas convencionales de la provincia de Tucumán y algunas localidades vecinas de Salta y Santiago del Estero (Lamelas *et al.*, 2004 a y b). En una primera etapa se trabajó con los totales mensuales y

anuales de precipitación, de una serie que abarca todo el siglo 20, perteneciente a la localidad de San Miguel de Tucumán (26°48'S, 65°12'W, 481 msnm). Se seleccionaron tres índices de agresividad pluvial. En primer término, el Índice de Fournier (IF) (Fournier, 1960) que utiliza la precipitación media del mes más lluvioso y la precipitación media anual, según:

$$IF = \frac{p \text{ mex}^2}{P}$$

donde:

IF: Índice de Fournier.

p mex: Precipitación media del mes más lluvioso.

P: Precipitación media anual.

A los fines de evaluar la variabilidad interanual del IF, se aplicó la ecuación a todos los años de la serie. Además, para valorar la variación intra-anual se calcularon los IF para todos los meses del año, reemplazando p mex por el total del mes considerado.

En segundo término se trabajó con el Índice Modificado de Fournier (IMF), propuesto por Arnoldus (1978), que considera a todos los meses del año y se calcula según:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{pi^2}{pt^2}$$

donde:

IMF: Índice Modificado de Fournier.

pi: Precipitación media mensual.

Pt: Precipitación media anual.

La modificación propuesta considera aquellas situaciones donde hay más de un pico mensual de precipitación (regímenes bimodales) o bien existen varios meses lluviosos, como es el caso de la localidad en estudio.

Para evaluar la variabilidad interanual también se calcularon los IMF para todos los años de la serie, con idéntico criterio aplicado a la serie de IF.

Por último, se aplicó el Índice de Concentración de las Precipitaciones (ICP) propuesto por Oliver (1980), que se calcula de acuerdo a:

$$ICP = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{12} pi^2}{P^2}$$

donde:

ICP: Índice de Concentración de las Precipitaciones expresado como porcentaje.

pi: Precipitación media mensual.

P: Precipitación media anual.

Este índice estima la agresividad climática teniendo en cuenta la variabilidad temporal de las precipitaciones mensuales. Los valores del ICP varían desde 8,33 %, donde el promedio mensual de precipitación es idéntico en todos los meses, hasta 100% donde el total anual de las precipitaciones se concentra en un solo mes.

Una característica destacable del clima del lugar en estudio es la marcada variabilidad interanual de las precipitaciones y de los índices de agresividad pluvial, lo que puede apreciarse en el Cuadro I.8.

Cuadro I.8. Estadísticas de los índices de agresividad pluvial y sus componentes, para San Miguel de Tucumán en el período 1901/2000.

	P Anual	P Mex Anual	IF Anual	IMF Anual	ICP Anual
<b>Media Clima</b>		193,7	37,8	136,6	13,8
<b>Media Serie</b>	992,7	252,3	65,9	161,3	16,3
<b>Desvío Estand.</b>	230,9	69,7	26,3	41,4	1,9
<b>Coef. Variación</b>	23,3	27,6	39,9	25,7	11,9
<b>MÍNIMO</b>	463,2	90,1	17,5	77,4	12,2
<b>P = 0,01</b>	497,2	122,1	21,2	84,0	12,4
<b>P = 0,05</b>	609,2	151,7	32,2	103,9	13,4
<b>P = 0,10</b>	734,7	176,2	38,5	111,9	13,7
<b>MEDIANA</b>	986,8	242,9	59,7	157,5	16,3
<b>P = 0,90</b>	1299,2	366,0	106,0	223,6	18,5
<b>P = 0,95</b>	1391,3	376,7	116,0	237,5	19,5
<b>P = 0,99</b>	1474,1	387,4	128,9	257,0	22,3
<b>MÁXIMO</b>	1548,3	391,7	152,6	257,8	22,3

Los resultados obtenidos indican que los totales de precipitación por campaña agrícola (P Anual) mostraron una marcada variabilidad interanual y un crecimiento a partir de mediados de la década del 50, aspectos ya comentados.

El mes más lluvioso (p mex anual) tuvo un comportamiento similar al de los totales anuales, comprobándose un crecimiento marcado en la pluviosidad mensual (20,4% en promedio) en los últimos 45 años, lo que indicaría un incremento del riesgo de erosión hídrica. La frecuencia de ocurrencia del máximo valor en cada mes del año señala que, a enero le correspondió el 38% de los casos, seguido por 23% en diciembre, 17% en marzo, 16% en febrero, 4% en noviembre, 1% en octubre y abril, y ningún caso para el resto del año. Esto indica que el riesgo de erosión se concentra en el período diciembre-marzo, siendo en el resto del año escaso o nulo.

La alta asociación entre la precipitación máxima en 24 hs con p mex anual en el período 1970-1999 (Cuadro I.9), sugiere que éste último sería un buen indicador de la intensidad de las precipitaciones.

Cuadro I.9. Relaciones entre índices y variables de precipitación.

	P Anual	P Mex Anual	P Max 24
P Mex Anual	0,798		0,553
IF Anual	0,711	0,920	
IMF Anual	0,896	0,923	
ICP Anual	-0,102	0,377	

La asociación entre el IMF anual con P anual y p mex anual es la mas alta entre los índices probados (Cuadro I.9). Esto permitió inferir que, entre los métodos aplicados, el IMF sería el más adecuado para estimar la agresividad pluvial en nuestra región.

La contribución relativa de cada uno de los meses al IMF anual señala que los valores más elevados corresponden al período diciembre-marzo, que en conjunto contribuye en un 85%, y que el semestre octubre-marzo contribuye con el 95%. El resto del año no tiene efecto sobre la agresividad pluvial.

En una segunda etapa se propuso determinar, a partir de información pluviométrica convencional, la distribución espacial y la variabilidad de la agresividad pluvial en la Provincia de Tucumán.

Se utilizaron series pluviométricas mensuales y anuales de 115 localidades, distribuidas en la Provincia de Tucumán y en áreas colindantes de las provincias de Salta, Santiago

del Estero y Catamarca. La extensión de las series, que abarcan 30 años o más a partir de 1961, aseguran su representatividad.

Los datos se procesaron con un programa en hoja de cálculo, que permitió generar los índices de agresividad pluvial y la distribución de frecuencias empíricas. En este estudio sólo se consideró el Índice Modificado de Fournier (IMF).

Los valores de IMF se calificaron de acuerdo al siguiente criterio (Cuadro I.10):

Cuadro I.10. Calificación de los valores del Índice Modificado de Fournier (IMF), adaptado de Jordán y Bellinfante (2000).

IMF	Designación
$X < 90$	Bajo
$90 \leq X < 120$	Moderado
$120 \leq X < 160$	Alto
$\geq 160$	Muy Alto

Para la cartografía se consideraron los valores de IMF correspondientes a la probabilidad de ocurrencia del 50% (IMF50); 10 % (IMF10) y 90% (IMF90), y se incorporó a todos ellos la zonificación de unidades fisiográficas principales, digitalizadas por la Sección Sensores Remotos y SIG de la EEAOC (2003).

La Figura I.8 muestra que, en condiciones de años normales, los valores de IMF50, son muy altos en la ladera oriental del cordón montañoso, en todo el sector pedemontano y en el oeste y centro de la llanura. En el resto del área llana dominan los valores altos y algunos valores moderados en el oeste de Santiago del Estero. La Cuenca de Tapia-Trancas, ubicada en el centro-norte de la provincia, presenta índices moderados en su mayor extensión y sólo valores altos en algunos sitios del oeste de la cuenca. Para Tafí del Valle y los Valles Calchaquíes, ubicados al oeste de la provincia, los índices son bajos.

Al considerar IMF10 (Figura I.9) se observa que, en años muy secos, las categorías de menor agresividad pluvial se desplazan hacia el oeste. Los valores muy altos se concentran sólo en el sector centro-sur del pedemonte y laderas aledañas, dando para el resto del pedemonte valores altos y moderados. En la llanura, los índices altos se ubican en el centro-oeste y en algunos sitios que limitan con el pedemonte, en tanto que en el resto de esta región dominan los valores moderados y bajos. En la Cuenca de Tapia-Trancas, Tafí del Valle y Valles Calchaquíes los índices son bajos.

Figura I.8. Distribución espacial del IMF con probabilidad de ocurrencia del 50 %. Tucumán y zonas de influencia.

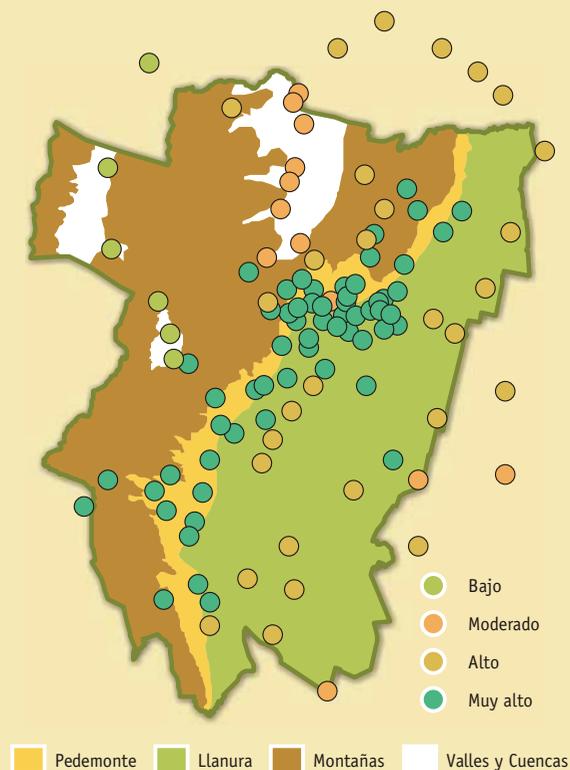


Figura I.10. Distribución espacial del IMF con probabilidad de ocurrencia del 90 %. Tucumán y zonas de influencia.

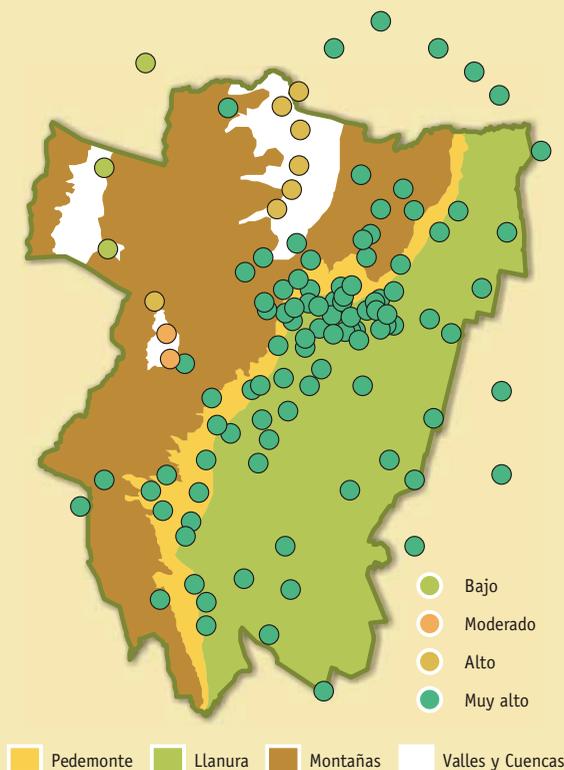
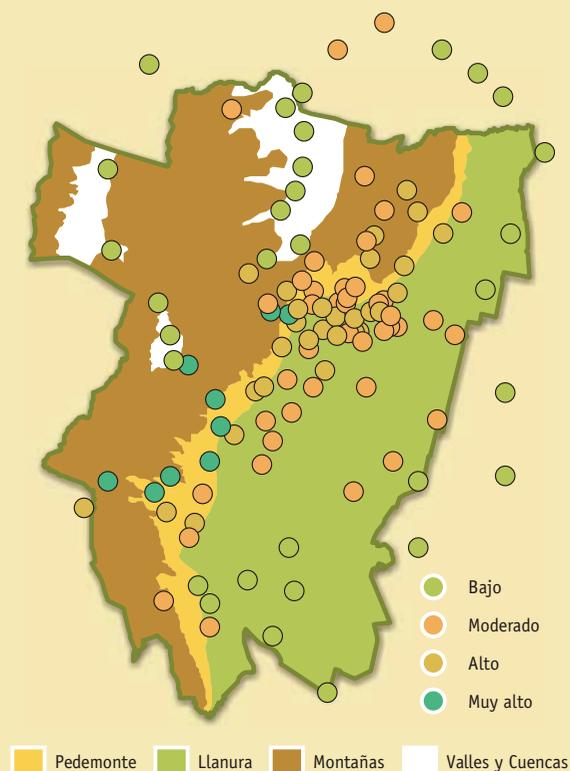


Figura I.9. Distribución espacial del IMF con probabilidad de ocurrencia del 10 %. Tucumán y zonas de influencia.



La Figura I.10 muestra la distribución territorial del IMF90, condición de años muy lluviosos, se observa un franco dominio de valores muy altos en las laderas orientales, pedemonte y llanura. En Tapia-Trancas los índices cambian a altos y muy altos. En Tafi del Valle los valores crecen a moderados y altos. Sólo en los Valles Calchaquíes, región más árida, permanecen valores bajos de agresividad pluvial.

### CONSIDERACIONES

- La provincia de Tucumán muestra una marcada variabilidad espacial y temporal de la agresividad pluvial, lo que indica que este es un factor muy importante en el manejo y conservación de los suelos.
- La región del pedemonte presenta los índices más elevados en todos los niveles de probabilidad considerados, lo que unido a la pendiente del terreno y las alteraciones de la cobertura vegetal natural, generan fuerte riesgo de erosión hídrica.
- En la región de la llanura, si bien los índices de agresividad disminuyen con respecto al pedemonte,

la probabilidad de ocurrencia de valores muy altos es importante. Esta es la zona donde la expansión de la frontera agrícola fue más significativa y, en consecuencia, requiere de prácticas de manejo adecuadas para generar sistemas de producción sustentables.

□ En la Cuenca de Tapia-Trancas y Tafi del Valle, áreas de clima semiárido, si bien predominan índices bajos a moderados, también puede esperarse valores altos y muy altos. En estas regiones, los suelos de escaso desarrollo y el grado de la pendiente generan un riesgo de degradación importante.

□ Los Valles Calchaquíes, con clima desértico, es la única región que muestra índices de agresividad pluvial bajos para todos los niveles de probabilidad considerados.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

□ Arnoldus, H. M. 1978. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. En: De Boodst M. y Gabriels D. (eds). Assessment of erosion. John Wiley y Sons, Inc. Chichester, Gran Bretaña, pp. 127-132.

□ Bianchi, A. R. y C. E. Yanez. 1992. Las precipitaciones en el Noroeste Argentino. 2ª edición. INTA EEA Salta.

□ Castañeda M. E. y V. Barros. 1994. Las tendencias de la precipitación en el cono sur de América al este de Los Andes. En: VI Reunión Argentina de Agrometeorología. Actas, pp. 49-50.

□ Fournier, F. 1960. Climat et erosion. Ed. Presses Universitaires de France. Paris.

□ Jordán, A. y N. Bellinfante. 2000. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). Edafología. 7 (3): 83-92.

□ Lamelas, C. M. y L. C. Suárez. 1988. Características hídricas del este tucumano en el período estival. Avance Agroind. 35: 2-6.

□ Lamelas, C. M., D. E. Gamboa, J. Manzur y F. R. Pérez. 1991. Rendimiento del cultivo de trigo en la provincia de

Tucumán: I modelo estadístico para su estimación. Pub. Misc. EEAOC. (89): 1-10.

□ Lamelas, C. M., L. C. Suárez y A. J. Pascale. 1993. Disponibilidad calórica para los cultivos en la Provincia de Tucumán. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. 70 (1-2): 29-40.

□ Lamelas, C. M., A. J. Pascale y L. C. Suárez. 1995. Modificación de la aptitud sojera en Tucumán, en el período 1961-1990, como consecuencia del salto climático. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. 72 (1-2): 57-62.

□ Lamelas, C. M., J. D. Forciniti, N. Colacelli y J. Delgado. 2004 a. Algunos índices de agresividad pluvial aplicados a la serie pluviométrica 1901-2000 de San Miguel de Tucumán. En: X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología. [CD Rom] Octubre de 2004. Mar del Plata, Argentina.

□ Lamelas, C. M., J. D. Forciniti, N. Colacelli y J. Delgado. 2004 b. Estimación de la agresividad pluvial en la Provincia de Tucumán-Argentina. En: X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología. [CD Rom] Octubre de 2004. Mar del Plata, Argentina.

□ Lucero, O. A. 1994. Inundaciones en Córdoba: Evidencia estadística de un cambio climático de las lluvias sobre la ciudad de Córdoba (Argentina). En: VI Reunión Argentina de Agrometeorología. Villa Carlos Paz, Córdoba. Actas: 77-79.

□ Minetti, J. L., R. A. Neder, J. A. Mariotti y C. A. Gargiulo. 1982a. Respuesta de la caña de azúcar a las condiciones del clima en Tucumán. Pub. Misc. EEAOC. (72): 1-44.

□ Minetti, J. L., R. A. Neder, C. A. Gargiulo y J. C. Sal Paz. 1982b. Impacto del clima sobre la producción de caña de azúcar en Tucumán. Pub. Misc. EEAOC. (72): 45-93.

□ Minetti, J. L. y E. M. Sierra. 1984. La expansión de la frontera agrícola de Tucumán y el diagnóstico climático. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. 61 (2): 109-126.

□ Minetti, J. L. y A. G. Poblete. 1989. El salto climático de la década de 1950 en Tucumán. Análisis de diagnóstico y consecuencias. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. 66 (1): 119-136.

- Minetti, J. L. y C. M. Lamelas. 1995. Respuesta regional de la soja en Tucumán a la variabilidad climática. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. 72 (1-2): 63-68.
- Minetti, J. L. 1995. Régimen de la variabilidad de la precipitación en el este de Tucumán y oeste de Santiago del Estero. III parte. El salto climático de la década de 1950 en la precipitación mensual. INTA, serie monográfica N° 2.
- Oliver, J. E. 1980. Monthly precipitation distribution: a comparative index. Prof. Geographer 32 (3): 300-309.
- Pascale, A. J. y E. A. Damario. 1977. El balance hidrológico seriado y su utilización en estudios agroclimáticos. Rev. Fac. Agron. La Plata, Argentina. 53 (1-2): 15-34.
- Pascale, A. J., O. D. Pórfido, E. M. Sierra y L. E. Torre de Fassi. 1979. Valoración mesoagroclimática del noroeste argentino para el cultivo de la soja. VI Reunión Técnica Nacional de Soja. Santa Fe, Argentina. Trabajos presentados. 1: 25-57.
- Pascale, A. J., G. S. Fadda, C. M. Lamelas y M. R. Casanova. 1986. Aptitud agroecológica del noroeste argentino para el cultivo de la soja. En: IV Conferencia Mundial de Investigación en Soja. Buenos Aires, Argentina. Actas 1: 142-150.
- Pascale, A. J., G. S. Fadda, C. M. Lamelas y M. R. Casanova. 1989. Aptitud agroecológica de la provincia de Tucumán para el cultivo de la soja. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. 63 (1): 1-22.
- Pascale, A. J., C. M. Lamelas y L. C. Suárez. 1990. Situaciones hídricas probables en el balance de agua de la región tucumana de cultivo en secano. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. 67 (2): 1-48.
- Rebella, C., E. Oyarzábal y E. Frutos. 1980. Influencia del clima sobre la producción de maíz en el partido de Pergamino. En: II Congreso nacional de maíz. Pergamino, Buenos Aires. Actas: 201-210.
- Renard, K. G. 1996. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation. Agricultural Handbook 703, USDA, USA.
- Shaw, L. H. y D. D. Durost. 1965. The effect of weather and technology on corn yields in the corn belt, 1929-62. USDA, Rep. (80).
- Sierra, E. M. y O. D. Pórfido. 1980. Factores que afectan los rendimientos en la región maicera argentina. Rev. Fac. Agr. UBA. 1(2): 49-64.
- Sierra, E. M. y S. M. Brynstein. 1989. Wheat yield variability in the SE of the province of Buenos Aires. Agr. And For. Met. 49: 1-11.
- Sierra, E. M., M. Conde Pratt, S. Pérez y C. Messina. 1994. Variaciones del régimen de precipitaciones del área cultivada con granos en la Argentina 1941-1990. En: VI Reunión Argentina de Agrometeorología. Villa Carlos Paz, Córdoba. Actas: 35-36.
- Soria, F. y C. Fandos. 2003. Superficies cultivadas y fronteras de expansión agrícolas Provincia de Tucumán. Proy. CFI, EEAOC, CONAE. Vol. 1. Informe Final.
- Thompson, L. M. 1963. Weather and technology in the production of corn and soybeans. Iowa State University. Center of Agricultural and Economic Development, Rep. (17).
- Thompson, L. M. 1969. Weather and technology in the production of corn in the U.S. corn belt. Agron. J. (61): 453-456.
- Torres Bruchmann, E. 1976. Áreas hídricas y el almacenaje de agua en la provincia de Tucumán. Rev. Agron. N. O. Argent. 13 (1-4): 37-60.
- Türkes, M. 1996. Meteorological Drought in Turkey: A historical perspective, 1930-19993. Drought Network News. 8 (3): 17-21.
- Wischmeier, W. H. 1959. A rainfall erosion index for a Universal Soil-Loss Equation. Soil Sci. Soc. Proc. 23: 246-249.



**ACOPIAMOS CONFIANZA**

---

---

**ACEITERA GENERAL DEHEZA S.A.**

**ACOPIOS TUCUMÁN y SALTA**

Ruta 303 - Km. 2 - (4111) Colombres - Tucumán - Tel. (0381) 4891004 / 4891010 / 4891011  
Juan Carlos Dávalos 490 - (4190) Rosario de la Frontera - Salta - Tel. (03876) 482366 / 482369

