



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

TESIS DE DOCTOR EN GEOGRAFIA

ESTIMACIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO EN CULTIVOS Y SU RELACIÓN CON  
RENDIMIENTOS EN LA REGIÓN PAMPEANA MEDIANTE IMÁGENES DE  
TEMPERATURA DE SUPERFICIE E ÍNDICE DE VEGETACIÓN

MAURO EZEQUIEL HOLZMAN

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2012

## PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Geografía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Geografía y Turismo durante el período comprendido entre el 9 de marzo de 2010 y el 2 de noviembre de 2012, bajo la dirección de la Dra. María Cintia Piccolo y el Dr. Raúl Eduardo Rivas de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

Ing. Mauro Ezequiel Holzman



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación  
Continua

La presente tesis ha sido aprobada el ....../...../..... , mereciendo la calificación de .....(.....)

***A mi familia...***

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta tesis doctoral finaliza un gratificante proceso de dedicación en el cual muchas personas han colaborado de distintas maneras. Por ello, quiero agradecer a:

Mi familia, por su incondicional apoyo moral durante el desarrollo del doctorado, especialmente a Fátima, a mi madre y mi padre.

Doctor Raúl Rivas, por dirigirme en mi doctorado y permitirme trabajar dentro del proyecto de la ANPCyT, por su ayuda constante, su continua predisposición y apoyo en la búsqueda bibliográfica, desarrollo de tareas, corrección de la tesis, etc., por su vocación de trabajo y enseñanza, por su calidad humana y por transmitirme no sólo conocimientos científicos, sino también valores humanos.

Doctora María Cintia Piccolo, por realizar las sugerencias adecuadas acerca del tema de trabajo, por su predisposición en la corrección de la tesis y por dirigirme en mis estudios doctorales y así poder desarrollar el doctorado en la Universidad Nacional del Sur.

ANPCyT por otorgarme la beca doctoral que permitió la concreción de este trabajo.

Dr. Luis Vives, director del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff” (IHLLA), lugar de trabajo durante mi beca doctoral.

A los compañeros de trabajo del IHLLA, por su apoyo y su gran calidad humana.

## RESUMEN

Los rendimientos de cultivos en la región pampeana argentina son frecuentemente afectados por la variabilidad en la disponibilidad de agua en el suelo. Así, surge la necesidad de desarrollar metodologías que permitan estimar las condiciones hídricas y su incidencia en los cultivos. En este sentido, la teledetección tiene la capacidad de brindar información espacial con la posibilidad de integrarla temporalmente.

El objetivo fue analizar la relación entre la disponibilidad de agua en el suelo y el rendimiento de cultivos de la región pampeana de La República Argentina mediante el TVDI, índice de estrés hídrico que combina la temperatura de superficie ( $T_s$ ) e índice de vegetación. Mediante imágenes producto Aqua/MODIS de  $T_s$ , composición de 8 días (MYD11A25) y de índice de vegetación mejorado (EVI), composición de 16 días (MYD13A25), de 1 km de resolución espacial, se calculó el TVDI para los períodos críticos de los principales cultivos de grano fino y grueso de las ecorregiones: Pampa arenosa, Pampa endorreica, Sierras septentrionales bonaerenses y Planicies poligenéticas de La Pampa. El estudio comprendió los meses de octubre a marzo de 2002-2003 (período húmedo), 2007-2008 (período seco), 2009-2010 y 2010-2011 (períodos normales).

En cuanto a los resultados, los mapas mensuales de TVDI mostraron que dicho índice es capaz de reflejar la variabilidad espacial y temporal de las condiciones hídricas en la región pampeana. Se confirmó la fuerte relación lineal entre dicho índice y el contenido volumétrico de agua en el suelo integrado a 10 y 20 cm de profundidad medido a campo. Los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) fueron 0,82 y 0,60 para dichas profundidades, respectivamente. En cuanto a los parámetros de la validación, la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) fue de 11%; bias (MBE), 11%; error relativo (RE), 0,38; índice de concordancia de Willmott ( $d$ ), 0,84 y  $r^2$ , 0,70. Estos resultados muestran la potencialidad del TVDI para el estudio hidrológico del sistema suelo-agua-planta. A su vez, el TVDI calculado con imágenes de 1 km se presenta como una metodología apta para el estudio de la humedad del suelo a escala regional, sin necesidad de información secundaria.

Se comprobó la buena correlación entre TVDI y rendimiento de soja, maíz y trigo en las 4 ecorregiones analizadas. Los parámetros de la validación fueron: RMSE entre 85 kg ha<sup>-1</sup> (13,5% del rendimiento medio) y 683 kg ha<sup>-1</sup> (19% del rendimiento medio); MBE entre 99 kg ha<sup>-1</sup> y 270 kg ha<sup>-1</sup>; RE entre 0,12 y 0,22; índice  $d$  entre 0,81 y 0,98 y  $r^2$  entre 0,68 y 0,84. Estos resultados son similares a los reportados en otros trabajos utilizando modelos más complejos. Además, se logró una adecuada estimación del rendimiento de trigo con 1 mes de anticipación y de 2-3 meses para el cultivo de maíz y soja. Estos resultados son comparables y aún más alentadores a los reportados en trabajos sustentados en métodos

tradicionales como el NDVI. Finalmente se brinda una metodología poco explorada en la región para el monitoreo hídrico del sistema suelo-planta-agua y la estimación del rendimiento de cultivos a escala regional.

## ABSTRACT

Crop yields in Pampa region are frequently affected by the variability in soil water availability. Thus, there is the necessity of easily applicable methods to estimate surface water conditions and its effect on crops. In this sense, remote sensing is able to provide spatial information with the possibility of integrating it temporarily.

The objective was to analyze the relationship between soil water availability and crop yield on Pampa Region of Argentina through TVDI, a stress index that combines land surface temperature and vegetation index. Through Aqua/MODIS global Land Surface Temperature (Ts) and Emissivity 8-day (MYD11A25) and Vegetation Indices 16-day L5 images global 1 km (MYD13A25), the TVDI was calculated for the main stage of growth of the main crops on sandy Pampa, endorheic Pampa, hilly Pampa and polygenetic plains of La Pampa. The study included months from October to March of 2002-2003 (wet period), 2007-2008 (dry period), 2009-2010 and 2010-2011 (normal period).

About results, the images of monthly TVDI shown that this index is capable to show the spatial and temporal variability of hydric conditions on Pampa region. On the other hand, the strong linear relationship between TVDI and soil water content on 10 and 20 cm depth was proved through data collected on an agricultural area in the centre of Buenos Aires province. The correlation coefficients were 0.82 and 0.60 for those depths, respectively. About the parameters of validation, root mean square error (RMSE) was 11%, bias (MBE), 11%, relative error (RE), 0.38, concordance index ( $d$ ), 0.84 and correlation coefficient ( $r^2$ ), 0.70. These results indicate the potential of the TVDI for hydrological studies of soil-water-plant system. Moreover, the TVDI at 1 km spatial resolution is suggested like a method suitable for analysis of soil moisture at regional scale, without auxiliary information.

On the other hand, a strong relationship between TVDI and crop yield variability was found on three of the most important crop (soy, maize and wheat) in the 4 analyzed ecorregions. The parameters of validation were: RMSE between 85 kg ha<sup>-1</sup> (13,5% of mean yield) and 683 kg ha<sup>-1</sup> (19% of mean yield); MBE between 99 kg ha<sup>-1</sup> and 270 kg ha<sup>-1</sup>; RE between 0,12 and 0,22;  $d$  index between 0,81 and 0,98 and  $r^2$  between 0,68 and 0,84. Such results were similar to those shown in other works with more complex models. Moreover, wheat yield could be estimated 1 and maize and soy 2-3 months before harvest. These results are similar or better than those obtained in other works using only NDVI. Finally, is intended to propose a

new method for the Pampa Region to monitor hydric conditions in soil-water-plant system and crop yield at regional scale.

# INDICE

Capítulo	Página
Capítulo 1 - INTRODUCCION .....	1
<b>1.1. Principios de la teledetección y su relación con la humedad del suelo.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Antecedentes .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Relación entre Ts e índice de vegetación .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4. Hipótesis de trabajo y objetivos .....</b>	<b>16</b>
Capítulo 2 –CARCTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO .....	<b>18</b>
<b>2.1. Contexto agrícola-productivo .....</b>	<b>18</b>
2.1.1. Generalidades .....	18
2.1.2. Evolución de la producción agrícola .....	20
2.2. Características edafoclimáticas de la región pampeana y zonificación .....	21
2.2.1. Pampa arenosa (D 27) .....	22
2.2.1.1. Paisaje .....	22
2.2.1.2. Clima .....	23
2.2.1.3. Suelos.....	24
2.2.1.4. Cultivos.....	24
2.2.2. Pampa endorreica (D 28).....	25
2.2.2.1. Paisaje.....	25
2.2.2.2. Clima .....	26
2.2.2.3. Suelos.....	26
2.2.2.4. Cultivos.....	26
2.2.3. Pampa ondulada (D 30).....	27
2.2.3.1. Paisaje.....	27
2.2.3.2. Clima .....	28
2.2.3.3. Suelos.....	28
2.2.3.4. Cultivos.....	28
2.2.4. Sierras septentrionales bonaerenses (D 33).....	29
2.2.4.1. Paisaje.....	29
2.2.4.2. Clima .....	30
2.2.4.3. Suelo .....	30
2.2.4.4. Cultivos.....	30
2.2.5. Pampa interserrana (D 34) .....	31
2.2.5.1. Paisaje.....	31
2.2.5.2. Clima .....	32

2.2.5.3. Suelos.....	32
2.2.5.4. Cultivos.....	32
2.2.6. Planicies poligenéticas de La Pampa (D 36).....	33
2.2.6.1. Paisaje.....	33
2.2.6.2. Clima .....	33
2.2.6.3. Suelos.....	34
2.2.6.4. Cultivos.....	35
<b>Capítulo 3 – METODO DE TRABAJO .....</b>	<b>37</b>
3.1. Análisis de la información satelital y caracterización de los productos MODIS .....	37
3.1.1. Imágenes de temperatura de superficie.....	37
3.1.1.1. Ecuación Split-Window .....	38
3.1.1.2. Validación y proceso de obtención del producto .....	40
3.1.2. Imágenes de Índices de vegetación.....	41
3.1.2.1. Base teórica.....	42
3.1.2.2. Obtención del producto.....	44
3.1.2.3. Correcciones angulares y períodos de composición .....	45
3.1.2.4. Validación .....	46
3.2. Procesamiento de las imágenes y cálculo del TVDI .....	46
3.2.1. Cálculo del Índice de sequedad en función de la temperatura y la vegetación (TVDI) .....	48
3.2.2. Obtención de las imágenes de TVDI y comparación con humedad del suelo .....	51
3.2.3. Relación entre rendimientos de cultivos y TVDI.....	53
3.2.3.1. Estimaciones de rendimiento utilizadas .....	57
3.2.4. Flujo metodológico integrado.....	58
<b>Capítulo 4 – RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>	<b>59</b>
4.1. Índice de sequedad en función de la temperatura y la vegetación (TVDI) .....	59
4.1.1. Límites húmedos y secos obtenidos .....	59
4.1.2. Imágenes de TVDI.....	65
4.1.3. Relación entre TVDI y humedad del suelo.....	69
4.1.4. Relación entre TVDI y rendimiento de cultivos.....	72
4.1.4.1. Ecorregión Pampa arenosa (D27).....	72
4.1.4.2. Ecorregión Pampa endorreica (D28).....	74
4.1.4.3. Ecorregión Sierras septentrionales bonaerenses (D33) .....	75
4.1.4.4. Ecorregión Planicies poligenéticas de La Pampa (D36).....	77
4.2. Modelo conceptual propuesto.....	82
<b>Capítulo 5 - CONCLUSIONES .....</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>91</b>



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Producción de maíz de los principales países productores durante 2010/2011 .....	1
<b>Figura 1.2.</b> Esquema de la captura de una imagen desde satélite.....	4
<b>Figura 1.3.</b> Esquema de la resistencia del cultivo ( $r_c$ ), la temperatura de superficie ( $T_s$ ) e intercambio gaseoso de la vegetación con la atmósfera en condiciones de: alta (izquierda) y baja (derecha) disponibilidad de agua en el suelo. ....	12
<b>Figura 1.4.</b> Esquema simplificado de la relación entre $T_s$ e índice de vegetación.....	13
<b>Figura 1.5.</b> Esquema conceptual del TVDI. Para un determinado píxel, el mismo se calcula como la proporción entre las líneas A y B. ....	15
<b>Figura 2.1.</b> Superficie sembrada a nivel nacional por cultivo y total en los trienios 1980-1983 y 2004-2007. ....	19
<b>Figura 2.2.</b> Incremento en el área sembrada y producción en Argentina en los últimos 18 años.....	21
<b>Figura 2.3.</b> Ubicación del área de estudio y ecorregiones de la unidad Pampas.....	23
<b>Figura 2.4.</b> Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Pampa arenosa. ....	25
<b>Figura 2.5.</b> Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Pampa endorreica. ....	27
<b>Figura 2.6.</b> Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Pampa ondulada.....	29
<b>Figura 2.7.</b> Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Sierras septentrionales bonaerenses.....	31
<b>Figura 2.8.</b> Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Pampa interserrana. ....	33
<b>Figura 2.9.</b> Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Planicies poligenéticas de La Pampa.....	36
<b>Figura 3.1.</b> Transmisión atmosférica a un ángulo de visión de 45° durante verano en latitudes medias (para una atmósfera con un contenido de vapor de agua: 2,9 cm y visibilidad de 23 km).....	39
<b>Figura 3.2.</b> Curva de reflectancia para una vegetación fotosintéticamente activa. ....	43
<b>Figura 3.3.</b> Relación entre productos MODIS, según distintos niveles de procesamiento (1A, 1B, L2...) de tierra y atmósfera requeridos para la obtención del MYD13A25.....	45
<b>Figura 3.4.</b> Pasaje de la proyección original sinusoidal (A) y re proyectada a coordenadas geográficas Lat/Long (B) sobre una imagen de EVI coloreada.....	47

<b>Figura 3.5.</b> Ubicación del área de estudio sobre un mosaico de EVI (9 a 24 enero de 2008).....	48
<b>Figura 3.6.</b> Ubicación de las subzonas utilizadas para la obtención de los límites húmedos y secos. ....	49
<b>Figura 3.7.</b> Ejemplo de píxeles seleccionados para el cálculo del límite seco.....	50
<b>Figura 3.8.</b> Ejemplo de píxeles seleccionados para el cálculo del límite húmedo.....	50
<b>Figura 3.9.</b> A) Estación de balance de energía sobre un cultivo de soja, B) sensor EC-10 H2O (Decagon Devices, Inc.).....	52
<b>Figura 3.10.</b> Ecorregiones y partidos/departamentos utilizadas en el cálculo de los ajustes entre TVDI y rendimiento de cultivos, imagen EVI de enero 2011.....	54
<b>Figura 3.11.</b> Ecorregiones y partidos/departamentos utilizadas en la validación de los ajustes entre TVDI y rendimiento de cultivos, imagen EVI de enero 2011.....	56
<b>Figura 3.12.</b> Flujo metodológico integrado desarrollado en la tesis.....	58
<b>Figura 4.1.</b> Comparación entre $T_s$ (rojo) en cuerpos de agua y $T_{smin}$ (azul) calculada para cada mes. ....	60
<b>Figura 4.2.</b> Dispersiones EVI/ $T_s$ utilizadas para el cálculo de los límites secos para las 24 imágenes mensuales analizadas. ....	61
<b>Figura 4.2.</b> Continuación.....	61
<b>Figura 4.2.</b> Continuación.....	62
<b>Figura 4.3.</b> Evolución temporal de (a) pendiente, (b) ordenada al origen de los límites secos y (c) $T_{smin}$ derivadas del promedio de $T_s$ en los píxeles de la parte inferior de los triángulos de dispersión.....	64
<b>Figura 4.4.</b> Evolución espacio-temporal de la disponibilidad de agua en el suelo, expresada a través de valores mensuales de TVDI. ....	66
<b>Figura 4.4.</b> Continuación.....	67
<b>Figura 4.5.</b> Porcentaje del área de estudio con condiciones de escasa humedad en el suelo (clases seco y muy seco de valores de TVDI) para los 4 períodos analizados. ..	69
<b>Figura 4.6.</b> Relación entre TVDI y la humedad del suelo relativa integrada a) 10 cm y b) 20 cm de profundidad. ....	70
<b>Figura 4.7.</b> a) Relación entre rendimiento de soja y TVDI acumulado de su período crítico en los partidos de Carlos Casares, Carlos Tejedor y Pellegrini (provincia de Buenos Aires), b) validación de las estimaciones de rendimiento en los partidos de General Viamonte, 25 de Mayo y Tres Lomas . ....	73
<b>Figura 4.8.</b> a) Relación entre rendimiento de soja y TVDI acumulado de su período crítico en base a datos de General Roca (provincia de Córdoba) y General Villegas (provincia de Buenos Aires), b) validación de las estimaciones de rendimiento para	

los departamentos de General López (provincia de Santa Fé) y Roque Sáenz Peña (provincia de Córdoba).....	75
<b>Figura 4.9.</b> a) Relación entre rendimiento de maíz y TVDI acumulado de su período crítico en base a datos de los partidos de Azul y Tandil (provincia de Buenos Aires), b) validación de las estimaciones de rendimiento calculadas en los partidos de Balcarce, Olavarría y Benito Juárez, provincia de Buenos Aires. ....	76
<b>Figura 4.10.</b> Relación entre rendimiento de trigo y TVDI acumulado de su período crítico, calculada en base a datos de los partidos de Azul y Tandil (provincia de Buenos Aires). ....	77
<b>Figura 4.11.</b> Relación entre rendimiento de maíz y TVDI acumulado de su período crítico calculada en base a datos de los departamentos de Trenel y Capital (provincia de La Pampa). ....	79
<b>Figura 4.12.</b> a) Relación entre rendimiento de trigo y TVDI acumulado de su período crítico departamentos de Capital y Trenel, b) validación de las estimaciones de rendimiento calculadas en base a datos de los departamentos de Capital y Realicó (provincia de La Pampa). ....	80
<b>Figura 4.13.</b> Modelo conceptual propuesto para la relación TVDI-rendimiento a partir de los resultados obtenidos.....	84
<b>Figura 4.14.</b> Ecorregiones y sus correspondientes ajustes aplicables para la estimación de rendimiento. ....	85
<b>Figura 1.</b> Imágenes mensuales de EVI utilizadas para el cálculo del TVDI. ....	103
<b>Figura 1.</b> Continuación.....	104
<b>Figura 2.</b> Imágenes mensuales de Ts utilizadas para el cálculo del TVDI.....	104
<b>Figura 2.</b> Continuación.....	105

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1.</b> Superficie de las áreas cultivadas utilizadas para el cálculo de los ajustes entre TVDI y rendimiento y su validación. ....	56
<b>Tabla 4.1.</b> Límites húmedos calculados para el conjunto de imágenes utilizadas en el estudio. ....	60
<b>Tabla 4.2.</b> Ecuaciones de los límites secos para las imágenes mensuales consideradas. .	63

# Capítulo 1

## INTRODUCCION

En los últimos 50 años a nivel mundial han ocurrido notables incrementos en la demanda global de alimentos y de proteínas de origen vegetal al triplicarse la población global, pasando de 2.500 millones de habitantes en 1950 a 6.770 millones en 2009 (Maddison, 2009). Así, el gran crecimiento de países como China e India los ha convertido en actuales y futuros polos de alta demanda de alimentos. Ante un escenario futuro de escasez de combustibles fósiles, a lo anterior habría que añadirle los requerimientos de granos para la producción de biocombustibles. Estos escenarios presentan para países con gran capacidad de producción agrícola, como Argentina, oportunidades y desafíos que implican una planificación a corto y largo plazo.

En los últimos años, Argentina se ha encontrado entre los 6 primeros países en cuanto a exportación de trigo, maíz, girasol y soja (Figura 1.1). El 94% de la producción de este último cultivo se exporta, lo que significa el 18% del total producido en el mundo (PNUD, 2009). Es importante destacar que la región pampeana es la zona de secano más productiva de la República Argentina, reuniendo más del 80% de esa producción de granos, concentrándose el resto en la llanura chaqueña (Magrin, et al., 2006; PNUD, 2009).

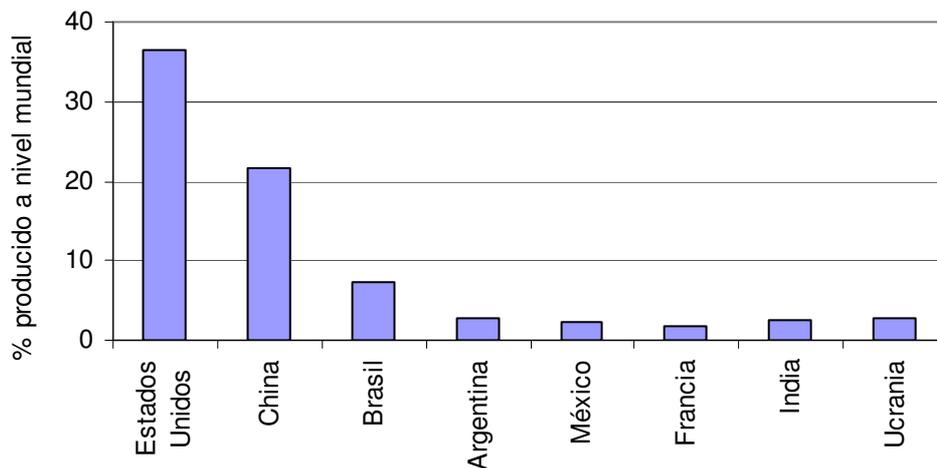


Figura 1.1. Producción de maíz de los principales países productores durante 2010/2011 (elaboración propia en base a datos de United States Department of Agriculture (USDA)).

A pesar de este contexto productivo y de que Argentina ha incorporado al sector agrícola tecnologías avanzadas de producción y gestión, la disponibilidad de agua en el suelo sigue siendo un factor limitante para la producción, pues la mayor parte de los cultivos se

desarrollan bajo secano. Así, la variabilidad en las precipitaciones incide frecuentemente en el rendimiento de los cultivos y consecuentemente en los volúmenes de producción de granos a nivel regional y nacional. Surge de esta manera la necesidad de desarrollar nuevas metodologías de estimación de las condiciones hídricas regionales y su incidencia en el rendimiento de cultivos con el fin de brindar herramientas para la planificación y gestión del sector productivo agrícola y económico en general.

En cuanto a los déficits de agua en los sistemas productivos, Moran (2004) ha definido el estrés hídrico de la vegetación como una disminución de las tasas potenciales de transpiración y fotosíntesis y finalmente del rendimiento debido a la escasez de agua. Clásicamente los métodos de monitoreo del estrés hídrico en cultivos requieren de medidas del contenido de agua en el suelo, las propiedades de las plantas o de variables meteorológicas para estimar la cantidad de agua perdida en el sistema suelo-planta durante un período dado.

Actualmente en Argentina se aplican este tipo de métodos, los que tienen un carácter puntual. A su vez requieren de datos auxiliares que frecuentemente no se encuentran disponibles o las estaciones meteorológicas no son suficientes para tales fines. Por otro lado, es necesario considerar que el estrés hídrico inevitablemente varía en el espacio básicamente por cambios en las propiedades de los suelos (almacenamiento, profundidad, etc.), en la topografía, en las cubiertas del suelo y por la heterogeneidad de las precipitaciones. Así, estos métodos tradicionales habitualmente presentan errores debido a la frecuencia y a la distribución espacial de los datos, por lo que tienen una aplicabilidad limitada a escala regional (Grayson y Western, 1998; Houser et al., 2002). A su vez, operativamente implican altos costos económicos (Waring y Running, 1998; Brocca et al., 2007). Así, una metodología lo más independiente posible de las medidas de terreno sería de suma utilidad para realizar estimaciones espacialmente extendidas de la disponibilidad de agua en el suelo y también como base para evaluar su relación con los rendimientos de los cultivos. En este sentido la teledetección tiene la capacidad de brindar información espacial de distintas variables hidrológicas con la posibilidad de integrarla temporalmente, lo que se ve potenciado actualmente por el acceso gratuito a imágenes satelitales desde distintos servidores de Internet (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>; <http://ladsweb.nascom.nasa.gov>, entre otros).

## 1.1. Principios de la teledetección y su relación con la humedad del suelo.

La teledetección consiste en la observación y la obtención de información de objetos de la superficie terrestre desde sensores a bordo de satélites, los cuales miden la energía electromagnética proveniente de dichos objetos. Esta herramienta se ha desarrollado notablemente en las últimas décadas debido a que no es necesario estar en contacto con la superficie a estudiar y a su cobertura global y periódica. Los elementos esenciales de la teledetección son el objeto a observar, el sensor y la energía electromagnética proveniente del objeto (Figura 1.2) ([Houspanossian, 2007](#)). En la citada figura, se observa que la radiación electromagnética proveniente del sol que entra en contacto con la superficie terrestre o las nubes puede ser reflejada por la superficie, absorbida y emitida o transmitida a otros objetos. A su vez, la radiación reflejada captada por el sensor depende no sólo de la reflectividad del objeto, sino de otros factores variables como el ángulo de iluminación, el relieve y la dispersión por los gases y partículas de la atmósfera (vapor de agua, ozono, polvo, humo, etc.). Cuando se estudian objetos de la superficie terrestre, es necesario tener en cuenta estos efectos y corregirlos previamente a la obtención de la información para lograr magnitudes físicas comparables entre las imágenes, tales como reflectividad o temperaturas. De esta manera básicamente la teledetección se fundamenta en la obtención de información de la superficie terrestre o las nubes a través de la captación de la energía reflejada y emitida por los objetos ([Sobrino, 2000](#); [Houspanossian, 2007](#)).

Con respecto a los sensores, existen de tipo pasivo y activo. En los primeros la energía captada por el sensor es la proveniente del sol y reflejada o emitida por los objetos. Dentro del segundo grupo se encuentran los sistemas de microondas, en los que la energía incidente sobre los objetos es emitida por el mismo sensor, para luego ser recibida y registrada.

En cuanto a la energía electromagnética, la misma puede ser caracterizada por su longitud de onda o por su frecuencia. A su vez existen rangos de longitud de onda o bandas donde la radiación electromagnética presenta un comportamiento similar. La distribución de estas bandas se conoce como espectro electromagnético, el cual comprende desde longitudes de onda corta, como los rayos X o gamma, hasta longitudes de kilómetros, como las ondas de radio. En cuanto a los objetos observados, cada material tiene un comportamiento específico dentro de cada banda del espectro. Así, la variación relativa de la energía reflejada o emitida por un material en función de la longitud de onda se denomina firma espectral. De esta manera, cada superficie se caracteriza por una curva de reflectividad y

emisividad espectral. En base a estas firmas espectrales la teledetección trata de discriminar las distintas coberturas (Sobrino, 2000). En el caso particular de la vegetación, su respuesta espectral diferencial en distintas bandas reflectivas (básicamente rojo e infrarrojo cercano) ha fundamentado el desarrollo de índices de vegetación que permiten el monitoreo de la vigorosidad y la salud de la vegetación. Así los cambios en el comportamiento reflectivo de este tipo de cubiertas son indicadores de su condición<sup>1</sup>. De esta manera los índices de vegetación brindan la posibilidad de estudiar los factores ambientales que influyen en el estado de la vegetación desde satélite, como por ejemplo la disponibilidad de agua y de nutrientes.

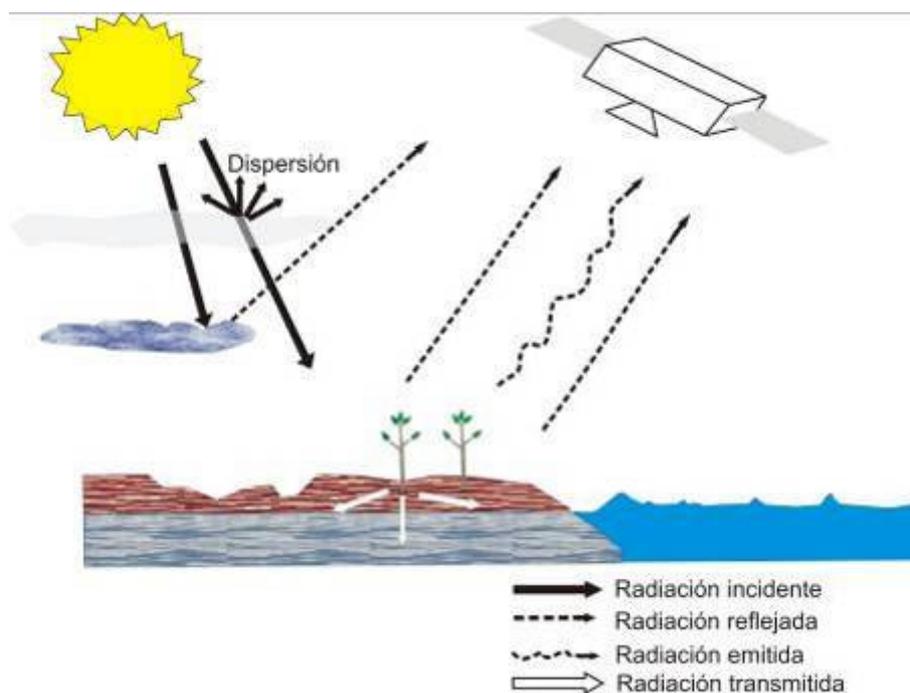


Figura 1.2. Esquema de la captura de una imagen desde satélite.

Con respecto a la energía emitida por los objetos, todo cuerpo que se encuentre a una temperatura mayor que el cero absoluto (273 K) emite energía. A su vez la energía emitida depende, entre otras, de su temperatura (Ley de Planck) y de la emisividad del cuerpo, propiedad esta última de cada tipo de cobertura. Así, un cuerpo emite más energía cuanto mayor es su temperatura. A su vez la longitud de onda a la que emite su máxima energía depende también de su temperatura. De esta manera, para las temperaturas observadas comúnmente en la superficie terrestre ( $\approx 300$  K), la banda del infrarrojo térmico del espectro (8 a 14  $\mu\text{m}$ ) contiene a su emisión térmica máxima y además es la menos sujeta a la absorción de los gases atmosféricos. Esto ha permitido la utilización del infrarrojo térmico en el estudio de los procesos determinantes de la temperatura de la superficie terrestre desde

<sup>1</sup> En el Capítulo 3 se abordará el tema de índices de vegetación.

satélite, como por ejemplo, los cambios en la humedad del suelo ([Sobrino, 2000](#); [Rivas y Caselles, 2005](#)).

En lo que refiere a la humedad del suelo, el agua que atraviesa la superficie del terreno ingresa al suelo y se distribuye por sus intersticios, quedando sometida a distintas fuerzas y fijándose de esta forma en mayor o menor grado al material sólido. Así, en el suelo hay agua adherida fuertemente a la fase sólida por fuerzas no capilares. Esta agua tiene poco interés desde el punto de vista productivo, pues no es utilizable por la vegetación, ya que la fuerza de succión de las raíces es inferior a la de retención del agua. Por otro lado existe agua retenida por fuerzas capilares. Esta es la que se encuentra en los finos espacios con aire y es la que tiene importancia para la vegetación pues puede ser extraída y aprovechada. Finalmente se encuentra el agua gravífica, la que no es retenida por el suelo y circula por gravitación, integrándose al agua subterránea ([Custodio y Llamas, 1983](#)).

Dentro del sistema suelo-agua-planta, el agua retenida por el suelo puede ser transferida hacia la atmósfera por evaporación desde el suelo o por transpiración a través de la vegetación. La diferencia fundamental entre estos dos procesos reside en que la vegetación puede ejercer controles fisiológicos de la transpiración ante una disminución en la disponibilidad de agua en el suelo ([Custodio y Llamas, 1983](#)). Como se tratará en el apartado 1.3, esa disminución en el agua del suelo puede inducir una disminución del crecimiento de la planta, pudiendo ser detectada desde satélite por medio de índices de vegetación. Por otro lado, esa falta de humedad produce cambios en el balance energético de la superficie, pues hay una proporción de la energía solar absorbida que no intervendrá en la evapotranspiración y se disipará en forma de calor, aumentando de esta forma la temperatura de la superficie ( $T_s$ ). Estos cambios en la  $T_s$  pueden ser detectados desde satélite a través de la energía emitida por la superficie y es el fundamento del uso de la banda del infrarrojo térmico para el estudio de la humedad del suelo ([Jackson, 1982](#); [Sandholt et al., 2002](#)).

## **1.2. Antecedentes**

Diversas técnicas basadas en la teledetección han sido desarrolladas para el seguimiento de las condiciones hídricas de superficie. Fundamentalmente éstas emplean la información captada en la región del infrarrojo térmico, infrarrojo cercano, visible o microondas del espectro electromagnético. En el caso de los sensores de microondas tienen la ventaja de poder captar información en todas las condiciones meteorológicas, contrariamente a los que captan en otras bandas del espectro, que necesitan cielo despejado ([Mallick et al., 2009](#)). La principal desventaja de las microondas es la baja resolución espacial (aproximadamente de

25 km). Por otro lado, los sensores de microondas activos tienen mejor resolución espacial (10 m a 30 m) pero presentan un período de revisita de entre 16 a 25 días. Entonces, los esfuerzos se centran en estudios que usan información del espectro solar (visible, infrarrojo cercano y medio) y térmico dado que éstos presentan una adecuada resolución espacial y temporal para el seguimiento de las condiciones de humedad del suelo (Mallick et al., 2009).

Para el monitoreo de las condiciones hídricas existen distintos índices de estrés hídrico basados en la energía emitida y reflejada por la superficie en distintas bandas del espectro. En este sentido, el desarrollo de metodologías fundamentadas en la emisión en el infrarrojo térmico, aproximadamente a partir de la década del '70, ha posibilitado el estudio de la vegetación y de la humedad disponible en el suelo. Estudios teóricos previos habían establecido que para cubiertas de vegetación el proceso determinante de su temperatura era la transpiración (Idso y Backer, 1967). De esta forma, el enfriamiento por transpiración cumple un papel fundamental como determinante de la temperatura. Estas conclusiones fueron el fundamento de la utilidad del infrarrojo térmico para el estudio de este tipo de cubiertas y para distintas aplicaciones como la planificación del riego y el monitoreo de la salud de los ecosistemas. En estudios posteriores la información en el infrarrojo térmico ha sido frecuentemente asociada a la humedad del suelo y por lo tanto al flujo de evaporación (Nemani et al., 1993; Carlson et al., 1995; Sandholt et al., 2002; Boulet et al., 2007). Así surgieron distintos índices capaces de brindar información sobre el estrés hídrico de la vegetación. Entre ellos se pueden mencionar al CWSI (Crop Water Stress Index) (Jackson et al., 1981; Jackson, 1982), obtenido a partir de las diferencias entre la temperatura del cultivo y la del aire en función del déficit de presión de vapor. Con respecto a este índice, Moran (2004) ha señalado que, como asume que la temperatura de superficie y la aerodinámica son iguales, en los casos en que es calculado en base a medidas de satélite sería aplicable sólo en condiciones de cobertura total de vegetación, donde la temperatura captada desde satélite es igual a la de la vegetación. Otro índice es el WDI (Water Deficit Index), el cual es una adaptación del CWSI para áreas parcialmente vegetadas (Moran et al., 1994).

Por otro lado, estudios recientes de aplicación de la teledetección en la evaluación de la humedad del suelo han sugerido que la combinación de datos de distintas regiones del espectro puede brindar información más robusta que el uso de una sola parte del espectro electromagnético (Anderson et al., 1997; Moran et al., 1997; Han et al., 2010, entre otros). Así surgieron índices de estrés hídrico fundamentados en la combinación de la energía emitida en el infrarrojo térmico y la reflejada en el visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Uno de estos índices es el índice de sequedad que es función de la temperatura y de la cubierta vegetal (TVDI, por sus siglas en inglés) (Sandholt et al., 2002),

que presenta la ventaja de poder ser computado directamente desde datos de satélite, sin la necesidad de información auxiliar (Moran, 2004). Dicho índice es tradicionalmente calculado a partir de la temperatura de superficie (Ts) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) (ver sección 1.3).

Para estudios de la humedad del suelo y el estado de la vegetación a escala regional y de paisaje los sensores de resolución espacial moderada, como NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y Terra y Aqua/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) son de gran utilidad, pues tienen períodos de revisita aproximadamente de 1 día. La mayor parte de los estudios se han realizado con imágenes NOAA-AVHRR, sin embargo sensores más nuevos como los que están a bordo de TERRA/AQUA deben ser aún explorados en mayor profundidad para aplicaciones de este tipo. En este sentido, Patel et al. (2009) investigaron la capacidad del TVDI calculado con imágenes MODIS para evaluar la humedad del suelo en la zona subhúmeda de India. Chen et al. (2011) estimaron el contenido de humedad en la parte superficial del suelo en una zona semihúmeda de China a través del TVDI, utilizando imágenes producto MODIS de Ts de 8 días y NDVI. Estos autores encontraron relaciones lineales negativas entre TVDI y la humedad medida a distintas profundidades, con un  $r^2$  máximo de 0,43 para 10-20 cm de profundidad. Sin embargo, los mismos autores señalan posibles errores ocurridos en el estudio que habrían llevado a ese bajo coeficiente de determinación, como el desajuste entre el período de toma de los datos a campo y de toma de las imágenes y por la falta de una exacta correspondencia entre los sitios de muestreo y los píxeles de las imágenes. Estos autores hallaron además que la evolución del TVDI fue consistente con la evolución fenológica de los cultivos de la zona y con las precipitaciones, descendiendo este índice después de eventos de este tipo. Han et al. (2010) también estimaron la relación entre TVDI y contenido de humedad del suelo en China regionalmente utilizando imágenes productos MODIS de NDVI de 16 días y Ts de 8 días, logrando una fuerte relación lineal entre esos dos parámetros.

Por otro lado, Sandholt et al. (2002) compararon el patrón de TVDI con la humedad del suelo simulada en el Norte de Senegal a escala de paisaje, encontrando una fuerte relación entre temperatura y NDVI. Goward et al. (2002) también encontraron una buena relación entre series de tiempo de TVDI y la humedad superficial del suelo simulada con un modelo complejo de simulación de transferencia entre suelo-vegetación-atmósfera. Mallick et al. (2009) calcularon la humedad volumétrica de superficie en áreas cultivadas de distintos estados de India a través del índice SWI (Soil Wetness Index), índice similar al TVDI. Dichos autores lograron mejores resultados en las estimaciones a escala regional utilizando

imágenes MODIS/Aqua de 1 km de resolución que para la escala de paisaje utilizando imágenes ASTER.

En relación a los estudios realizados en Argentina, [Cárcova et al. \(1998\)](#) estimaron la humedad del suelo a nivel de potrero a través del CWSI en cultivos de maíz de la región pampa ondulada bajo distintos esquemas de irrigación. Hallaron una relación negativa entre estas dos variables con un  $r^2$  de 0,52 y pudieron definir puntos críticos de humedad del suelo en los que el cultivo disminuía su transpiración afectando el rendimiento. [Rivas y Houspanossian \(2006\)](#) estimaron las condiciones hídricas de superficie en la región pampeana a través del TVDI calculado con imágenes NOAA-AVHRR y Aqua/MODIS. Comprobaron la aptitud de dicho índice para estimar tales condiciones a escala regional al contrastar los valores del mismo con los datos obtenidos en parcelas de referencia con sensores infrarrojo térmico y con humedad del suelo. [Girolimetto et al. \(2011\)](#) estimaron la fracción evaporativa (relación entre la evapotranspiración y la energía disponible) en Santa Fe con el TVDI utilizando imágenes de distinta resolución espacial, concluyendo que con píxeles de 1x1 km se pueden definir adecuadamente los parámetros necesarios para el cálculo de dicho índice. [Vazquez y Rivas \(2010\)](#), evaluaron el comportamiento de los índices de estrés CWSI, WDI y TVDI frente a cambios en la humedad del suelo en el centro de la provincia de Buenos Aires a través de medidas de humedad realizadas en campo. Estos autores utilizaron imágenes Terra/MODIS para el cálculo de los índices y concluyeron que el TVDI es el más adecuado para evaluar el grado de estrés hídrico en parcelas de superficies mayores a 1 km<sup>2</sup>.

Por otro lado existen trabajos desarrollados en Argentina que analizan, a escala de potrero, el efecto de la disponibilidad de agua y el rendimiento de diferentes cultivos. [Fioretti et al. \(2010\)](#) demostraron las limitaciones en el rendimiento de trigo debido a la baja disponibilidad de agua en la zona semiárida de la región pampeana, hallando que los máximos rendimientos se observaban en los años más húmedos. [Varillas et al. \(2010\)](#) y [Bredan y Egli \(2003\)](#) también mostraron a nivel de potrero la disminución del rendimiento en cultivos de soja por la escasez de agua, debiéndose fundamentalmente a una reducción en el número de semillas por planta.

En cuanto a la estimación de rendimiento de cultivos, la utilidad de la teledetección ha sido ampliamente demostrada a través de trabajos realizados en distintas partes del mundo. Desde la década del '80 tradicionalmente el monitoreo de los cultivos y el pronóstico de sus rendimientos se ha basado en el uso del índice de vegetación NDVI ([Tucker et al., 1980](#); [Quarmby et al., 1993](#); [Doraiswamy y Cook, 1995](#); [Boken y Shaykewich, 2002](#); [Mkhabela et al., 2005](#); [Moriondo et al., 2007](#)). En base a este índice una variedad de métodos han sido

desarrollados incluyendo modelos biofísicos de simulación del cultivo. La principal desventaja de estos modelos es que típicamente requieren numerosos datos de entrada como las características del suelo, datos agrometeorológicos, entre otros, para simular el crecimiento y desarrollo del cultivo (Moriondo et al, 2007). Por otro lado, los métodos basados en regresiones estadísticas son los más comúnmente utilizados en teledetección (Wall et al., 2007). Estos métodos están sustentados en relaciones empíricas entre los rendimientos históricos e índices de vegetación. La ventaja que presentan es su fácil aplicación y que no requieren de muchos datos de entrada. Su desventaja es que dichas relaciones tienen carácter local y no son fáciles de extender a otras áreas (Doraiswamy et al., 2003). Aún así son preferidos por su fácil implementación y el bajo requerimiento de datos auxiliares.

El supuesto fundamental detrás de este tipo de modelos empíricos basados en índices de vegetación es que la capacidad de fotosíntesis de la vegetación, estimada espectralmente a través de estos índices está directamente relacionada al rendimiento. Esto se basa en el hecho de que las condiciones ambientales pueden afectar el desarrollo de la planta y en última instancia, al rendimiento y que los cambios en la biomasa fotosintéticamente activa pueden ser medidos efectivamente a través de tales índices (Tucker, 1979). Las limitaciones de estas aproximaciones fundamentadas tradicionalmente en el NDVI es que las estimaciones del rendimiento frecuentemente son inexactas si se considera todo el período de desarrollo del cultivo. Además en áreas con vegetación muy vigorosa dicho índice se satura a valores de índice de área foliar de 4 (Wang et al., 2005), tornándolo inadecuado para el seguimiento de tales cubiertas.

Entre los primeros trabajos de estimación de rendimiento utilizando índices de vegetación se pueden mencionar a Fischer (1975), quien encontró que el rendimiento de trigo podía ser estimado en función del área foliar al comienzo de la etapa reproductiva, la que se corresponde con el tiempo de máxima área foliar verde del cultivo. Tucker et al. (1980) hallaron relaciones significativas entre rendimientos de trigo y el NDVI integrado durante la estación de crecimiento y determinaron que la correlación más fuerte ocurrió durante el tiempo de mayor área foliar verde.

Estos trabajos sentaron las bases para una serie de investigaciones posteriores en las que se utilizó este tipo de índices. Así, Mahey et al. (1993) encontraron que los valores de NDVI durante la máxima cobertura de vegetación estaban fuertemente correlacionados y en forma lineal con los rendimientos de trigo. Rasmussen (1997) desarrolló en Senegal un modelo de regresión lineal de estimación de rendimientos de mijo basado en el NDVI. Manjunath et al. (2002) desarrollaron modelos de regresión lineal para pronosticar rendimientos en el Norte

de India en base a NDVI derivado de imágenes NOAA-AVHRR, a datos de precipitaciones y datos de rendimiento. [Boken y Shaykewich \(2002\)](#) mejoraron un modelo preexistente de pronóstico de rendimiento de trigo incorporándole datos de NDVI diario, hallando que el NDVI medio durante el pico de crecimiento era el que mejor explicaba las fluctuaciones del rendimiento. [Basnyat et al. \(2004\)](#) en las praderas de Canadá encontraron significantes correlaciones entre NDVI y rendimiento de distintos cultivos y determinaron que el NDVI de 1 mes previo a la cosecha era el más relacionado con el rendimiento. [Maselli y Rembold \(2001\)](#) utilizaron también modelos de regresión basados en el NDVI para estimar rendimientos de trigo a escala regional en el Norte de África. También en África, [Lewis et al. \(1998\)](#) encontraron que la producción de maíz en Kenia podría ser estimada usando el NDVI. En China, [Ren et al. \(2008\)](#) calcularon los rendimientos de trigo a través de la regresión entre el NDVI acumulado durante la etapa de crecimiento de diferentes cultivos y las estadísticas de producción a nivel de provincia. [Becker-Reshef et al. \(2010\)](#) evaluaron los rendimientos de trigo en Kansas a través de una relación lineal entre NDVI y estadísticas oficiales de rendimiento. Estos resultados luego fueron aplicados exitosamente para el pronóstico de rendimientos en la zona triguera de Ucrania. [Quarmby et al. \(1993\)](#), [Hayes y Decker \(1996\)](#), [Unganai y Kogan \(1998\)](#) y [Baez-Gonzalez et al. \(2002\)](#) también reportaron que la producción de maíz puede ser estimada en forma adecuada previamente a la cosecha usando el NDVI en Grecia, el cinturón maicero de Estados Unidos, Simbabwe y México, respectivamente. Estos últimos autores reportaron que la producción puede ser calculada con 1 ó 2 meses previos a la cosecha.

Otros autores que muestran la fuerte relación entre NDVI y rendimiento de cultivos son [Rasmusen \(1992\)](#); [Groten \(1993\)](#) y [Ma et al. \(2001\)](#). [Benedetti y Rossini \(1993\)](#) y [Mkhabela et al. \(2011\)](#) han señalado que el mejor período para estimar el rendimiento de diferentes cultivos es la etapa de floración y llenado de grano, pues dichas etapas comprenden la fase más crítica para la producción, con lo cual la escasez de agua durante los mismos resultaría en considerables reducciones del rendimiento. [Prasad et al. \(2006\)](#) en Estados Unidos realizaron la estimación de rendimientos fundamentándose en el NDVI, humedad del suelo, temperatura de superficie y precipitaciones. Hallaron coeficientes de determinación de 0,78 para rendimientos de maíz y de 0,86 para cultivo de soja.

No obstante el amplio uso de los índices de vegetación en la estimación de la productividad de la vegetación, estos índices en general son indicadores conservativos de la afectación de la vegetación debida a variaciones de corto tiempo en la humedad del suelo. Esto se debe a que la incidencia de tales condiciones en la capacidad fotosintética se hace detectable cuando los déficits o excesos se encuentran en etapas avanzadas ([Gillies y Carlson, 1995](#)). Contrariamente, la  $T_s$  es mucho más dinámica, incrementándose rápidamente bajo

condiciones de estrés (Goetz, 1997). Esto se fundamenta en el hecho de que bajo condiciones de no estrés el agua transpirada por las plantas se evapora y enfría las hojas. Contrariamente, en situación de déficit hídrico poca agua es transpirada y la temperatura de la hoja aumenta (Idso y Baker, 1967). Clawson y Blad (1982), entre otros autores, han señalado que pequeños aumentos en la temperatura es un indicador del comienzo del estrés hídrico en la vegetación.

Esto ha sido el fundamento de la aplicación de distintos índices calculados a partir de datos meteorológicos y otros que combinan información de satélite al estudio del rendimiento. Kirnak y Dogan (2009) analizaron el efecto de distintos niveles de irrigación sobre el rendimiento de melón monitoreando el estrés hídrico a través del CWSI, calculado a partir de datos de campo. Observaron una reducción de la productividad a medida que se intensificó el estrés y hallaron una relación lineal inversa entre rendimiento, la evapotranspiración del cultivo y dicho índice. O'Shaughnessy et al. (2011) a través de dicho índice también obtuvieron en áreas irrigadas relaciones lineales negativas con el rendimiento de soja con  $r^2$  entre 0,83 y 0,88.

En diversos trabajos recientes (Nemani et al., 1993; Sandholt et al., 2002; Carlson, 2007) se ha utilizado la combinación de  $T_s$  e índices de vegetación para el estudio en forma integrada de la condición de la vegetación y su producción. Unganai y Kogan (1998), relacionaron un índice de condición de vegetación y de temperatura, calculado a partir del NDVI y la  $T_s$  de imágenes NOAA-AVHRR, con el rendimiento de maíz en el sur de África. Hallaron una fuerte correspondencia entre estos índices y los eventos de precipitaciones. A su vez, detectaron fuertes correlaciones con el rendimiento de maíz (0,70-0,95) en las zonas en las que éste era el principal cultivo. En zonas donde el maíz no era el cultivo dominante las correlaciones fueron menores (0,30-0,50). También hallaron que para esos dos índices había momentos en los que la correlación era más alta, los cuales coincidían con la etapa de madurez del maíz.

### **1.3. Relación entre $T_s$ e índice de vegetación**

Como se detallará en el Capítulo 3, la vegetación tiene una clara respuesta espectral en la región del rojo e infrarrojo cercano, la que está vinculada a la densidad de clorofila en sus hojas. Como esta densidad a su vez se relaciona con la tasa a la cual la cubierta vegetal puede fijar dióxido de carbono y agua en forma de carbohidratos a través del proceso de fotosíntesis, los índices de vegetación calculados a partir de medidas de satélite brindan información de la capacidad fotosintética de la cubierta vegetal. Se entiende por capacidad fotosintética a la tasa bruta fotosintética del dosel de la vegetación bajo condiciones

específicas de iluminación sin limitaciones por factores ambientales (Tucker y Sellers, 1986), por lo que este parámetro indica un límite máximo de fotosíntesis de la cubierta vegetal. No obstante, en condiciones reales la tasa actual de fotosíntesis está frecuentemente limitada por factores ambientales, como la disponibilidad de agua en el suelo. Paralelamente, el ingreso de dióxido de carbono y la salida de vapor de agua durante la fotosíntesis se realiza a través de los poros de los estomas de las hojas. Así las plantas que experimentan estrés por escasez de agua generalmente controlan la apertura de sus estomas, aumentando la resistencia del cultivo ( $r_c$ ) a la pérdida de vapor de agua e incidiendo de esa forma también en la incorporación de carbono (Farquhar y Sharkey, 1982). Esa reducción en la pérdida de agua por cierre o disminución generalizada de la abertura de los estomas produce aumentos en la  $T_s$  del dosel de vegetación que pueden ser detectados desde satélite a través de la información captada en la región del infrarrojo térmico del espectro. Cuando la vegetación no experimenta estrés hídrico no se presentan barreras al transporte de vapor de agua, tendiendo la  $r_c$  y la  $T_s$  del dosel de vegetación a un mínimo (Figura 1.3).

Cabe destacar que si bien la relación entre la  $T_s$  y la humedad superficial del suelo no es lineal, ésta última es un factor crítico en los mecanismos determinantes de la primera (Sandholt et al., 2002). Para el caso de superficies parcialmente vegetadas y suelo desnudo, la  $T_s$  es principalmente determinada por el contenido de humedad del mismo, a través de su incidencia en el control evaporativo y la inercia termal (capacidad calorífica y conductividad termal) de la superficie.

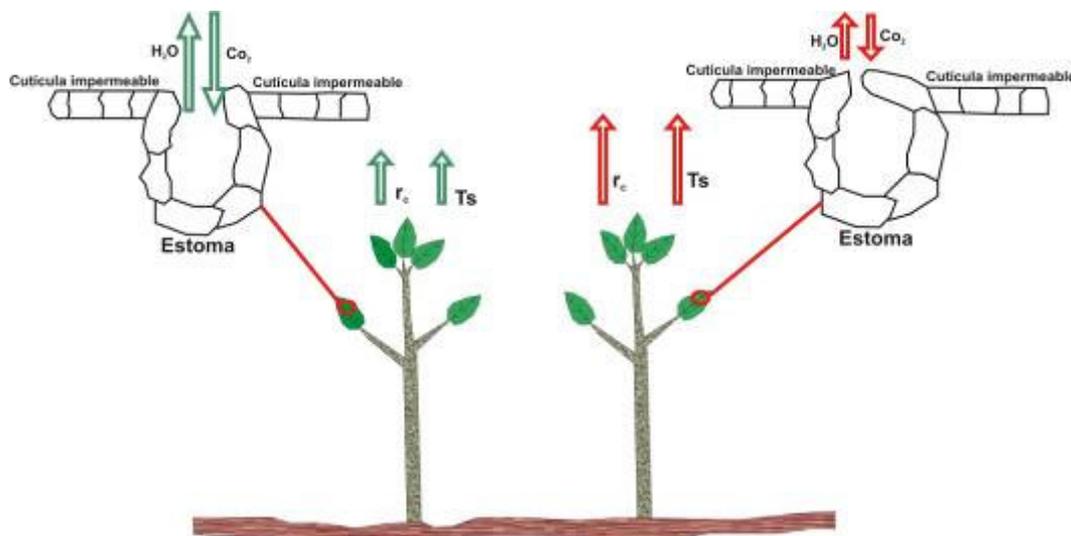


Figura 1.3. Esquema de la resistencia del cultivo ( $r_c$ ), la temperatura de superficie ( $T_s$ ) e intercambio gaseoso de la vegetación con la atmósfera en condiciones de: alta (izquierda) y baja (derecha) disponibilidad de agua en el suelo.

Varios autores (Nemani y Running, 1989, 1997; Nemani et al., 1993; Carlson et al., 1994; Clarke, 1997; Goetz, 1997, Han et al., 2010, entre otros) han evaluado el contenido de

humedad en el suelo a través de la relación entre  $T_s$  e índices de vegetación estimada desde satélite. La mayor parte de ellos ha mostrado que generalmente estos dos parámetros responden a una función lineal, pues en condiciones secas, a medida que el índice de vegetación se incrementa por aumento de la densidad y vigor de la vegetación, la  $T_s$  disminuye en la vegetación expuesta al sol con respecto al suelo desnudo, creando así una pendiente en la relación  $T_s/NDVI$  (Carlson, 2007). En condiciones de alta humedad superficial del suelo la  $T_s$  es baja y similar tanto para suelo desnudo como para vegetación, dando una relación plana entre  $T_s$  y  $NDVI$  (Nemani et al., 1993). De esta forma, si condiciones suficientemente variables de humedad y de grados de cobertura de vegetación son representados gráficamente, el espacio de dispersión de  $T_s$  en función del índice de vegetación muestra frecuentemente una forma triangular (Carlson et al., 1995; Gillies y Carlson, 1995; Sandholt et al., 2002; Mallick et al., 2009; Han et al., 2010) (Figura 1.4).

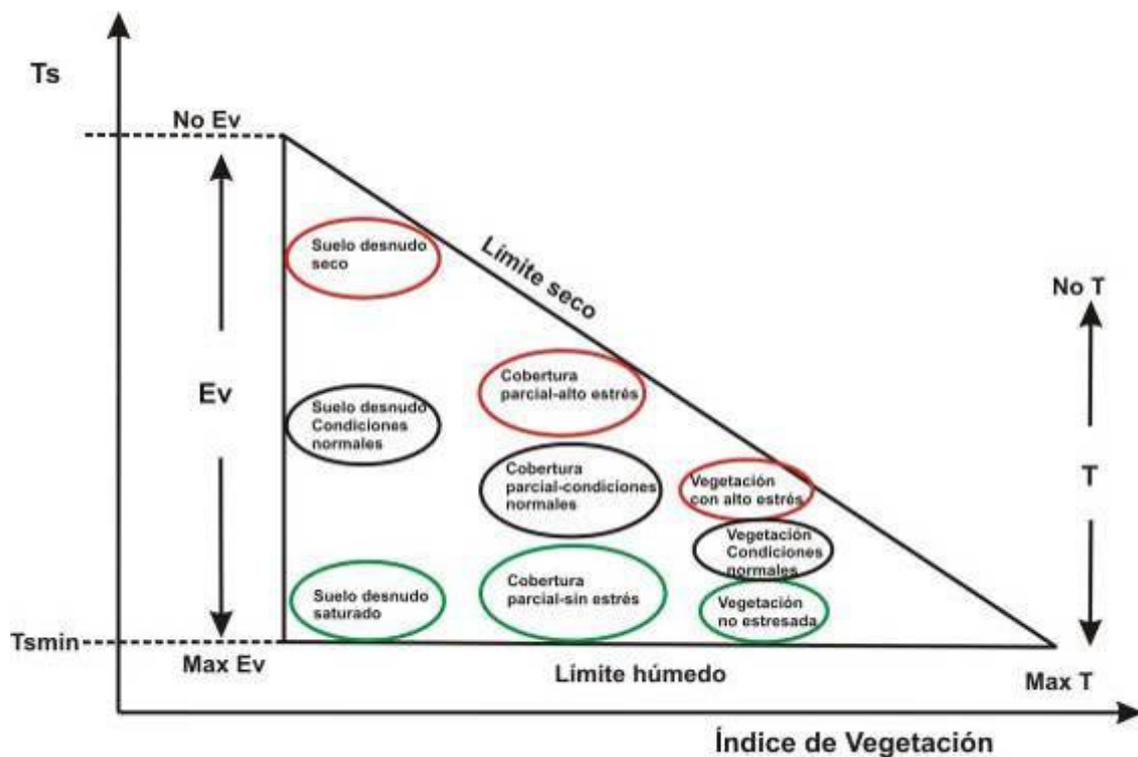


Figura 1.4. Esquema simplificado de la relación entre  $T_s$  e índice de vegetación (adaptado de Sandholt et al. (2002)).

En dicho triángulo pueden definirse una serie de límites que representan condiciones extremas de humedad del suelo y evapotranspiración. Así, la hipotenusa o denominado límite seco corresponde a píxeles con máximas temperaturas para un determinado grado de cobertura de vegetación, es decir representa los píxeles más secos en la imagen. Los píxeles cercanos a este límite representan superficies altamente estresadas, con escasa disponibilidad de agua en la zona radical y por lo tanto escasa evapotranspiración. Contrariamente, el extremo inferior o límite húmedo comprende los píxeles con menor  $T_s$

para un determinado valor de índice de vegetación, es decir, representa superficies con distintos grados de cobertura vegetal evapotranspirando a su máxima capacidad. El límite vertical izquierdo o línea de suelo describe superficies sin vegetación con distintos grados de humedad: suelos saturados en los que la evaporación es máxima ( $T_s$  mínimas) y suelos secos en los que el efecto de enfriamiento por evaporación es escaso o inexistente ( $T_s$  máximas). Entre dichos extremos se encuentra un conjunto de condiciones intermedias que pueden ser determinadas por la posición de los píxeles dentro del triángulo.

Siguiendo los conceptos anteriores, en el espacio triangular  $T_s$ /índice de vegetación pueden identificarse isolíneas de condiciones de humedad del suelo (Figura 1.5). De esta forma, para obtener información acerca de dicha variable, se puede definir el índice de sequedad en función de la temperatura y la vegetación (TVDI, por sus siglas en inglés) (Sandholt et al., 2002):

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s \min}}{T_{s \max} - T_{s \min}} \quad (1.1)$$

donde  $T_s$  es la temperatura (K) observada para un píxel dado;  $T_{s \min}$  es la mínima temperatura de superficie en el triángulo y define el límite húmedo;  $T_{s \max} = a.EVI + b$  es la máxima temperatura observada para un valor dado de EVI y  $a$  y  $b$  son parámetros de superficie propios de la imagen que definen el límite seco como una relación lineal entre los datos (Figura 1.5). Dicho índice asume un valor de 1 en el límite seco (limitada disponibilidad de agua) y 0 en el límite húmedo (sin limitaciones de humedad). Cabe aclarar que, como se detallará en el Capítulo 3, la ecuación de TVDI propuesta por Sandholt et al. (2002) que originalmente contempla al NDVI fue modificada en el presente trabajo utilizando el EVI en vez de NDVI por presentar ventajas con respecto a este último, como la consideración del efecto atmosférico y menor posibilidad de saturación con vegetación muy vigorosa.

Diversos estudios (Nemani et al., 1993; Goetz, 1997; Rivas y Houspanossian, 2006) previos al de Sandholt et al. (2002) han reportado pendientes más pronunciadas para condiciones de escasez hídrica creciente, lo que concuerda con el concepto del TVDI. Sin embargo, es necesario destacar que una adecuada estimación del TVDI está sujeta a la correcta definición de los límites seco y húmedo, para lo cual es necesario considerar un área lo suficientemente extensa en la imagen satelital que muestre condiciones secas y húmedas y superficies con diferentes grados de cobertura de vegetación (Goetz, 1997; Sandholt et al., 2002). La ventaja fundamental del TVDI sobre otros índices es su completa independencia de datos auxiliares. Sólo requiere de un adecuado cálculo del índice de vegetación y de la  $T_s$ . Otras aproximaciones (como por ejemplo Moran et al., 1994) requieren información

meteorológica detallada, como déficit de presión de vapor de agua, resistencia aerodinámica, entre otras, para la definición de los parámetros del espacio de dispersión.

En cuanto a los supuestos del método del TVDI, el mismo se sustenta fundamentalmente en que: 1) para un determinado valor de índice de vegetación los cambios en la  $T_s$  son principalmente causados por diferentes contenidos de humedad en el suelo, 2) el TVDI está relacionado a la humedad del suelo debido a cambios en la inercia térmica y al control evaporativo (evapotranspiración). Por otro lado, Sandholt et al. (2002) han señalado la

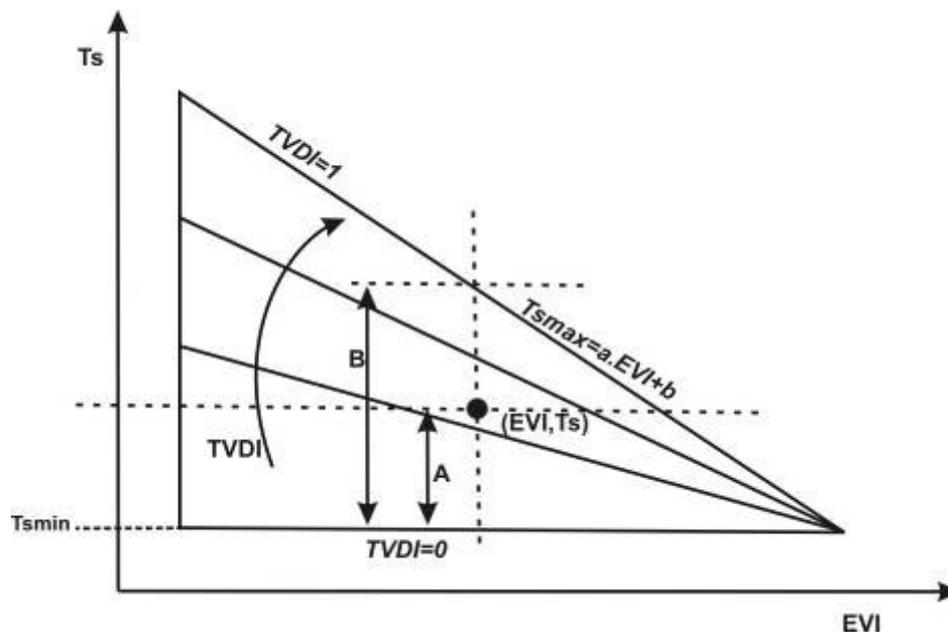


Figura 1.5. Esquema conceptual del TVDI. Para un determinado píxel, el mismo se calcula como la proporción entre las líneas A y B (ver Ecuación 1.1) (modificado de Sandholt et al., 2002).

existencia de un conjunto de fuentes de error en la estimación del triángulo:

- Efectos del ángulo de observación en la  $T_s$  e índice de vegetación, lo cual afecta la proporción de vegetación y suelo desnudo observado por el sensor.
- El triángulo podría ser determinado incorrectamente desde satélite si el área analizada no presenta una variabilidad adecuada de condiciones de superficie (suelo desnudo seco y saturado, vegetación estresada y húmeda).
- Errores en el cálculo de la  $T_s$  e índice de vegetación debidos a cambios en la emisividad de la superficie y a efectos atmosféricos.
- No consideración del efecto de sombra de las nubes.
- No consideración de la influencia de la humedad de horizontes profundos en horizontes superficiales (Capehart y Carlson, 1997).
- Dependencia de la  $T_s$  e índice de vegetación del tipo de superficie debido a diferencias en la resistencia aerodinámica (Friedl y Davis, 1994)

En un trabajo más reciente, [Mallick et al. \(2009\)](#) evaluando el contenido de humedad del suelo a escala de potrero con imágenes ASTER y de paisaje con imágenes MODIS en India, plantearon las mismas fuentes de error del método del triángulo.

## 1.4. Hipótesis de trabajo y objetivos

En esta tesis doctoral se planteó la siguiente hipótesis de trabajo:

La combinación de datos captados desde satélite en las bandas del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético brinda información de la disponibilidad de agua del suelo y de su incidencia en el rendimiento de cultivos de la región pampeana de Argentina.

Con el fin de comprobar esta hipótesis de trabajo se formuló el siguiente objetivo general:

Analizar la relación entre la disponibilidad de agua en el suelo y el rendimiento de los principales cultivos en distintas zonas de la región pampeana de La República Argentina a través del cálculo del TVDI, índice que combina la temperatura de superficie e índice de vegetación captados desde satélite.

Con el propósito de cumplir con el objetivo general, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Definir los cultivos más importantes según su superficie cultivada y establecer las etapas críticas de su desarrollo para el rendimiento en áreas con diferentes características ambientales de la región pampeana.
- Corroborar la relación entre TVDI y contenido de humedad del suelo a través de medidas *in situ*.
- Indagar en la relación entre TVDI y rendimiento de cultivos durante períodos de diferentes condiciones hídricas sobre distintas áreas de la región pampeana.
- Analizar y describir el comportamiento de los cultivos bajo múltiples condiciones de humedad del suelo.
- Desarrollar un modelo conceptual de la relación entre el estrés hídrico y rendimiento de cultivo.

Estos objetivos específicos permitieron concretar el objetivo general, aportando de esta manera una novedosa metodología, escasamente explorada en la República Argentina, para el monitoreo de las condiciones hídricas de superficie y del estado de los cultivos.

Cabe mencionar que desde la ciencia geográfica se requiere un enfoque holístico, considerando la realidad en su complejidad misma, estableciendo interdependencia entre

los componentes de ella ([Zamorano, 1985](#)). Particularmente en el abordaje realizado en la tesis se ha procurado un enfoque sistémico e integrador de los procesos del sistema suelo-agua-planta que inciden en el agua disponible y el rendimiento de los cultivos, temática que como ha sido expuesto, no ha sido analizada anteriormente a escala de la región pampeana. De dicho análisis se logró comprender que en distintas Ecorregiones de la región pampeana existen realidades físicas que conllevan a distintas capacidades productivas de los cultivos.

Por otro lado, en la búsqueda bibliográfica realizada se comprobó que sólo existían trabajos previos parciales (por la falta de un abordaje integrador o por tratarse de análisis a escala de potrero) del tema de interés. Como se señala en el Capítulo 2, a pesar del desarrollo tecnológico de los últimos años en el sector productivo de la región pampeana, la disponibilidad de agua en el suelo constituye actualmente una limitante para el rendimiento de los cultivos. En este contexto, el objetivo de la tesis surge como una necesidad actual de comprensión integradora de las limitantes hídricas a la producción de los cultivos y la posibilidad de generación de novedosas metodologías pasibles de ser aplicadas en la planificación productiva a escala regional.

Paralelamente, la tarea del geógrafo es procurar la búsqueda de principios y leyes generales de los fenómenos de la superficie terrestre, frecuentemente mediante el análisis de la información recogida por otras personas y estudiando hechos y fenómenos que estén en relación de causalidad con la superficie terrestre (principio geográfico de conexión) ([Estebanez, 1986](#); [Vilá Valenti, 1983](#)). No obstante, todo estudio geográfico necesita de un abordaje metodológico específico y de un marco conceptual que frecuentemente tienen más afinidad con ramas de la Geografía relacionadas a la naturaleza o a las ciencias sociales. En tal sentido, el trabajo de tesis se ha enmarcado dentro del campo de la Geografía física, de tal manera de centrar los esfuerzos en la comprensión de los procesos naturales del sistema suelo-agua-planta que inciden en la disponibilidad de agua para los cultivos. De tal forma, según el objetivo principal del trabajo, fue necesaria la abstracción de los aspectos socio-culturales, que son el dominio de otras ramas de la Geografía. Consecuentemente se han utilizado métodos o conceptos de distintas ramas de la Geografía física y de las ciencias afines que permitieron concretar los objetivos planteados. Dado que estos enfoques suelen tener una perspectiva aplicada, es esperable la especificación de herramientas o algoritmos a ser utilizados en la estimación del rendimiento de los cultivos, como se presenta en el Capítulo 4. Finalmente es necesario remarcar que tales herramientas y algoritmos son potencialmente partes fundamentales de sistemas de soporte de decisiones tendientes a la planificación productiva y económica de la región pampeana y la Argentina.

## Capítulo 2

### CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

En este capítulo se describe el área de estudio en la que se evaluó la relación entre disponibilidad de humedad en el suelo y rendimiento de cultivos a través del TVDI. En el inicio del mismo se brindará un panorama de la situación de los últimos años del sector agropecuario en cuanto a tendencias observadas y la evolución y fluctuación de la producción agrícola. Seguidamente se describirán los aspectos físicos del área, abordando las características del paisaje, el clima, los suelos y los cultivos. Se tratarán especialmente los cultivos dominantes en distintas zonas de la región pampeana y las limitaciones edáficas e hídricas para su crecimiento y rendimiento. Para ello se adoptará la zonificación en ecorregiones planteada por [Pereyra \(2003\)](#).

#### 2.1. Contexto agrícola-productivo

##### 2.1.1. Generalidades

En Argentina los 5 cultivos más importantes en orden decreciente según el área sembrada son soja, trigo, maíz, girasol y sorgo ([INTA, 2010](#)). Con más de 60 millones de hectáreas, la región pampeana es el área de secano más productiva del país, concentrando más del 90% de la producción de soja y entre el 80 y 90% de la producción de trigo, maíz, sorgo, cebada y girasol ([Magrin, et al., 2006](#)). Aunque tradicionalmente a nivel nacional y regional han predominado las producciones diversificadas (rotaciones de cultivos y producción ganadera), en los últimos 25 años se ha observado una tendencia a centrarse en pocas actividades ([Pizarro, 2003](#)). Específicamente el sector agrícola también ha mostrado una tendencia a la disminución de la biodiversidad productiva ([Aizen et al., 2009](#)). Esto ha incrementado la vulnerabilidad económica y social, pues ha ocasionado que el crecimiento económico se torne más dependiente de las fluctuaciones de los precios asociados a esos pocos cultivos ([Bisang, 2003](#)). Esas oscilaciones incidirían en las condiciones de empleo, la inserción laboral y la calidad de vida de la población ([Manzanal, 1995](#)).

Con respecto al área sembrada en Argentina, la misma se mantuvo prácticamente constante en 17 millones de hectáreas hasta la década del '90, después de la cual creció aceleradamente hasta llegar a 27 millones de hectáreas en 2006. Esta expansión fue acompañada por cambios en la importancia relativa de diferentes cultivos, pues fue

coincidente con la expansión del cultivo de soja (Ghida Daza, 2008) (Figura 2.1). Entre las causas de la expansión de este cultivo se enumeran el avance sobre ecosistemas anteriormente no cultivados o áreas marginales, la elevada rentabilidad debida a los precios internacionales crecientes, el aumento de la productividad por modificaciones genéticas y los bajos costos de labranza bajo el método de siembra directa (Donald, 2004). La región pampeana ha mostrado la misma tendencia, pues a comienzos de la década del '70 el trigo y la alfalfa fueron los principales cultivos, predominando el trigo en los '80 y dejando lugar a la soja como el cultivo predominante desde la década del '90 en la mayor parte de su extensión (Aizen et al., 2009).

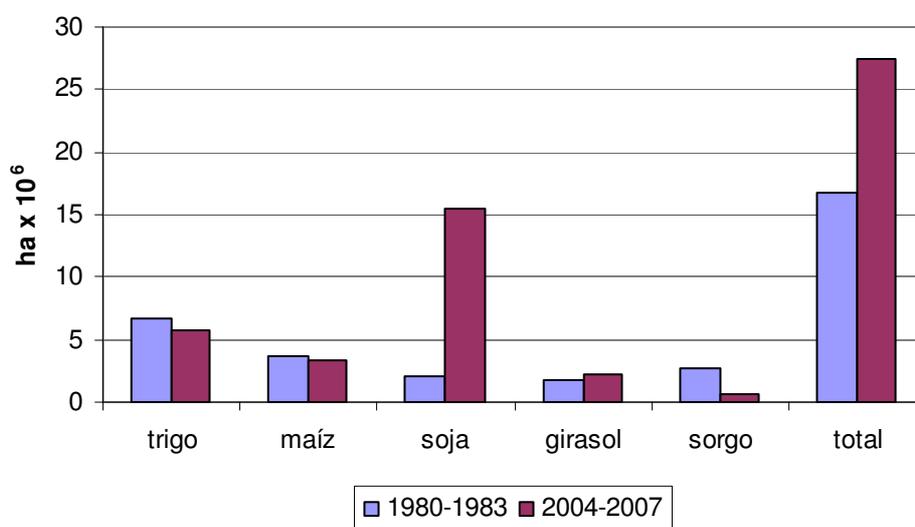


Figura 2.1. Superficie sembrada a nivel nacional por cultivo y total en los trienios 1980-1983 y 2004-2007 (adaptado de Ghida Daza, 2008).

En relación a los avances tecnológicos, Argentina y la región no son ajenas al proceso de desarrollo observado a nivel mundial en el sector agropecuario de los últimos años. La aplicación de nuevas tecnologías ha permitido reducir drásticamente las horas hombre por hectárea (75% menos con respecto a la década del '80), bajando los costos y haciendo más competitiva la producción primaria (INTA, 2010). Sin embargo esto puede generar conflictos laborales por la escasa mano de obra ocupada en el sector.

Una alternativa a este proceso evidenciada en muchos países desarrollados, y que aún es incipiente en Argentina, es el desarrollo de la agroindustria, es decir, la generación de productos elaborados que se pueden insertar en el mercado internacional con alto valor agregado. Esta estrategia agroindustrial permite incorporar el concepto de calidad integral, pues articula la etapa productiva con la comercialización, permitiendo de forma asociativa incrementar el potencial de desarrollo del territorio a través de la descentralización de procesos, promoviendo la inclusión social. A su vez, otorga una mayor rentabilidad, pues

bajo la forma tradicional de producción aproximadamente sólo el 15-25 % del valor final del producto es percibido por el productor primario (INTA, 2010). Adicionalmente, los alimentos han mostrado una marcada tendencia al aumento de los precios, en tanto que los granos, una notable variabilidad con tendencia a la disminución con respecto al valor de aquellos (INTA, 2010). Actualmente en Argentina existe un incipiente Plan Estratégico Agroalimentario y Agroindustrial Participativo y Federal 2010-2016 del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación en el que se insta a los actores del sector agroalimentario y agroindustrial a elaborar un plan compartido a futuro. En la actualidad la producción primaria está centrada en la exportación de materias primas derivadas de unos pocos cultivos anteriormente mencionados, con PYMES de procesamiento de granos de soja en varias provincias que producen aceite crudo por prensado y proteína.

### **2.1.2. Evolución de la producción agrícola**

Hasta la década del '70 el modelo de producción dominante en la región pampeana consistía en la alternancia de agricultura y ganadería, que implicaba menores requerimientos que la agricultura de cosecha, altamente extractiva (Pordomingo, 1998). Posteriormente el proceso de agriculturización iniciado en la década del '70 se acentuó en 1979, impulsado por incentivos de desgravación impositiva (Casas, 1998). Actualmente Argentina es un fuerte productor de granos, siendo líder en la producción per cápita (2.525 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, siguiéndolo Canadá con 1.889 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (INTA, 2011). Además, la producción de granos ha crecido en los últimos 18 años un 153%. Gran parte de este crecimiento respondió a la generación y adopción de tecnologías, a lo que se sumó el pasaje de 6 a 7 millones de hectáreas de explotación pecuaria hacia la agricultura, acumulando un incremento del 90% del área cultivada desde 1993 y aumentando los volúmenes de producción de 70 a 100 millones de toneladas (Figura 2.2). Específicamente, la región pampeana ha contribuido notablemente a este aumento de la producción, considerando que ha aportado aproximadamente el 80% del total de las exportaciones de origen agrícola (Banco Mundial, 2006).

Es necesario destacar que la adopción de tecnologías y técnicas que permitieron aumentar la producción en la región fue paulatina. Así, la siembra directa, la agricultura de precisión, la rotación de cultivos, el uso de variedades transgénicas, la mayor aplicación de herbicidas y fertilizantes fueron implementados en los sistemas productivos de Argentina masivamente hacia finales de la década del '90 (Satorre, 2005). Esto llevó a un aumento considerable del rendimiento de los cultivos de la región pampeana sobre todo en la década del 2000. Debido a este contexto productivo, en la tesis se decidió analizar el período 2000-2010, considerándolo como el más representativo de la actualidad productiva de la región.

A pesar de este contexto de especialización y crecimiento en la producción agrícola y la aplicación de nuevas tecnologías productivas (organismos genéticamente modificados, pesticidas y agricultura de precisión), la variabilidad climática continúa siendo un factor limitante y determinante para la agricultura nacional y de la región pampeana, lo que se observa en las importantes fluctuaciones de los volúmenes producidos en los últimos años (Figura 2.2).



Figura 2.2. Incremento en el área sembrada y producción en Argentina en los últimos 18 años (INTA, 2011).

## 2.2. Características edafoclimáticas de la región pampeana y zonificación

En general el clima de la región es templado húmedo, sin estación seca (Köppen, 1931). Las precipitaciones anuales se encuentran entre máximos de 1.200 mm en el Noreste y mínimos de 600 mm en el Sudoeste. La temperatura media anual máxima en el Sur ronda los 16 °C y en el Norte, 18 °C; la mínima media anual se encuentra entre los 6 y 14 °C. Las temperaturas decrecen en sentido Norte-Sur, con una amplitud de 15 °C en el Oeste y 12 °C en el Este. Las precipitaciones en el Norte decrecen en sentido Este-Oeste y en el Sur lo hacen desde el Norte hacia el Sur.

En cuanto a los suelos, la mayor parte de ellos está bajo cultivo, encontrándose la vegetación original en general reducida a pequeñas áreas. En el Oeste predominan suelos

Haplustoles Enticos y Típicos con texturas arenosa y franca. En el centro Norte y hacia el Este predominan Argiudoles Típicos, son suelos profundos con un horizonte rico en arcilla que suele presentar problemas de permeabilidad y para la penetración de las raíces. En general, las principales limitantes de los suelos de la región para el cultivo son su susceptibilidad a la erosión eólica e hídrica y su escasa profundidad, rasgo este último de carácter local (Pereyra, 2003).

No obstante estos rasgos generales, es necesario considerar particularidades o individualidades que le dan cierta impronta al espacio diferenciado. De esta forma, en el trabajo se consideró la sectorización de la región pampeana en unidades llamadas ecorregiones. Dicha delimitación, de Pereyra (2003), se basa metodológicamente en el análisis del conjunto de los factores ambientales, incluyendo aspectos climáticos, fisiográficos, geológicos, edáficos, de vegetación e hidrológicos. Tiene en cuenta en primer lugar las características del paisaje, pues se considera que engloba tanto los factores morfoclimáticos como los morfoestructurales. Se adoptó esta sectorización por sustentarse en particularidades físico-ambientales de la región pampeana, lo cual se consideró la más adecuada según el objetivo y el abordaje de la tesis.

A continuación se describen dichas ecorregiones, abordando las características más importantes según el objetivo de la tesis (Figura 2.3). No se analizan la ecorregión Planicies litorales pampeanas por poseer en general suelos no aptos para la producción agrícola ni la ecorregión Pampa Deprimida por no superar el área cultivada el 5% de dicha unidad. En algunos partidos de esta ecorregión durante años de escasa precipitación y niveles freáticos profundos, como en 2008-2009, se registran tendencias a mayor superficie cultivada, lo que no se observa en los períodos analizados en la tesis. En los apartados 2.2.1 a 2.2.6 se describe el paisaje, el clima, el suelo y los cultivos de cada ecorregión.

## **2.2.1. Pampa arenosa (D 27)**

### **2.2.1.1. Paisaje**

En esta ecorregión el predominio de los procesos eólicos dio como resultado una notable presencia de médanos. Las bajas pendientes y la alta permeabilidad de los materiales han incidido en los procesos fluviales, dando una red de drenaje poco integrada, con escasos cursos fluviales. El más importante es el río Salado, que circula en el límite con la ecorregión de la Pampa ondulada (Figura 2.3).

### 2.2.1.2. Clima

La temperatura media anual es de 18 °C, con máximas de 23 °C en enero y mínimas de 10 °C en julio. La precipitación anual es mayor a 800 mm y generalmente la humedad relativa es superior al 60%. Con una evapotranspiración potencial (ETP) aproximada de 800 mm, el exceso de agua es nulo o muy bajo, con déficit estacionales de 100 mm. Hacia el Oeste aumenta la continentalidad y aridez, ocurriendo frecuentes heladas en invierno (Pereyra, 2003).

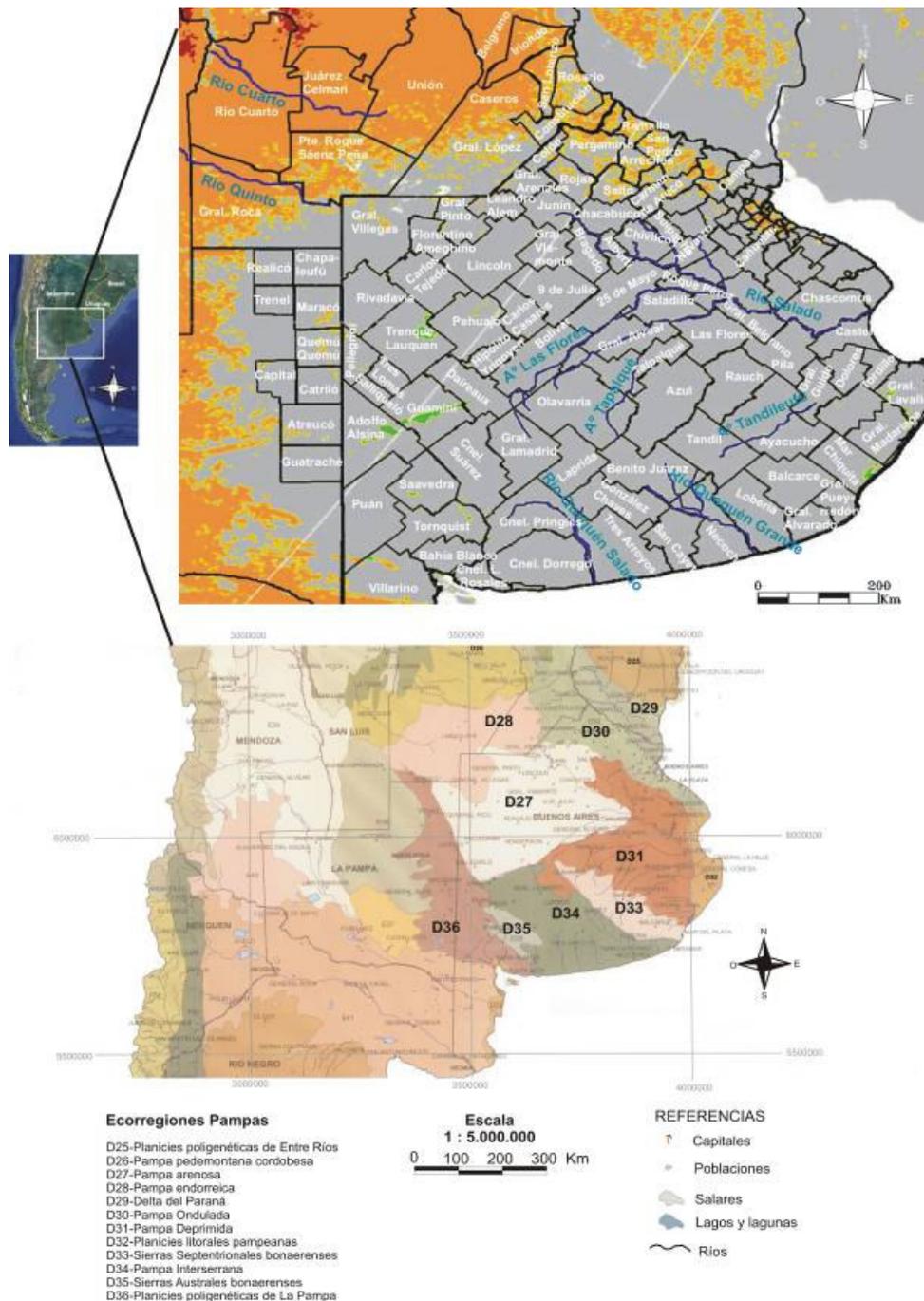


Figura 2.3. Ubicación del área de estudio y ecorregiones de la unidad Pampas (modificado de Pereyra, 2003).

### **2.2.1.3. Suelos**

Por la regularidad de la pluviometría, el régimen de humedad predominante es el údico, con ústico hacia el oeste. Predominan Argiudoles Típicos, suelos con un horizonte superficial rico en materia orgánica y uno subsuperficial enriquecido en arcillas iluviales, los cuales fueron cubiertos por sedimentos eólicos texturalmente más gruesos. En los médanos dominan los Udipsamentes, de débil estructura y poca materia orgánica. En la parte norte de la ecorregión existe alto riesgo de erosión eólica debido a los fuertes vientos del Oeste típicos de finales de invierno y principios de primavera y a la textura arenosa de los suelos (Hall et al., 1992).

### **2.2.1.4. Cultivos**

La Figura 2.4 muestra el porcentaje de área sembrada por cultivos de grano grueso y fino en los partidos de Carlos Casares, Carlos Tejedor, General Viamonte de la provincia de Buenos Aires y los departamentos de Chapaleufú y Maracó de la provincia de La Pampa (datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP)). Aunque el área sembrada con cada cultivo ha mostrado importantes fluctuaciones en la última década, el cultivo de grano grueso más extendido es soja, siendo trigo el más destacado entre los de grano fino. Cabe mencionar que en el departamento de Catrilo, provincia de La Pampa, predominan girasol y maíz como cultivos de grano grueso y avena como cultivo de grano fino. En esta ecorregión, según la Oficina de Riesgo Agropecuario ([www.ora.gov.ar](http://www.ora.gov.ar)), el período crítico para el rendimiento de soja comprende los meses de enero y febrero, siendo octubre y noviembre para trigo (Oficina de Riesgo Agropecuario-MAGyP).

En general no se presentan grandes restricciones para el crecimiento de los cultivos en esta ecorregión. En el Oeste los suelos menos estructurados por el menor contenido de materia orgánica que en el Este y su textura gruesa pueden presentar restricciones para ciertos cultivos como maíz, que tiene una alta sensibilidad a la escasez hídrica. A su alta sensibilidad estomática, su baja plasticidad en la regulación de la floración y su escasa capacidad de extracción de agua profunda con respecto a otros cultivos se suma la limitada capacidad de retención de agua útil de los suelos. En el caso del girasol, la zona Oeste presenta menores limitaciones por su alta capacidad de extracción de humedad desde horizontes profundos (Dardanelli et al., 2003). En general los cultivos de grano fino son menos afectados por los déficits hídricos por desarrollarse en una época del año en la que la demanda atmosférica es menor que en el verano.

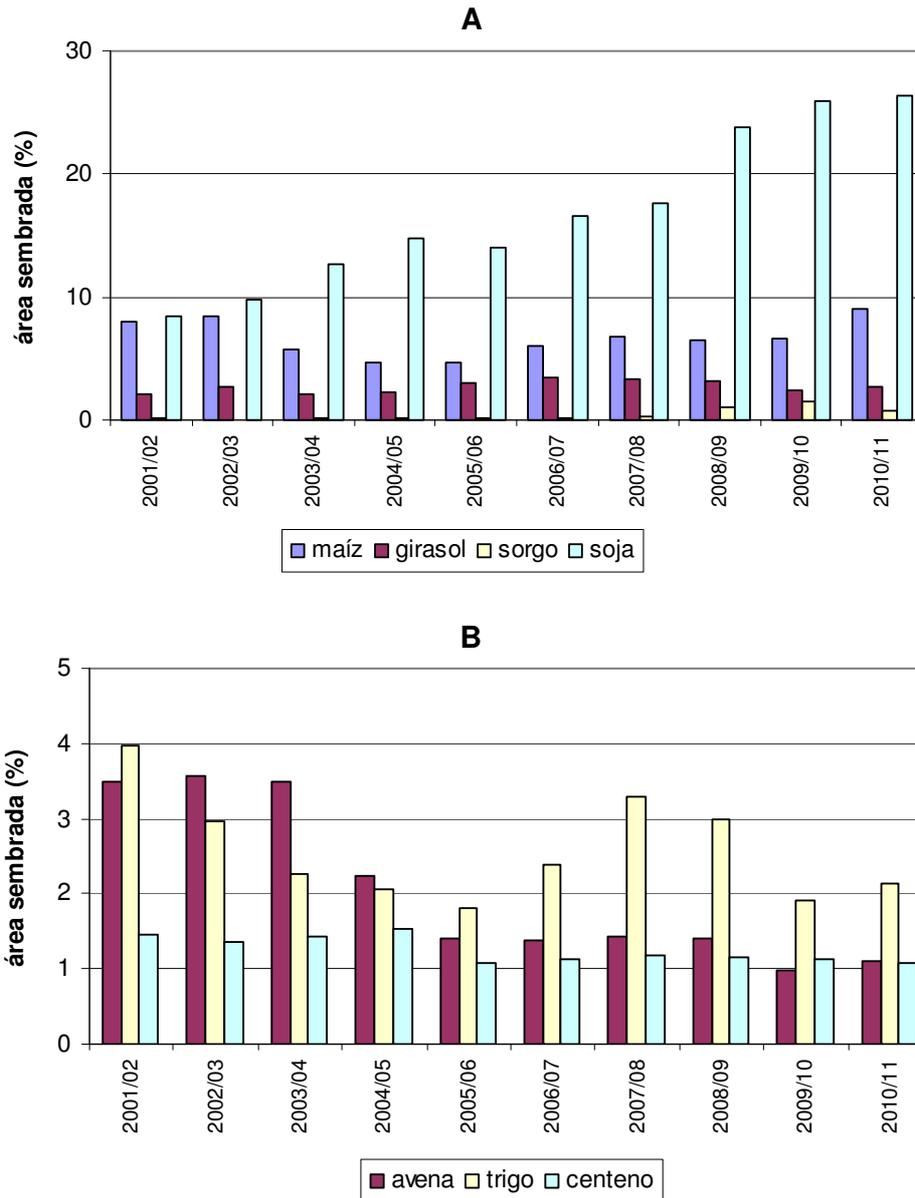


Figura 2.4. Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Pampa arenosa (fuente de datos: MAGyP).

## 2.2.2. Pampa endorreica (D 28)

### 2.2.2.1. Paisaje

El paisaje de esta unidad es el resultado de procesos eólicos y fluviales. La red de drenaje está poco integrada como consecuencia de las escasas pendientes hacia el este. La mayor parte de los cursos de agua se insumen en la planicie. Los más importantes son los ríos Cuarto y Quinto, muy sinuosos, con numerosos bajos y zonas anegables (Figura 2.3).

### **2.2.2.2. Clima**

La temperatura media anual ronda los 18 °C, con 23 °C en enero y 10 °C para julio. Las precipitaciones anuales son mayores a los 900 mm. La humedad relativa generalmente es mayor al 60%. El exceso de agua es escaso o nulo (ETP de 850 mm), con déficits hídricos estacionales de 100 mm. Frecuentemente ocurren heladas en invierno ([Pereyra, 2003](#)).

### **2.2.2.3. Suelos**

Los suelos de esta ecorregión tienen poco desarrollo pedogenético, con horizontes poco diferenciados. Dominan los Hapludoles y Haplustoles, pues aquí se encuentra el límite entre el régimen de humedad údico (se encuentran húmedos la mayor parte del año) y ústico (mayores precipitaciones estivales). Con mucha menor representatividad areal existen Argiudoles y Natralboles.

### **2.2.2.4. Cultivos**

Según datos de los departamentos de General Roca y Presidente Roque Sáenz Peña, de la provincia de Córdoba y de General López, de la provincia de Santa Fe, el cultivo de grano grueso que mayor área sembrada presenta es la soja. El cultivo de grano fino más extendido es el trigo (Figura 2.5). Sin embargo, cabe destacar que en General Roca y Roque Sáenz Peña la superficie sembrada con trigo ha decrecido, siendo similar a la sembrada con avena. En esta ecorregión el período crítico para el rendimiento de soja comprende los meses de enero y febrero, extendiéndose hasta la segunda quincena de diciembre para soja de primera. Para trigo el período crítico comprende octubre y noviembre, extendiéndose hasta la segunda quincena de septiembre en algunos casos (Oficina de Riesgo Agropecuario-MAGyP).

Esta ecorregión suele presentar limitaciones para los cultivos por excesos de agua en las zonas cercanas a los ríos. En las zonas con suelos de régimen de humedad ústico pueden ocurrir déficits hídricos generalizados. En general la soja, por su relativo bajo consumo estacional de agua y su alta plasticidad por regulación de las fechas de floración puede mitigar los efectos de los déficits hídricos ([Andrade y Sadras, 2000](#)), aunque en esta ecorregión sus rendimientos pueden verse afectados por la baja humedad del suelo en algunos sectores o en la transición hacia la anterior ecorregión por la escasa retención de agua de los mismos. Para el trigo la mayor parte de la región presenta buenas condiciones ambientales para su desarrollo.

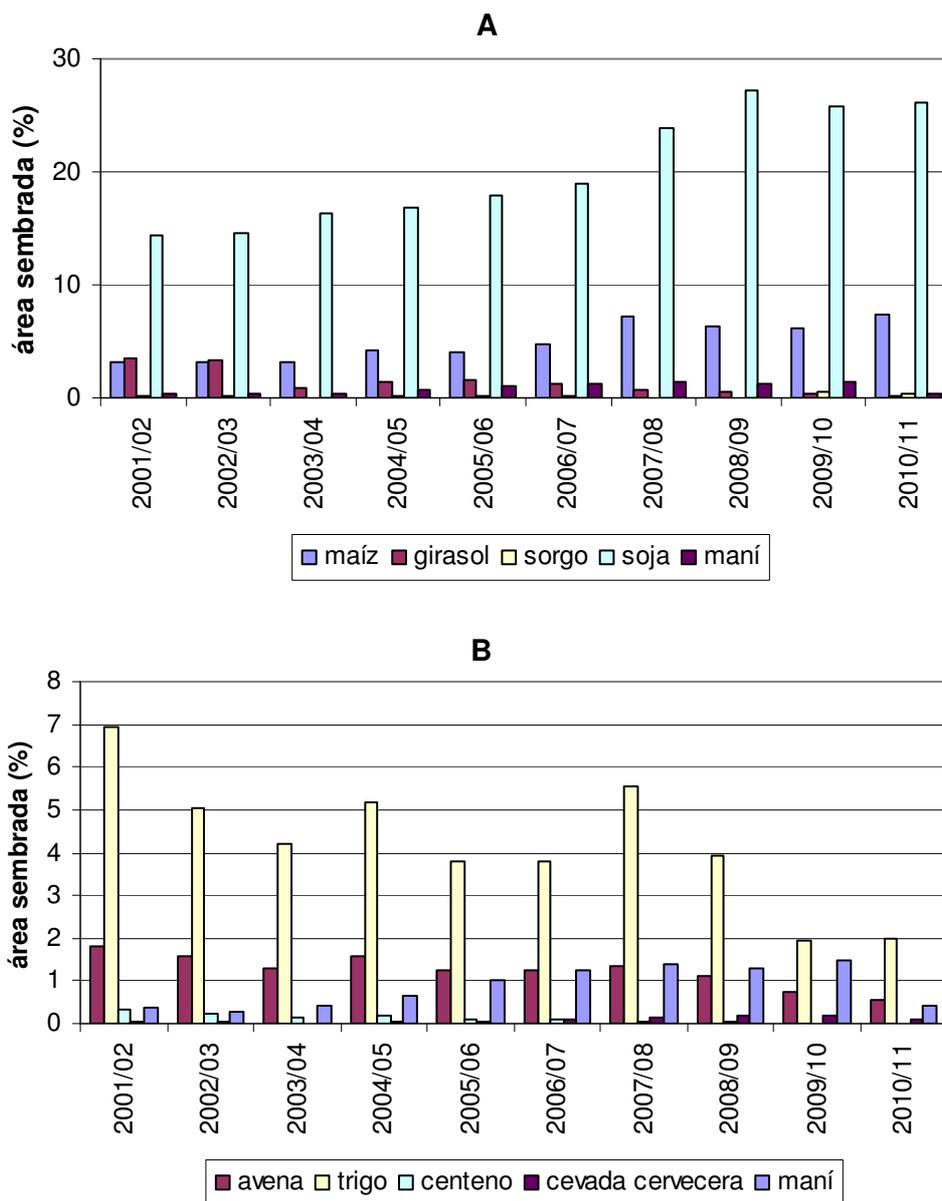


Figura 2.5. Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Pampa endorreica (fuente de datos: MAGyP).

## 2.2.3. Pampa ondulada (D 30)

### 2.2.3.1. Paisaje

Presenta un relieve suavemente ondulado, cuya pendiente va aumentando hacia el Noroeste. Los procesos dominantes que moldearon el paisaje fueron primeramente la depositación de materiales limosos, a lo que se le sumó el posterior proceso fluvial. Los cursos fluviales muestran un diseño subdendrítico a paralelo, lo que indica la existencia de un control estructural.

### **2.2.3.2. Clima**

La temperatura media anual muestra un valor medio mayor a 18 °C, con máximas de 20 °C en enero y mínimas de 10-12 °C en julio. Las precipitaciones superan los 1.100-1.200 mm anuales, con mayor concentración en verano. Con una ETP de 800 mm, es común la existencia de excesos hídricos. Generalmente la humedad relativa es mayor al 70 %. Las heladas son poco frecuentes ([Pereyra, 2003](#)).

### **2.2.3.3. Suelos**

Los suelos de esta ecorregión se caracterizan por su elevada fertilidad natural, régimen de humedad údico y régimen de temperatura térmico (temperaturas templadas y baja amplitud térmica). Los suelos con mayor representatividad areal son los Argiudoles típicos. En zonas de escaso drenaje se ubican Natracualfes, Natracuoles y Endoacuoles, mucho menos productivos por sus rasgos hidromórficos y presencia de sodio.

### **2.2.3.4. Cultivos**

En esta ecorregión el cultivo de grano grueso más extendido es la soja y el de grano fino es el trigo, según datos de los partidos de Constitución, Iriondo y San Lorenzo de la provincia de Santa Fe, Colón y General Arenales de la provincia de Buenos Aires (Figura 2.6). Los períodos críticos para el rendimiento comprenden los meses de enero y febrero para el caso de la soja y octubre y noviembre para trigo (Oficina de Riesgo Agropecuario-MAGyP).

Debido a que los suelos tienen una excelente aptitud productiva, las precipitaciones son abundantes en la estación de mayores requerimientos hídricos y los niveles freáticos someros permiten el aporte subterráneo de agua, esta ecorregión generalmente no presenta restricciones para el desarrollo de los cultivos. Debido a la existencia de suelos con horizonte argílico con alto contenido de arcilla, los excesos de agua pueden presentar limitaciones productivas por la escasa percolación.

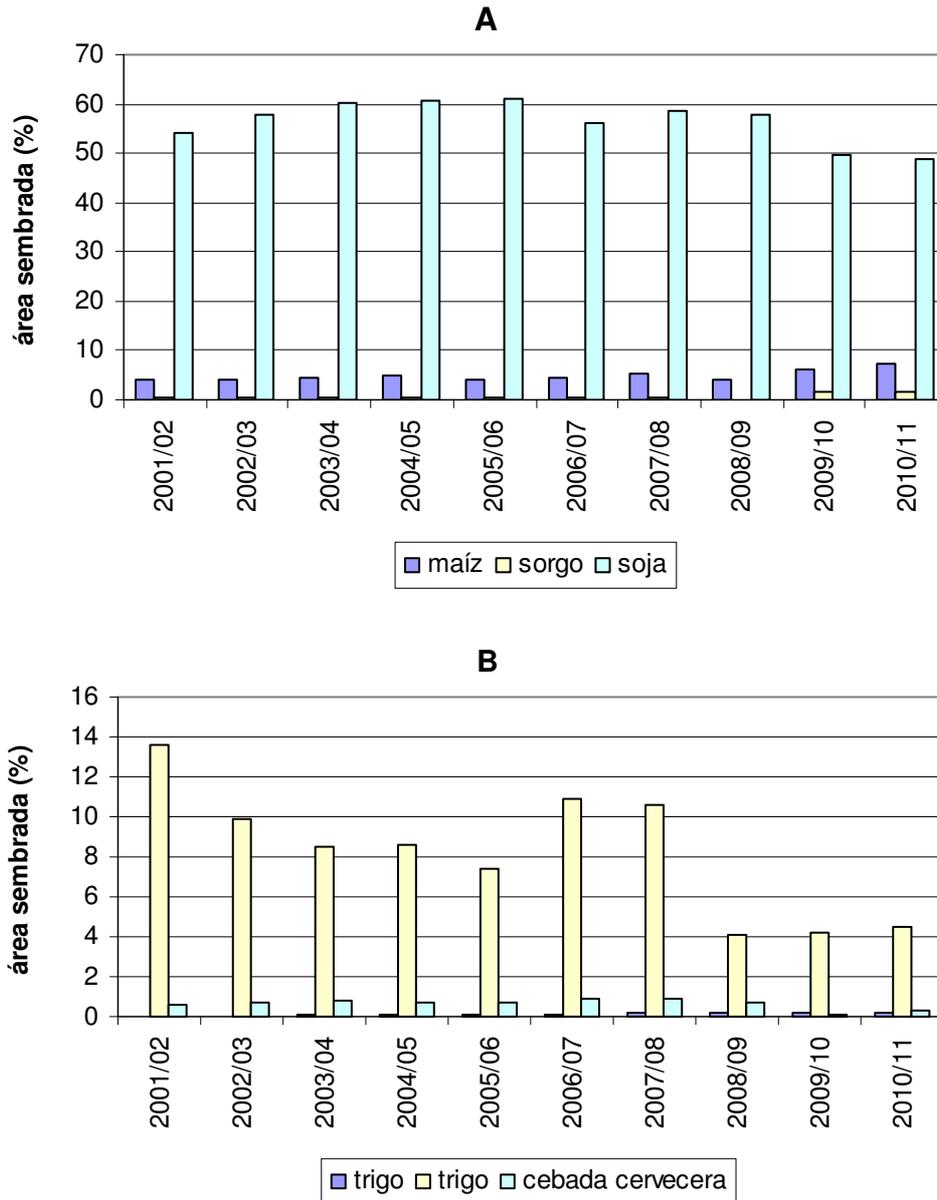


Figura 2.6. Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Pampa ondulada (fuente de datos: MAGyP).

## 2.2.4. Sierras septentrionales bonaerenses (D 33)

### 2.2.4.1. Paisaje

Desde el punto de vista geológico es la única ecorregión no subsidente de la región pampeana. Hacia el Norte los cursos de agua son más importantes que en el Sur, entre ellos se enumeran los arroyos Las Flores, Tapalqué y Tandileufú (Figura 2.3). Hacia el sur el drenaje es menos importante por el menor relieve relativo.

#### **2.2.4.2. Clima**

La temperatura media anual supera los 16 °C, con 19-20 °C en enero y 8-10 °C en julio. En cuanto a la temperatura, enero es el mes más cálido y junio y julio los más fríos. Las heladas son muy frecuentes en invierno y si bien la cantidad de días sin ellas durante el año oscilan entre 180 y 260, las variaciones interanuales de las primeras y últimas heladas pueden ser considerables (Burgos, 1963). Así pueden ocurrir heladas a finales de septiembre en el norte y hasta mediados de octubre en el sur del área, que dañan las plántulas de los cultivos de verano y la floración o el llenado de granos de los invernales. Con una ETP de 700 mm y precipitaciones de 1.000 mm, existen excesos en buena parte del año. Los registros más bajos ocurren en julio y agosto, aunque la influencia oceánica en el Sudeste de la región hace que la distribución anual de las lluvias sea uniforme. La alta frecuencia de días lluviosos durante otoño e invierno combinados con temperaturas frías eventualmente significan una restricción para la cosecha, pues favorecen el desarrollo de enfermedades como Septoria en trigo y Sclerotinia en girasol (Hall et al., 1992).

#### **2.2.4.3. Suelo**

Los suelos presentan régimen de temperatura térmico, con una temperatura media anual del suelo entre 15 y 22 °C, y régimen de humedad údico. Los suelos más representativos de esta subzona son los Argiudoles típicos y Hapludoles, en menor medida Paleustol petrocálcico. El perfil típico de esos suelos dominantes muestra un horizonte superficial oscuro con alto contenido en materia orgánica, de textura media de 18 a 35 cm de espesor; un segundo horizonte marrón oscuro, denso, con alto contenido en arcilla, de 40 a 80 cm de espesor y más en profundidad loess amarillo-marrón como material parental. Con una capacidad de retención hídrica que varía entre 150 y 200 mm en los primeros 1,5 m, los suelos predominantes son excelentes desde el punto de vista productivo (Hall et al., 1992).

#### **2.2.4.4. Cultivos**

Según los datos de área sembrada de los partidos de Azul, Tandil y Balcarce de la provincia de Buenos Aires, el cultivo de grano grueso más extendido es la soja y el de grano fino es el trigo (Figura 2.7). En esta ecorregión los meses de febrero y marzo son los críticos para el rendimiento de soja, siendo noviembre y diciembre para el cultivo de trigo (Oficina de Riesgo Agropecuario-MAGyP).

En general esta ecorregión presenta buenas condiciones para el desarrollo de los cultivos. Pueden ocurrir limitaciones por ocurrencia de eventos intensos de exceso y déficit de agua.

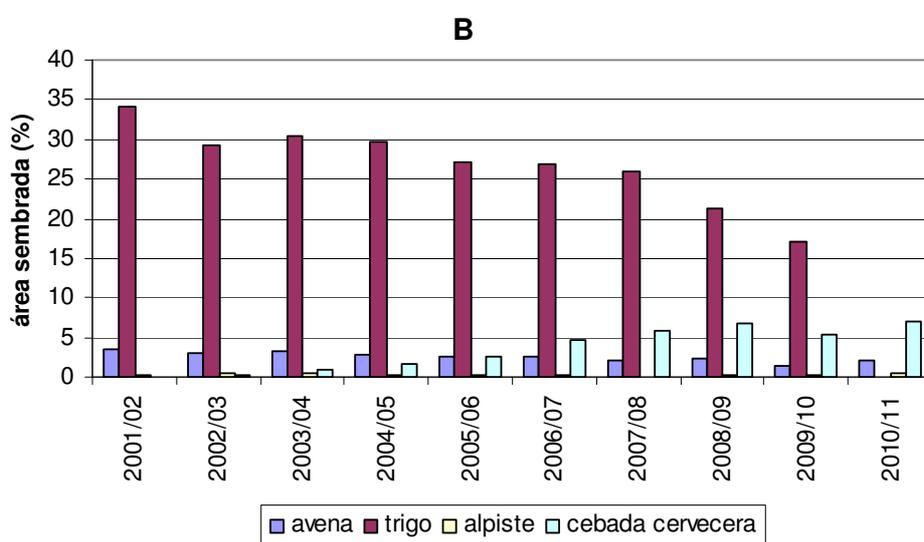
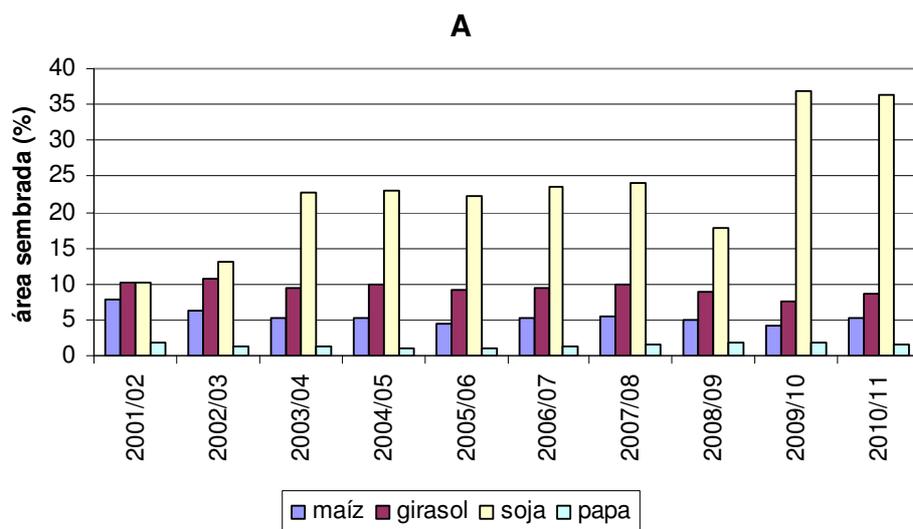


Figura 2.7. Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Sierras septentrionales bonaerenses (fuente de datos: MAGyP y [www.argenpapa.com.ar](http://www.argenpapa.com.ar)).

## 2.2.5. Pampa interserrana (D 34)

### 2.2.5.1. Paisaje

En el moldeado del paisaje intervinieron fundamentalmente procesos fluviales y eólicos. Predominan las planicies pedemontanas interdigitadas con remanentes de planicie loésica. El relieve es muy suave. En la zona occidental se observan médanos de distintos tipos, entre los cuales suelen ubicarse lagunas. Los escasos gradientes y la alta permeabilidad de los materiales han resultado en una red de drenaje poco integrada, con cursos fluviales poco relevantes. Algunos de estos cursos tienen mayor poder erosivo y una red de drenaje más importante, como el río Quequén Grande y Quequén Salado (Figura 2.3).

### 2.2.5.2. Clima

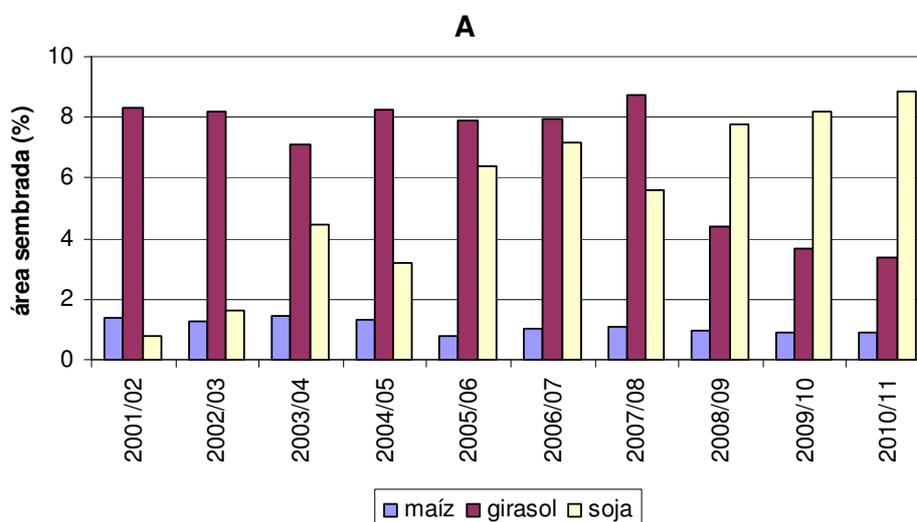
La temperatura media anual supera los 16 °C (enero alrededor de 19-20 °C y julio, 8-10 °C). La ETP es de 700 mm y la precipitación supera los 900 mm, lo que genera excesos anuales de agua. Ocurren heladas frecuentemente en invierno (Pereyra, 2003).

### 2.2.5.3. Suelos

El régimen de temperatura predominante es el térmico y el de humedad, údico. Principalmente dominan los Udoles, específicamente Argiudoles típicos, a menudo limitados por un horizonte petrocálcico o tosca. En zonas deprimidas se encuentran Argiudoles ácuicos.

### 2.2.5.4. Cultivos

En la Figura 2.8 se muestra el área sembrada por cultivos de grano grueso y fino en los partidos de Gonzáles Chaves, General Lamadrid, Laprida y Tres Arroyos, de la provincia de Buenos Aires. La soja y el girasol son los 2 cultivos de grano grueso más extendidos de esta ecorregión, en tanto que el trigo es el más importante de grano fino. Para el cultivo de soja los meses de febrero y marzo son críticos para su rendimiento, siendo diciembre, enero y febrero para el girasol. Para el caso del trigo, el mes crítico es noviembre (Oficina de Riesgo Agropecuario-MAGyP).



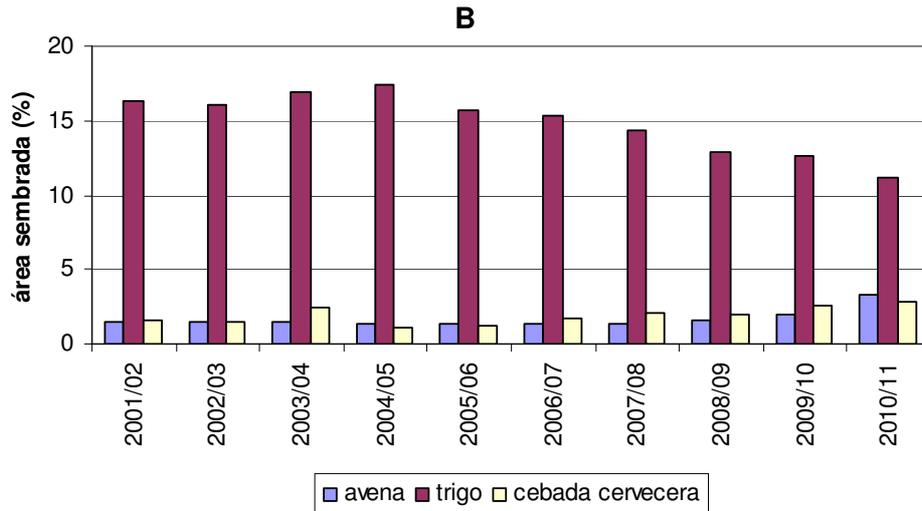


Figura 2.8. Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Pampa interserrana (fuente de datos: MAGyP).

Una limitante importante en ciertas áreas de esta ecorregión es la escasa profundidad de los suelos, debida a la existencia del horizonte petrocálcico, lo que resulta en una reducida capacidad de almacenaje de agua en el perfil. La soja y el trigo, por su sistema radical relativamente superficial son afectados con menor intensidad que el girasol, el cual tiene baja capacidad de extracción de agua de la parte superior del perfil edáfico. Ante eventos de exceso hídrico el manto de tosca a escasa profundidad favorece también la saturación de la parte superficial del suelo al retardar o impedir la percolación. En esta zona ha sido especialmente señalado el efecto de los excesos hídricos en la mayor incidencia de enfermedades en girasol, lo que anularía los efectos positivos de una alta disponibilidad de agua (Andrade y Sadras, 2000).

## 2.2.6. Planicies poligenéticas de La Pampa (D 36)

### 2.2.6.1. Paisaje

El relieve es muy suavemente ondulado, con algunos médanos y frecuentes lagunas. La red de drenaje es poco importante y arreica. En el centro de la ecorregión se encuentran valles de orientación OSO-ENE. En el centro de estos valles se encuentran frecuentemente cordones medanosos, con numerosos cuerpos de agua.

### 2.2.6.2. Clima

La temperatura media anual supera los 16 °C, con 19-20 °C en enero y 8-10 °C en julio. La precipitación anual ronda los 800 mm, lo que sumado a un ETP aproximada de 900 mm, da condiciones de déficit hídrico anual, concentradas principalmente en enero y febrero. Una

característica de las precipitaciones es su alta variabilidad, lo que explica en gran parte las marcadas fluctuaciones en los rendimientos. La humedad relativa generalmente supera el 60 %. Las heladas son frecuentes en invierno, con una frecuencia de 11 heladas con temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  en julio. Hacia el oeste aumenta la aridez, la estacionalidad y la continentalidad climática. Los frecuentes déficits hídricos sumados al alto riesgo de heladas limitan o reducen la estación de crecimiento de los cultivos de verano ([Pereyra, 2003](#)).

### **2.2.6.3. Suelos**

Esta ecorregión representa el límite Oeste de los Molisoles. Domina el régimen de humedad ústico, limitando hacia el Oeste con el arídico. En general los suelos de mayor importancia son los Haplustoles, mayoritariamente con textura arenosa y franca y con una capacidad de retención de agua aproximada de 83 mm en el primer metro de profundidad. En mucha menor proporción se encuentran Argiudoles y Calciustoles.

Dentro de esta ecorregión, en el Este y Norte de la provincia de La Pampa se pueden distinguir dos zonas de acuerdo a las características de sus suelos ([Quiroga y Pérez Fernández, 2008](#)):

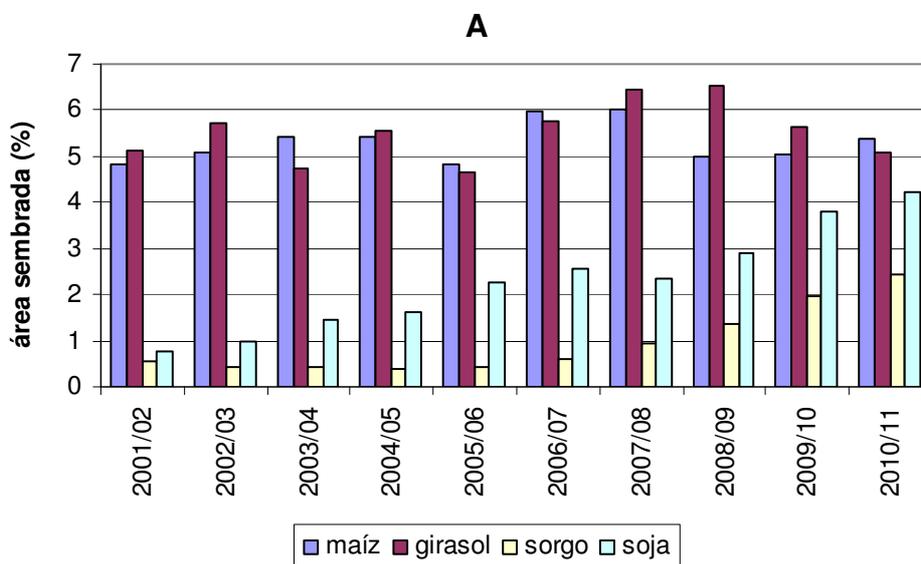
- Planicie con tosca: comprende una superficie de 2.398.202 ha, incluyendo los departamentos de Realicó, Trenel, Capital, Atreucó y Guatraché (Figura 2.3). La característica principal es la presencia de un manto de tosca sobre el que se encuentra otro de suelo arenoso de profundidad variable. La limitación fundamental para los cultivos en esta zona es la presencia de tosca, lo que induce una alta variabilidad en el rendimiento. La amplia extensión Norte-Sur origina diferencias climáticas dentro de esta zona, como es el adelanto de aproximadamente 15 días en las primeras heladas en los departamentos de Atreucó y Guatraché, que pueden ocasionar pérdida de cosechas en los cultivos de verano.
- Planicie arenosa: está ubicada al Noreste de la provincia de La Pampa y comprende los departamentos de Chapaleufú, Maracó, Quemú-Quemú y Catrilo (Figura 2.3). Presenta suelos de textura arenosa a franco arenosa sin limitaciones en profundidad, dominando los Ustisamentes, suelos poco desarrollados y con alta permeabilidad. El paisaje presenta planicies extendidas y onduladas, con acceso variable al agua subterránea por parte de los cultivos. Es el área de mayor potencial productivo de dicha provincia.

#### 2.2.6.4. Cultivos

En la Figura 2.9 se observa que los cultivos de grano grueso más extendidos en esta ecorregión son el maíz y girasol y los de grano fino son avena y trigo, según los datos del partido de Puán, provincia de Buenos Aires y los departamentos de Realicó, Trenel, Capital, Atreucó y Guatraché, provincia de La Pampa. Es necesario destacar además que se ha observado un incremento en los últimos 4 años en el área sembrada con sorgo en el partido de Puán y de soja en el departamento de Realicó. Los períodos críticos para el maíz en esta ecorregión comprenden el mes de diciembre; para girasol, los meses de diciembre, enero y febrero; para trigo, octubre y noviembre (Oficina de Riesgo Agropecuario-MAGyP).

Por sus características ambientales, una importante extensión de esta ecorregión presenta limitaciones para los cultivos. En general la capacidad de reserva de agua útil del suelo es baja, ya sea por su escasa profundidad debida a la presencia de tosca o por la baja capacidad de retención en suelos de textura gruesa y débil estructura.

Fisiológicamente el maíz se caracteriza por una alta susceptibilidad a la sequía, alta sensibilidad estomática y baja plasticidad en regular los tiempos de floración. Así, frecuentemente se observan déficits hídricos en sus cultivos en esta ecorregión, sobre todo en suelos poco desarrollados o de texturas arenosas en donde está presente la tosca.



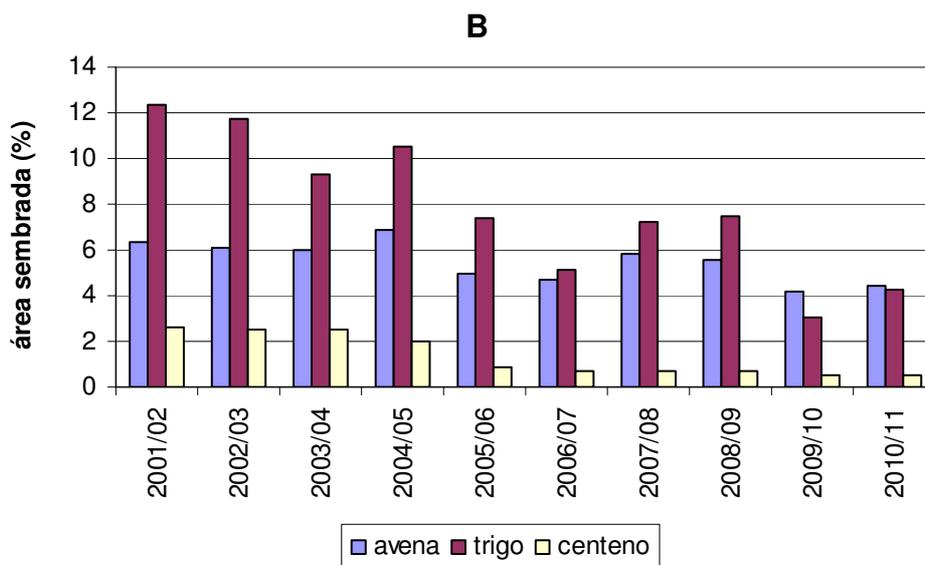


Figura 2.9. Superficie de área sembrada de los cultivos de grano grueso (A) y fino (B) en la ecorregión Planicies poligenéticas de La Pampa (fuente de datos: MAGyP).

El girasol se caracteriza por una baja susceptibilidad a la sequía, menor sensibilidad estomática y mayor capacidad de exploración del perfil con respecto al maíz. Por ello las condiciones en general no son tan restrictivas para su cultivo, excepto en las áreas con presencia de tosca a escasa profundidad. Las limitaciones para los cultivos de grano fino son similares a las mencionadas, con la particularidad del menor requerimiento hídrico durante su crecimiento.

## Capítulo 3

### METODO DE TRABAJO

El presente capítulo se sustenta principalmente en el cálculo del Índice de sequedad a partir de la temperatura y la vegetación (TVDI) utilizando imágenes satelitales del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), su relación con la disponibilidad de agua en el suelo y con el rendimiento de cultivos de grano fino y grueso. En primer término se abordan aspectos relacionados a las imágenes utilizadas de temperatura de superficie e índice de vegetación, como las bases teóricas en las que se sustentan, el proceso de obtención de las mismas y la validación de sus datos. Posteriormente se presenta el procesamiento de esas imágenes, su proyección a otro sistema de referencia y la obtención de imágenes de los períodos de estudio. Finalmente se describe el proceso de cálculo del TVDI, los análisis de la relación entre este índice y las humedades del suelo medidas en el centro de la provincia de Buenos Aires y su relación con los rendimientos de cultivos en distintas ecorregiones de la región pampeana.

#### 3.1. Análisis de la información satelital y caracterización de los productos MODIS

Las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo fueron 2 productos MODIS/Aqua:

- temperatura/emisividad global de la superficie terrestre, nivel 3, composición de 8 días, de 1 km de resolución espacial, versión 5 (MYD11A25);
- índices de vegetación global, nivel 3, composición de 16 días, de 1 km de resolución, versión 5 (MYD13A25). De este producto se analizaron las imágenes del Índice de Vegetación Mejorado (EVI), por presentar ventajas con respecto al clásico NDVI (ver sección 3.1.2.1).

##### 3.1.1. Imágenes de temperatura de superficie

El producto Aqua/MODIS MYD11A25 brinda datos de temperatura de superficie ( $T_s$ ) captados por el canal térmico (10,5-12,5  $\mu\text{m}$ ) del sensor MODIS a bordo del satélite Aqua para toda la superficie del planeta, incluyendo bosques perennes y caducos, arbustos, áreas cultivadas y de pastizales naturales, cuerpos de agua, nieve y hielo, suelo desnudo, arenas, rocas y áreas urbanas. Dicho producto es generado a partir de un producto previo MODIS

de Ts diaria (MYD11A1) y es compuesto a una resolución espacial de 1 km, brindando valores medios de Ts de 8 días en condiciones de cielo sin nubes.

El MYD11A25 consta de datos de Ts de día y noche, evaluación de la calidad del dato, tiempo y ángulo de observación, cantidad de días y noches sin nubes y emisividades estimadas en las bandas 31 y 32 de distintos tipos de coberturas. La versión 5 de dicho producto indica que está en la fase 2 de validación de sus datos, implicando que la precisión ha sido evaluada en un amplio conjunto de localizaciones y períodos a través de datos tomados en campo. Aunque en el futuro se dispondrá de mejores versiones de este producto, actualmente su calidad permite la utilización del mismo en publicaciones científicas ([García-Mora y Mas, 2011](#)).

### **3.1.1.1. Ecuación Split-Window**

La señal infrarroja térmica recibida por el sensor del satélite es determinada por la temperatura de la superficie observada, la emisividad/reflectividad de la superficie, la emisión, absorción y dispersión atmosférica y la radiación solar. Hay evidencia de que las emisividades de las distintas coberturas terrestres son relativamente estables en el rango 10,5-12,5  $\mu\text{m}$ , donde se localizan las bandas 31 y 32 de MODIS, permitiendo la estimación de las mismas con una precisión de 0,01 para algunos tipos de coberturas, incluyendo vegetación densa, superficies de lagos, nieve y la mayor parte de los suelos. Los productos MODIS de tipos de coberturas terrestres, nieve e índices de vegetación contribuyen en la inferencia de las emisividades medias de la superficie a nivel de píxel.

Con respecto a la incidencia atmosférica en la señal captada por el sensor en el rango espectral de las bandas 31 y 32, el vapor de agua es el elemento que más absorbe la señal proveniente de la superficie terrestre (Figura 3.1). Los perfiles de contenido de vapor en la atmósfera obtenidos a partir de los sondeos del sensor MODIS son de utilidad para la cuantificación de dicho efecto ([Menzel y Purdom, 1994](#)).

Conociendo las emisividades de las distintas coberturas de la superficie, se puede generalizar un algoritmo multicanal corrigiendo los efectos atmosféricos bajo condiciones de la atmósfera desconocidas ([Wan y Dozier, 1989](#)). La diferencia de este método con otros disponibles es que para el cálculo de la Ts no se requiere de simulaciones de transferencia radiativa píxel a píxel y que su precisión depende del conocimiento de la emisividad de superficie. La corrección de los efectos atmosféricos está basada en la absorción diferencial en bandas infrarrojas térmicas adyacentes en vez de la transmisión atmosférica absoluta en una sola banda.

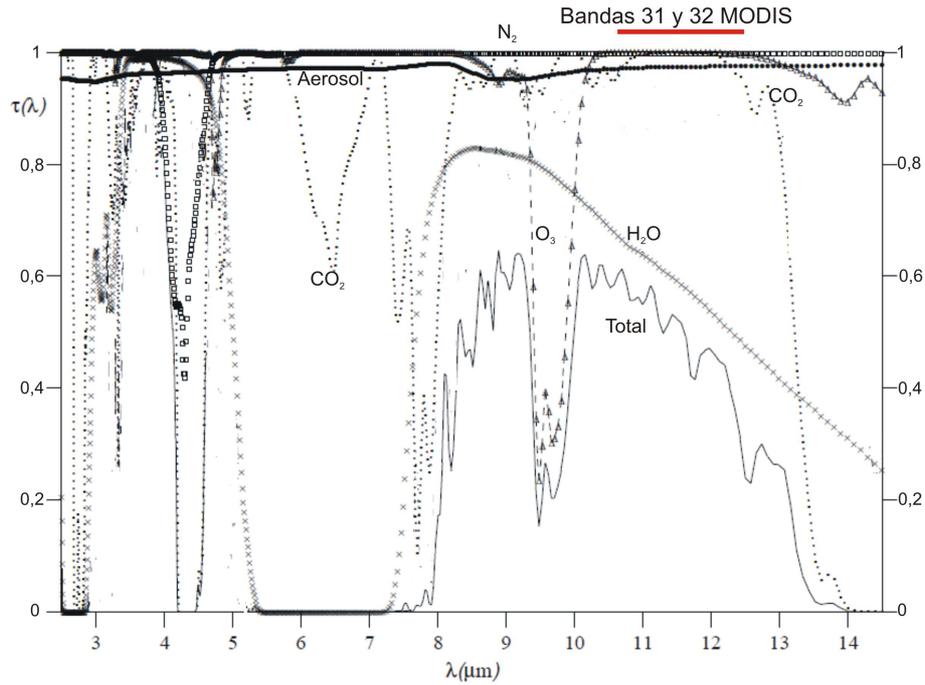


Figura 3.1. Transmisión atmosférica a un ángulo de visión de 45° durante verano en latitudes medias (para una atmósfera con un contenido de vapor de agua: 2,9 cm y visibilidad de 23 km) (Wan, 1999).

Para obtener las estimaciones de  $T_s$  a nivel de píxel con este método, fundamentalmente se debe formular un algoritmo generalizado split-window, con el previo conocimiento de las emisividades de la superficie observada (Wan, 1999). Las emisividades son inferidas a partir de un producto MODIS generado previamente de tipos de cobertura terrestre (MOD12). La forma numérica generalizada de la ecuación split-window es de tipo lineal y tiene en cuenta básicamente las temperaturas de brillo y las emisividades en las bandas 31 y 32 de MODIS. La ecuación split-window generalizada que se utiliza en el cálculo del producto MYD11A25 es la siguiente:

$$T_s = \left( A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + \left( B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) (T_{31} - T_{32}) + C \quad (3.1)$$

donde  $\varepsilon$  es la emisividad ( $\varepsilon = 0,5(\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32})$ ),  $\Delta\varepsilon$  es la diferencia de emisividad entre la banda 31 y 32 ( $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{31} - \varepsilon_{32}$ ) y  $T_{31}$  y  $T_{32}$  la temperatura radiativa en las bandas 31 y 32. Los parámetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  y  $C$  son propios de la ecuación split window ajustada (Wan y Dozier, 1996).

Los coeficientes óptimos de la ecuación se obtienen de la siguiente manera: 1) los perfiles de temperatura atmosférica son separados en 2 grupos de acuerdo a la temperatura del aire cercano a la superficie ( $T_{\text{aire}} \leq 280$  K ó  $T_{\text{aire}} > 280$  K), así en el primer grupo se incluyen atmósferas de invierno y en el segundo grupo, atmósferas de verano cálidas; 2) las

columnas de vapor de agua atmosférico son separadas en intervalos de 0,5 cm; 3) la condición de la temperatura de superficie es separada en 2 grupos según  $T_{\text{aire}} - 16 \text{ K} \leq T_s \leq T_{\text{aire}} + 4 \text{ K}$  ó  $T_{\text{aire}} - 4 \text{ K} \leq T_s \leq T_{\text{aire}} + 16 \text{ K}$ , así el primer grupo representa la condición de noche y el segundo, la de día; 4) las emisividades son especificadas por  $0,89 \leq \epsilon \leq 1$  en pasos de 0,01 y  $-0,025 \leq \Delta\epsilon \leq 0,015$  en pasos de 0,005; 5) 9 ángulos de visión son seleccionados para cubrir todo el rango de visión desde el nadir a  $65,5^\circ$ . Los coeficientes en los algoritmos serán determinados por análisis de regresión separada de los datos simulados en cada grupo de temperatura de superficie, en cada intervalo de vapor de agua de cada columna a esos 9 ángulos de visión. Las columnas de vapor de agua y de temperatura del aire se obtienen de los productos MODIS de perfiles atmosféricos.

### 3.1.1.2. Validación y proceso de obtención del producto

La validación es la comparación entre las temperaturas calculadas desde satélite y las medidas in-situ. La validación debe cumplir con ciertos requerimientos espectrales, espaciales, temporales y angulares. Espectralmente, las emisividades de múltiples tipos de coberturas deben ser medidas para obtener las emisividades medias de la superficie. Espacialmente, los productos deben ser validados sobre distintas coberturas y diferentes latitudes, cubriendo un amplio rango de temperaturas de superficie y condiciones atmosféricas. Idealmente deberían ser zonas llanas con un tamaño mayor a  $3 \times 3 \text{ km}$  con superficies uniformes o uniformemente parceladas, de tal forma de reducir las incertezas en el muestreo espacial. Además se necesitan variaciones estacionales de temperatura de superficie y condiciones atmosféricas. Finalmente, el algoritmo debe ser validado desde distintos ángulos de observación para una misma cobertura (Wan, 1999).

El producto de  $T_s$  ha sido validado por el equipo de científicos de MODIS, en colaboración con los de la misión ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection) teniendo en cuenta estos requerimientos a través de múltiples campañas desde el año 1995 a la actualidad. Las mismas han sido realizadas con sensores de contacto, termómetros de mano, radiómetros y espectrómetros infrarrojos. A su vez, la validación post-lanzamiento ha sido realizada por comparación con otras misiones satelitales como ASTER. La precisión especificada del producto MYD11A25 es de 1 K, lo que ha sido corroborado por varios autores como Wan et al. (2004), Coll et al. (2005), Wan (2008), entre otros.

El proceso simplificado de obtención del producto comprende los siguientes pasos:

- 1) Utilización del producto de máscaras de nubes como dato de entrada, para eliminar las áreas con nubosidad.

- 2) Uso de los productos de radiancia, tipos de coberturas terrestres, de geolocalización, de perfiles atmosféricos y de vapor de agua y cobertura de nieve como datos de entrada.
- 3) Cálculo de las emisividades en las bandas 31 y 32 a partir del producto de tipos de coberturas y de cobertura de nieve. En esta etapa se suma el conocimiento previo de las emisividades de superficie obtenido de experiencias de laboratorio y de mediciones a campo.
- 4) Obtención de los coeficientes de la ecuación split-window ( $A_i, B_i$  y  $C$ ).
- 5) A partir del conocimiento de las emisividades de la superficie y la ecuación split-window se realiza el cálculo de la  $T_s$ .
- 6) Construcción del grillado de los resultados de la  $T_s$ . Repetición del paso 2) en el caso de que el grillado no se encuentre completo.
- 7) Obtención de las imágenes de  $T_s$  de 1 km. Composición de los estadísticos de índice de calidad de los datos.

La calidad del producto es provista píxel a píxel, los que se corresponden con los de la imagen de  $T_s$ . El índice de calidad así brindado indica la certidumbre del procedimiento de obtención de la  $T_s$ . Este índice tiene en cuenta la precisión de la calibración radiométrica y geométrica, la variación espacial de las temperaturas de brillo, la certidumbre en la clasificación de las coberturas terrestres, la incertidumbre en las emisividades, el efecto regional de la topografía y de las combinaciones de distintas coberturas y el efecto de las nubes tipo cirrus. La principal limitación del producto de  $T_s$  es que los datos estarán disponibles sólo en condiciones de cielo claro, pues las nubes impiden o dificultan la observación de la superficie terrestre desde satélite, tanto en el infrarrojo térmico como en la región visible del espectro.

### **3.1.2. Imágenes de Índices de vegetación**

Los índices de vegetación representan mediciones empíricas de la vigorosidad de la vegetación, son adimensionales y en general son derivados a partir del comportamiento espectral de los elementos del dosel de la vegetación en la región del rojo e Infrarrojo cercano (IRc) del espectro electromagnético. No sólo indican la presencia de vegetación en el píxel, sino que proveen una medida de la condición de la misma dentro del píxel. Su principal ventaja es su simplicidad y que no requieren información auxiliar más que las medidas en sí mismas.

El objetivo principal del producto MYD13A25 de MODIS es brindar múltiples imágenes de índices de vegetación combinadas en un mapa, tomando en cuenta las variaciones en las condiciones atmosféricas, los ángulos de visión del sensor y ángulos solares. Dicho producto brinda una consistente comparación espacial y temporal de la condición de la vegetación, permitiendo el monitoreo de su actividad fotosintética, la detección de cambios en la vegetación y la estimación de parámetros estructurales y radiométricos de la misma.

El producto es obtenido a partir de las reflectancias bidireccionales durante el día y es diseñado para proveer mapas de índices de vegetación de 16 días, de 1 km de resolución espacial, libres de nubosidad, atmosféricamente corregidos y ajustados con respecto al punto nadir. Incluye 2 índices de vegetación: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y EVI (Enhanced Vegetation Index), a su vez las reflectancias en la región del rojo e IRc ajustadas al punto nadir, azimuth y zenith relativos y parámetros de control de calidad de los datos.

### 3.1.2.1. Base teórica

La base teórica de los índices de vegetación se fundamenta en la respuesta espectral típica de las hojas en el visible e IRc del espectro (Figura 3.2). La energía reflejada en la región visible del espectro es muy baja como resultado de la alta absorción por parte de los pigmentos fotosintéticamente activos, especialmente en el azul (0,470  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0,670  $\mu\text{m}$ ). En la región del infrarrojo cercano la radiación incidente en la vegetación es reflejada con muy poca absorción, aumentando esta reflexión con el desarrollo, la salud y la turgencia vegetal. Consecuentemente, el contraste entre la respuesta en estas dos regiones del espectro brinda una medida de la cantidad y estado de la vegetación.

El índice más difundido e históricamente utilizado es el NDVI, formulado por [Deering \(1978\)](#) de la siguiente forma:

$$NDVI = \frac{\rho_{IRc} - \rho_{rojo}}{\rho_{IRc} + \rho_{rojo}} \quad (3.2)$$

donde  $\rho_{IRc}$  es la reflectancia en la región del Infrarrojo cercano y  $\rho_{rojo}$  es la reflectancia en la región del rojo del espectro. Dicho índice toma valores de -1 para agua y suelos húmedos y valores próximos a 1 para máxima cobertura vegetal en condiciones de alta fotosíntesis. Este índice ha sido ampliamente utilizado en estudios de carácter global, regional y local a través de imágenes de satélites como NOAA-AVHRR, Landsat y SPOT, entre otros. Sin embargo, hay que destacar que la señal reflejada por el fondo de la vegetación varía de acuerdo a sus propiedades reflectivas, por lo que el NDVI es muy sensible a esos cambios.

Por lo tanto este índice ha sido modificado de tal forma de que, tanto como no sea posible, no muestre sensibilidad a esas variaciones espectrales.

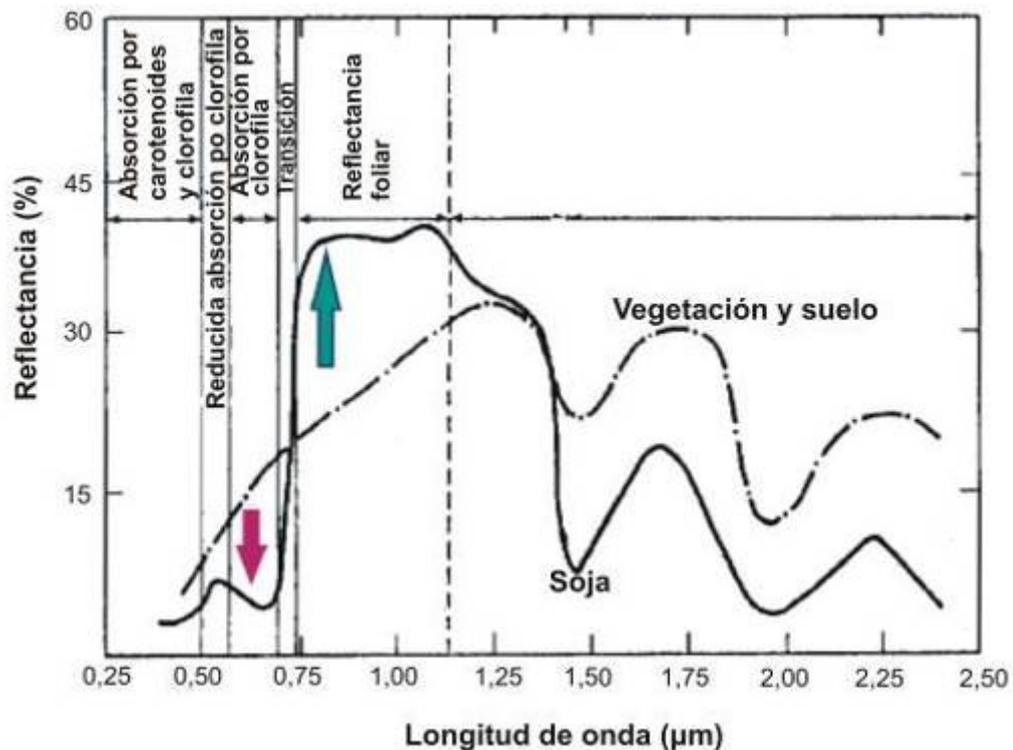


Figura 3.2. Curva de reflectancia para una vegetación fotosintéticamente activa (Tucker y Sellers, 1986).

Por otro lado, los aerosoles atmosféricos (humos, polvo, partículas de contaminación) dispersan parte de la radiación solar entrante y absorben parte de la reflejada por la superficie. Así, tienen un marcado efecto en los índices de vegetación, reduciendo el contraste entre las reflectancias del rojo e IRc. Huete y Liu (1994), entre otros autores, encontraron una alta influencia atmosférica en el NDVI, decreciendo notablemente con el aumento del contenido de aerosoles atmosféricos. Como la dispersión por aerosol es mayor en la banda azul que en el rojo, una forma sencilla de estabilizar el índice ante estos efectos atmosféricos es utilizar la diferencia entre las reflectancias en estas dos regiones del espectro (Kaufman-Tanré, 1992). En este sentido Liu y Huete (1995) desarrollaron un índice mejorado de vegetación:

$$EVI = G \frac{(\rho_{IRc} - \rho_{rojo})}{(\rho_{IRc} + C_1 \rho_{rojo} - C_2 \rho_{azul} + L)} \quad (3.3)$$

donde  $\rho$  es la reflectancia, G es un factor de ganancia (Gain, en inglés),  $C_1$  y  $C_2$  son coeficientes de peso del uso de la banda azul en la corrección del efecto del aerosol en la banda roja y L es un factor de ajuste del efecto suelo. Los coeficientes adoptados en el

algoritmo para MODIS son:  $G=2,5$ ,  $C_1=6$ ,  $C_2=7,5$  y  $L=1$  (Liu y Huete, 1995; Jiang, et al., 2008).

### 3.1.2.2. Obtención del producto

Básicamente el proceso de obtención del producto MYD13A25 comprende la combinación de las reflectancias obtenidas desde satélite en índices de vegetación, teniendo en cuenta la calidad de los datos de tal manera de obtener índices confiables para 16 días en forma espacialmente continua.

El proceso simplificado de obtención del producto es el siguiente:

- Calibración y registración de los datos crudos
- Aplicación de máscaras de nubes
- Corrección atmosférica por gases y aerosoles
- Ajuste angular por variaciones en los ángulos de observación y solar mediante la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF, por sus siglas en inglés)
- Aplicación de las ecuaciones de índices de vegetación

La Figura 3.3 esquematiza el procedimiento de obtención del producto de índices de vegetación y la relación con otros productos MODIS.

Durante las últimas décadas el índice de vegetación tradicionalmente utilizado en diversos estudios ha sido el NDVI obtenido por NOAA-AVHRR. Sin embargo, el MYD13A25 representa un avance con respecto al NDVI de NOAA-AVHRR, por las mejoras en los instrumentos y en el diseño de los sensores como así también por el proceso de obtención del producto (Huete y Justice, 1999). Este proceso minimiza los efectos de las nubes y de las variaciones angulares debidos a la posición sol-objeto-sensor.

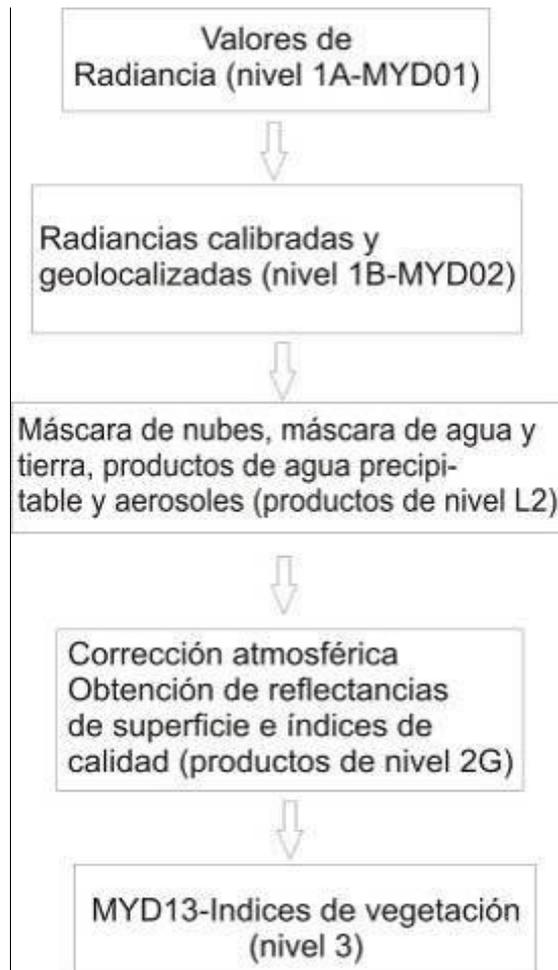


Figura 3.3. Relación entre productos MODIS, según distintos niveles de procesamiento (1A, 1B, L2...) de tierra y atmósfera requeridos para la obtención del MYD13A25.

### 3.1.2.3. Correcciones angulares y períodos de composición

Los productos de NDVI de NOAA-AVHRR se obtienen utilizando la técnica de composición del máximo valor (MVC, por sus siglas en inglés). Ésta es realizada seleccionando para cada píxel el máximo valor de NDVI, teniendo en cuenta la presencia de nubes y la calidad del dato (Goward et al., 1994; Eidenshik y Faundeer, 1994). Ya que la nubosidad residual, no considerada en la máscara de nubes, y la incidencia atmosférica reducen los valores de NDVI, el máximo valor de NDVI representaría las condiciones de menor contaminación del dato. A su vez estas influencias aumentan con el recorrido del haz de luz debido a un mayor ángulo de observación, por lo que el máximo NDVI implicaría un ángulo de visión cercano al nadir (Holben 1986; Cihlar et al., 1997).

Sin embargo el MVC no asegura condiciones de ausencia de nubes o de atmósfera clara (Goward et al., 1991; Moody y Strahler, 1994; Cihlar et al., 1997). En el cálculo del producto MODIS se utiliza el modelo BRDF (Walthall et al., 1985) para derivar las reflectancias al punto nadir y así componer los índices de vegetación estandarizados a dicho punto. Este

método ha mostrado ser superior al MCV (Leeuwen et al., 1996), pues este último tiende a sobreestimar los valores. No obstante, como en ciertos lugares es difícil obtener 5 días o más despejados, que es lo que requiere el modelo BRDF, se mantiene el modelo MCV como método alternativo.

Con respecto al período de composición, la mínima cantidad de días está principalmente condicionada por la disponibilidad de datos libres de nubes. Períodos más cortos permiten identificar cambios más dinámicos en la vegetación, sin embargo aumenta la probabilidad de pérdida de píxeles en la imagen final por causa de la nubosidad. El período de 16 días fue considerado como el más conveniente por el grupo científico de MODIS para eliminar las nubes y lograr cobertura de todas las latitudes con un pequeño ángulo de visión.

#### **3.1.2.4. Validación**

La capacidad del índice de vegetación de detectar diferencias espaciales y temporales en la vegetación se ha evaluado con medidas biofísicas en terreno, modelos teóricos de transferencia radiativa de la vegetación, salidas de modelos bioclimáticos y medidas de satélite.

La comparación con las salidas de los modelos de transferencia radiativa se realiza para comprobar que el comportamiento del índice concuerda con las bases teóricas de la transferencia radiativa. Los índices han sido testeados con modelos de 2 vías, que son aquellos que simulan el balance de energía en forma diferenciada entre el suelo y la vegetación, modelos de dispersión por inclinación de las hojas y modelos más complejos en tres dimensiones, que tienen en cuenta aspectos como la densidad de plantación, orientación y distribución de la superficie foliar.

Como los modelos de transferencia radiativa dan sólo un indicio preliminar de cómo funciona el índice de vegetación, también se han realizado comparaciones con medidas en áreas donde los modelos ya han sido validados. Estas mediciones son de tipo biofísicas (índice de área foliar y biomasa entre otras características) y de muestreo de la vegetación de tipo destructivo. La comparación con datos de satélites ya existentes incluye a Landsat TM (Thematic Mapper), NOAA-AVHRR y SeaWiFS. Las áreas testeadas comprenden ambientes de bosques perennes, cultivos, sabanas y desiertos.

## **3.2. Procesamiento de las imágenes y cálculo del TVDI**

El procesado y análisis de las imágenes se realizó con el software ENVI, versión 4.3. Tanto los productos MODIS de temperatura de superficie como de índices de vegetación

originalmente están proyectados en proyección sinusoidal. Para la reproyección de las mismas se utilizó la herramienta Conversion Tool Kit de ENVI, la que permite extraer los datos de interés de los productos MODIS en formato HDF (Formato de Datos Jerárquicos) y convertirlos a distintos sistemas de proyección. Las imágenes fueron reproyectadas mediante el método de remuestreo de vecino más cercano a coordenadas geográficas Lat/Long, Datum WGS-84, con unidades expresadas en grados. La Figura 3.4 muestra una imagen de EVI en proyección sinusoidal (Figura 3.4 A) y reproyectada (Figura 3.4 B) para una porción de la República Argentina.

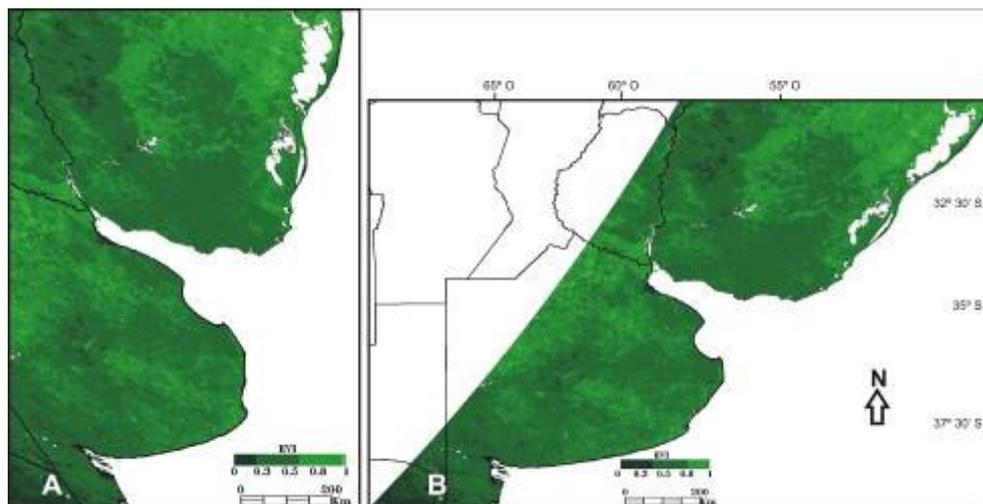


Figura 3.4. Pasaje de la proyección original sinusoidal (A) y reproyectada a coordenadas geográficas Lat/Long (B) sobre una imagen de EVI coloreada.

En el análisis se incluyeron los meses de primavera y verano (octubre a marzo) pues, como se señaló en el Capítulo 2, incluyen al período crítico o determinante del rendimiento de la mayor parte de los cultivos de grano fino y grueso en la región pampeana. Para lograr variabilidad en las condiciones hídricas del área de estudio y aplicar la metodología del TVDI en períodos con diferentes humedades del suelo, se analizaron: la primavera y verano de 2002-2003 (período húmedo), 2007-2008 (período seco) y 2009-2010 y 2010-2011 (períodos normales) (Sacarpati, et al., 2008; Bono et al., 2010).

Con el propósito de obtener las imágenes de los períodos de estudio, primeramente se realizaron los mosaicos de las imágenes producto de Ts y EVI del área de estudio. Como el producto de Ts comprende 8 días y el de índice de vegetación 16 días, para igualar los períodos de lectura de ambos se siguió metodológicamente a Han et al. (2010), promediando 2 imágenes de Ts por cada imagen de EVI. Posteriormente se realizó un recorte de toda el área, cuyas coordenadas de los puntos extremos fueron  $31^{\circ} 46' 13,8'' S - 68^{\circ} 13' 41,79'' O$  y  $39^{\circ} 55' 48,95'' S - 51^{\circ} 30' 54,01'' O$ . Este recorte integró el área de estudio de esta investigación (Figura 3.5).

Posteriormente se calcularon las imágenes mensuales de Ts y EVI con el mismo procedimiento de cálculo de las quincenales indicado. Como se mencionó anteriormente, la mayor limitación de las imágenes de Ts es la existencia de píxeles con valores cero por la presencia de nubes (Wan, 1999), por lo que a las imágenes mensuales se les aplicaron máscaras para descartar los píxeles con valores no válidos. Una vez calculadas las imágenes mensuales de Ts y EVI, se contó con 24 imágenes de Ts y 24 de EVI. Con ellas se armaron 6 pares de Ts y EVI mensuales para cada período de estudio, los que fueron ordenados por fecha e incorporados en un mismo archivo con el fin de facilitar los posteriores cálculos. Las imágenes obtenidas se muestran en las Figuras 1 y 2 del Anexo 1.

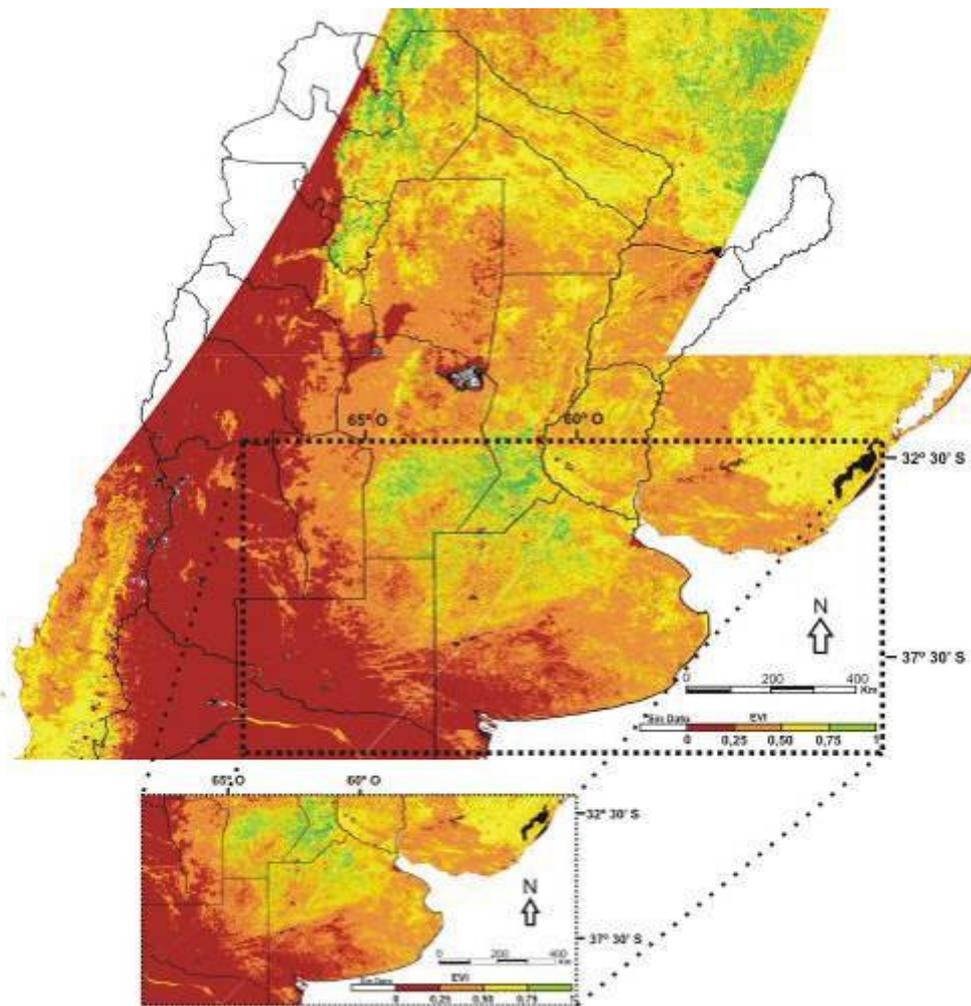


Figura 3.5. Ubicación del área de estudio sobre un mosaico de EVI (9 a 24 enero de 2008).

### 3.2.1. Cálculo del Índice de sequedad en función de la temperatura y la vegetación (TVDI)

Una vez logradas las imágenes mensuales de Ts y EVI, se realizó el cálculo de los límites

secos y húmedos mensuales del TVDI (Ecuación 1.1) para el área de estudio durante los períodos analizados. En zonas áridas y semiáridas, para una determinada cobertura de vegetación, los píxeles con una alta  $T_s$  son más fácilmente detectables que los píxeles con máximo contenido de humedad y evapotranspiración máxima, por lo que es muy probable que el límite húmedo allí observado no sea el verdadero, lo que conduce a una subestimación del TVDI (Tang, et al., 2010). A su vez, ha sido reportado por Goetz (1997) que la relación triangular entre  $T_s$  e índices de vegetación es en gran parte determinada por la fracción de cobertura de la vegetación. Por esto el cálculo de los límites secos se realizó sobre una subzona semiárida, cuadrada de 152.000 píxeles (15.200.000 ha) ubicada entre el límite de las provincias de La Pampa y Buenos Aires y el cálculo de los límites húmedos, en una subzona húmeda de igual superficie en el noreste de la provincia de Buenos Aires (Figura 3.6). De esta forma se aseguró una adecuada variación de fracción de coberturas de vegetación, además de que los límites secos representen condiciones de escasa disponibilidad de agua en el suelo y los límites húmedos, condiciones de alta humedad del suelo. Así se garantizaron los requisitos necesarios para un adecuado cálculo del TVDI.

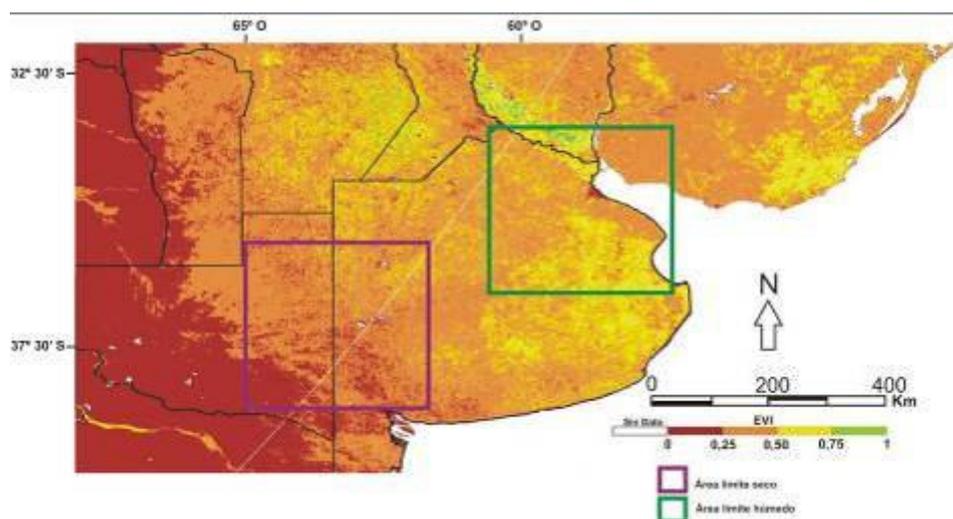


Figura 3.6. Ubicación de las subzonas utilizadas para la obtención de los límites húmedos y secos.

Una vez definidas estas subzonas, se realizaron los diagramas de dispersión de  $T_s$  en función de EVI para cada mes. En el espacio triangular de dispersión obtenido para la subzona semiárida se extrajeron los píxeles con mayor  $T_s$  para pequeños intervalos de EVI, que fueron los utilizados para el cálculo de los parámetros de los límites secos mensuales (Figura 3.7). Siguiendo metodológicamente a Sandholt et al. (2002) y Han et al. (2010), estos parámetros se calcularon a través de la relación lineal entre  $T_s$  y EVI con los píxeles seleccionados anteriormente utilizando el método de mínimos cuadrados. Para el cálculo de los límites húmedos, del diagrama de dispersión obtenido en la zona húmeda se extrajeron

los puntos de menor  $T_s$  para cada valor de EVI y se realizó un promedio de ellos, según [Chen, et al. \(2011\)](#) (Figura 3.8).

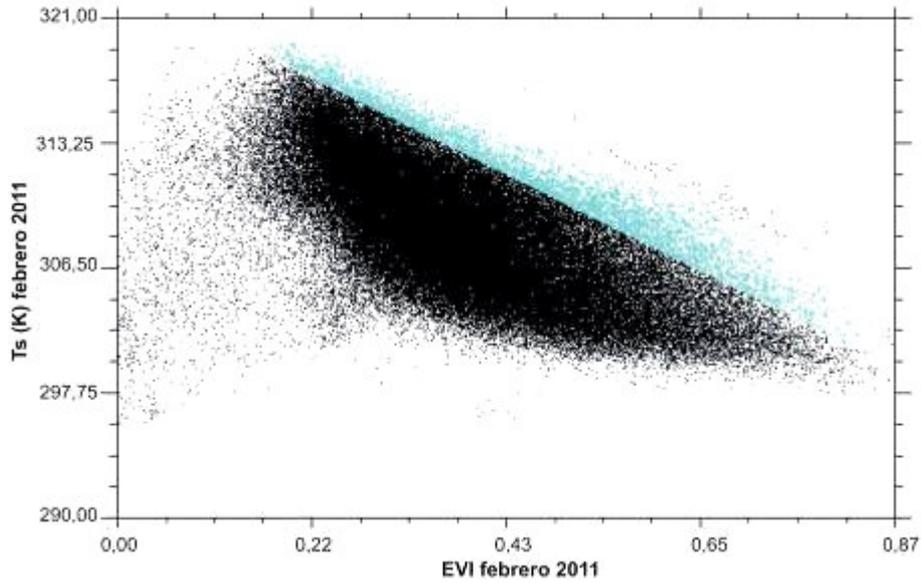


Figura 3.7. Ejemplo de píxeles seleccionados para el cálculo del límite seco.

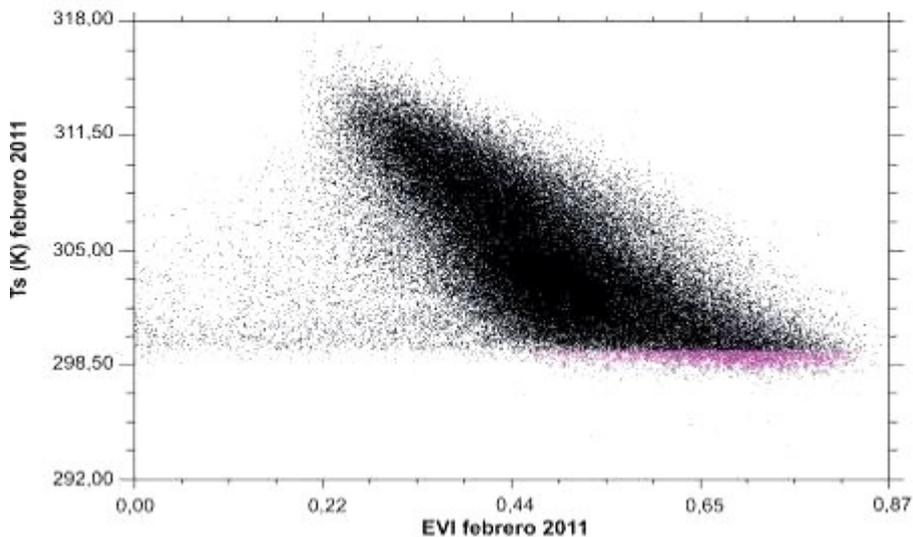


Figura 3.8. Ejemplo de píxeles seleccionados para el cálculo del límite húmedo.

Ha sido señalado por [Sandholt et al \(2002\)](#) que especialmente en períodos secos se dificulta la estimación de los parámetros del TVDI, pues el espacio de dispersión entre  $T_s$  e índice de vegetación no queda bien definido. Para corroborar la correcta definición de los límites húmedos se observó la  $T_s$  de un conjunto de cuerpos de agua con una superficie total de 930 km<sup>2</sup> del sistema de lagunas Las Encadenadas (36° 57' 52,56" S; 62° 28' 22,36", 930 km<sup>2</sup>). Como en los cuerpos de agua libre no existen limitaciones para la evaporación, la  $T_s$  tiende a ser mínima y es de utilidad para comprobar la definición de los límites húmedos ([Rivas y Houspanossian, 2006](#)).

### 3.2.2. Obtención de las imágenes de TVDI y comparación con humedad del suelo

Para que los valores de TVDI fueran comparables temporalmente, de toda la serie analizada se obtuvieron los límites secos y húmedos mensuales extremos, es decir, los que reflejaban las condiciones más secas y húmedas de la superficie para cada mes, respectivamente. En cuanto a los límites secos, una mayor pendiente y mayor ordenada al origen son indicadoras de condiciones más secas en la superficie, por lo que se compararon los límites secos calculados según sus pendientes y ordenadas al origen obtenidas en los ajustes. Se definieron como límites secos extremos aquellos con la mayor pendiente y ordenada al origen y como húmedos extremos a los de menor  $T_s$  media. Definidos los límites extremos, se calcularon las imágenes de TVDI mensuales ([Holzman et al., 2012](#)), según la Ecuación 1.1 del TVDI.

Por otro lado, desde 2006 el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) “Dr. Eduardo J. Usunoff” ha estado registrando datos desde una estación de balance de energía con el fin de realizar estudios de carácter local y regional en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 3.9A). La misma se encuentra actualmente ubicada en el establecimiento agrícola Laura Leofú (37° 14' S, 59° 34' O, 235 msnm), localizado a 50 km al Oeste de la ciudad de Tandil, Argentina. A su vez se cuenta con una estación meteorológica ubicada en el campus Tandil de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (37° 19' S, 59° 05' O, 214 msnm) ([Carmona et al., 2011](#)).

Para conocer la humedad en los primeros centímetros del suelo, dichas estaciones cuentan con sensores EC-10 H<sub>2</sub>O (Decagon Devices, Inc.) y EC-20 H<sub>2</sub>O (Figura 3.9B). Estos sensores miden la constante dieléctrica del suelo, la que se relaciona directamente con su contenido volumétrico de humedad. Registran la humedad integrada de los primeros centímetros del suelo (en el caso del modelo EC-10 mide 10 cm de longitud y el EC-20 mide 20 cm de longitud) con un error menor al 3%.

Varios autores ([Sandholt et al., 2002](#); [Rivas y Houspanossian, 2006](#); [Mallik et al., 2009](#); [Han et al., 2010](#)) han mostrado la estrecha relación entre el TVDI y el contenido de humedad del suelo en distintas regiones del mundo. Sin embargo, se corroboró la sensibilidad del TVDI a los cambios de humedad del suelo en el área de estudio. Para ello se calcularon las medias mensuales de las humedades a partir de datos diarios tomados en la estación del campus Tandil, a 10 y 20 cm, en el período noviembre 2009 a marzo 2010 y noviembre 2010 a febrero 2011. Estos datos se correlacionaron con los TVDI mensuales de una cuadrícula de 3x3 píxeles centrada en las coordenadas de dicha estación. El nivel de significancia del

análisis de correlación fue de 5%. De esta manera se obtuvo el ajuste y la ecuación que relaciona el TVDI con la humedad del suelo.

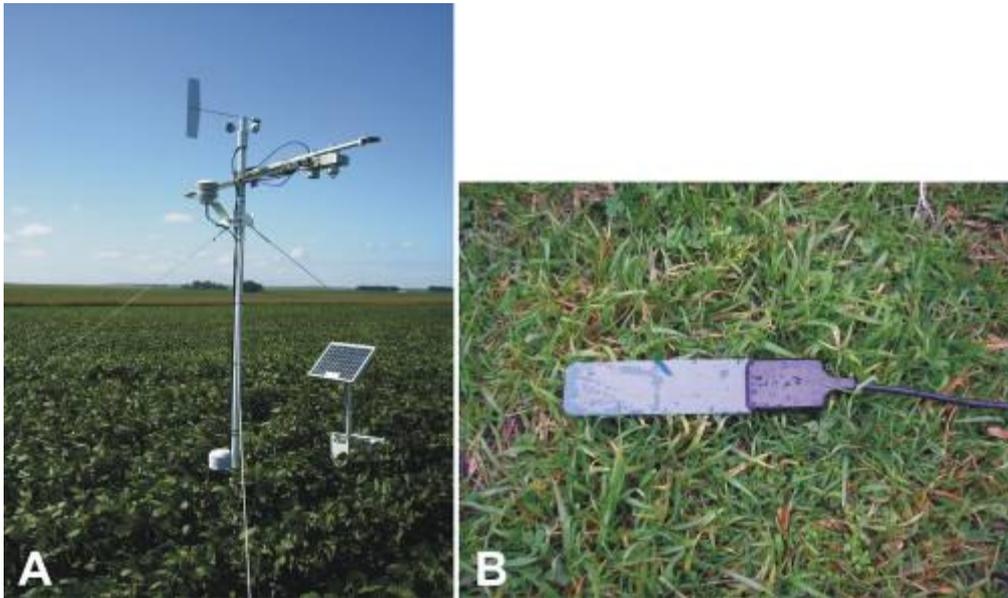


Figura 3.9. A) Estación de balance de energía sobre un cultivo de soja, B) sensor EC-10 H2O (Decagon Devices, Inc.).

Paralelamente, con los registros de la estación ubicada en Laura Leofú, sobre un cultivo de soja, se validaron los resultados de las estimaciones de humedad a nivel semanal suponiendo que el EVI de 16 días era equiparable con la  $T_s$  semanal. Varios autores (Moran et al., 1994; Gillies y Carlson, 1995; Sandholt et al., 2002) han señalado que la incertidumbre del TVDI en la estimación de la humedad del suelo es mayor a muy altas coberturas de vegetación, donde los límites seco y húmedo están muy próximos entre sí y a muy bajas coberturas, donde el efecto del suelo desnudo es importante. Por tales motivos en la validación se descartaron los píxeles sin dato y se seleccionaron las semanas con cobertura de cultivo media a alta. Así, utilizando el ajuste encontrado en la estación campus Tandil se estimó la humedad del suelo para la estación Laura Leofú y se la contrastó con la humedad medida integrada a 10 cm, con un nivel de significancia en la correlación del 5%. Para evaluar el desempeño del ajuste encontrado en detectar los cambios en la humedad del suelo, se calculó el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y parámetros asociados al error de estimación como la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el bias (MBE), los que fueron expresados en las unidades de los datos medidos (Willmott y Matsuura, 2005; Kahimba et al., 2009), el error relativo (RE) y el índice de concordancia de Willmott (d; Willmott, 1981), ambos adimensionales (Ecuaciones 3.4 a 3.8)

$$r^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.4)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)}{N} \quad (3.5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{N}} \quad (3.6)$$

$$RE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (3.7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3.8)$$

donde  $N$  es el número de observaciones,  $O_i$  es el valor observado y  $E_i$  es el valor estimado.  $\bar{E}$  y  $\bar{O}$  son los valores medios de  $E$  y  $O$ . El parámetro RMSE muestra las variaciones pesadas de los errores residuales entre los valores medidos y los estimados. El MBE es un indicador de la sobre o subestimación por parte del modelo con respecto a los valores medidos; valores positivos de MBE indican subestimación y negativos, sobreestimación. El RE brinda una comparación entre el error absoluto (RMSE) y el promedio de los valores medidos ( $\bar{O}$ ). El índice  $d$  es también una medida de tipo relativa, cuyos valores cercanos a 1 indican alta correspondencia y valores cercanos a 0, baja correspondencia entre los valores medidos y los estimados. El modelo es perfecto cuando  $b$  (pendiente de la regresión lineal) =  $r^2 = d = 1$  y  $MBE = RMSE = RE = 0$ .

### 3.2.3. Relación entre rendimientos de cultivos y TVDI

Realizada la correlación del TVDI con el contenido de humedad del suelo, se investigó su relación con el rendimiento de cultivos tanto de grano fino como grueso. Para ello, en distintas ecorregiones de la región pampeana se realizó un análisis estadístico sobre los cultivos más importantes o dominantes de acuerdo a su área sembrada, de tal manera de que la señal recibida por el satélite sea representativa de las superficies de interés (Benedetti y Rosini, 1993; Mkhabela, et al., 2011). El análisis estadístico se realizó en forma separada para cultivos de grano fino y grueso en ciertos partidos o departamentos de las ecorregiones: Pampa arenosa (D27), Pampa endorreica (D28), Sierras septentrionales

bonaerenses (D33) y Planicies poligenéticas de La Pampa (D36) (Figura 3.10). No se consideró la ecorregión Pampa deprimida pues predomina la actividad ganadera. La Pampa interserrana no se analizó pues, si bien es importante para la producción de granos, no se encontraron áreas cultivadas con suficiente extensión para la escala del trabajo. No obstante, en el Capítulo 2 se han descrito sus características pues el método puede ser aplicado en el futuro. A partir de los valores medios de TVDI de las zonas cultivadas de los partidos considerados, se realizaron análisis de regresión entre TVDI (variable independiente) y rendimiento (variable dependiente).

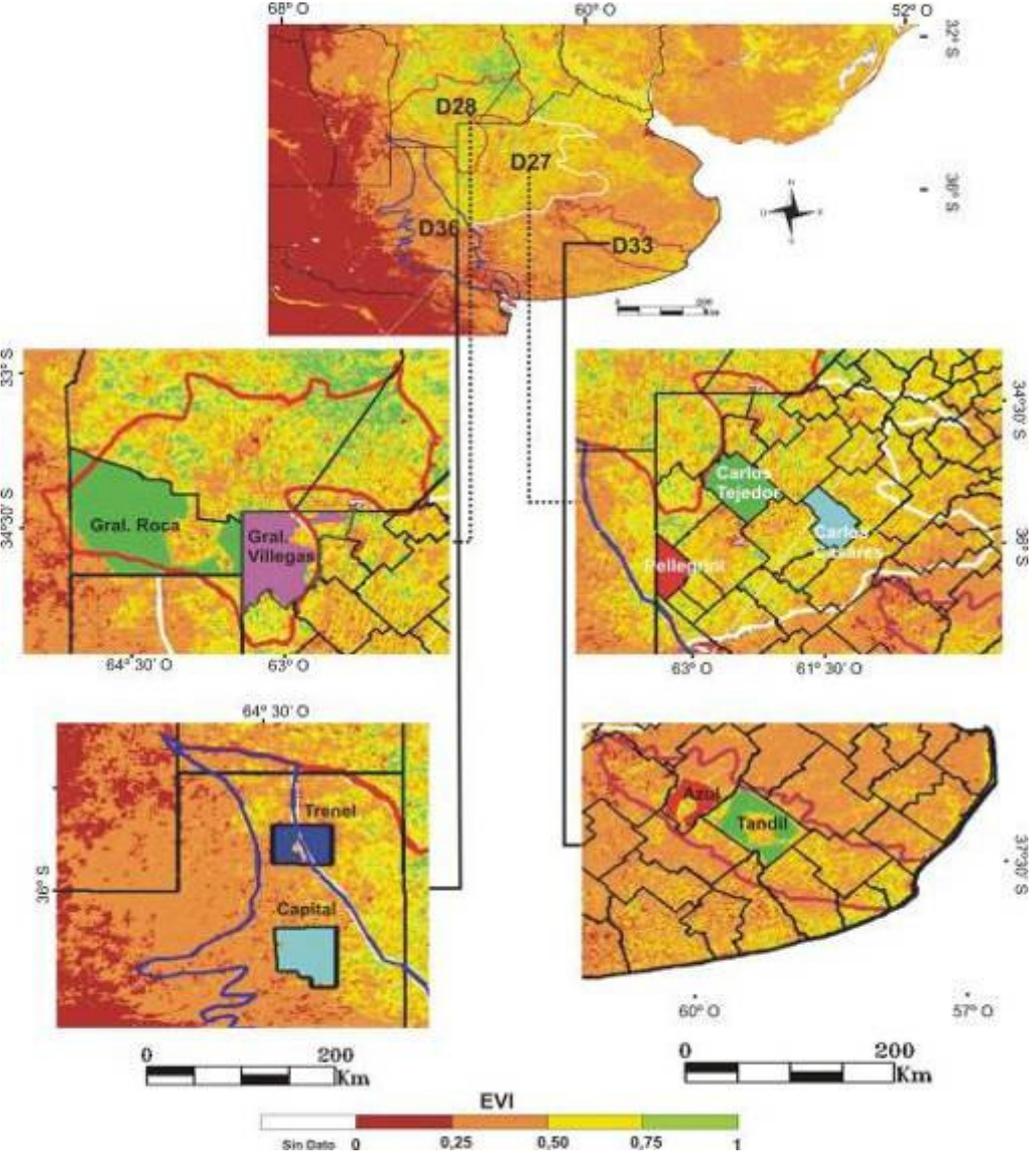


Figura 3.10. Ecorregiones y partidos/departamentos utilizadas en el cálculo de los ajustes entre TVDI y rendimiento de cultivos, imagen EVI de enero 2011.

Es necesario señalar que las condiciones hídricas durante las etapas iniciales del desarrollo de los cultivos determinarían la cantidad de plantas que sobreviven mientras que la disponibilidad de agua durante el período crítico del rendimiento (floración y llenado del

grano) determinan su productividad (Mkhabela et al., 2005). En este sentido varios autores (Rasmussen, 1992; Unganai y Kogan 1998; Mkhabela y Mkhabela, 2000) han encontrado que el rendimiento de diversos cultivos es más sensible al NDVI acumulado de dicho período que al acumulado de todo el desarrollo. Así, en el presente trabajo fueron considerados los TVDI mensuales acumulados del período crítico del rendimiento para esos cultivos, el cual es variable según cada ecorregión<sup>2</sup>. El parámetro para evaluar la relación entre esas dos variables fue el coeficiente de determinación ( $r^2$ ). Los datos utilizados de rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) fueron las estimaciones a nivel de departamento por campaña de cosecha disponibles en el Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (MAGyP) (<http://www.sii.gov.ar/index.php>).

Posteriormente se realizó la validación de los ajustes obtenidos para evaluar si el TVDI calculado desde satélite puede ser utilizado exitosamente para estimar rendimiento de cultivos a la escala de análisis de este trabajo (1:1.000.000 aproximadamente). Para ello se contrastó el rendimiento estimado a través del TVDI con los datos de rendimiento del MAGyP a nivel de partido, tomando otros partidos o fechas no considerados en el cálculo de los ajustes (Figura 3.11). El desempeño de las ecuaciones halladas se evaluó a través de los parámetros RMSE, MBE, RE y  $d$ .

En el caso de la ecorregión de Planicies poligenéticas de La Pampa, debido a que dicha ecorregión es muy extensa y sus condiciones climáticas muy diferentes, para el cálculo de los ajustes y la validación se seleccionó una zona de importancia productiva y homogénea en sus características edafológicas, hidrológicas, geológicas y de sistemas de cultivos predominantes (Soriano et al., 1991; Quiroga y Pérez Fernández, 2008). Esta zona comprendió la planicie con tosca de la provincia de La Pampa.

En la Tabla 1 se muestra la superficie de las áreas cultivadas de los partidos utilizados para cálculo de los ajustes entre TVDI y rendimiento de cultivos y su validación en cada ecorregión. Se observa que la extensión de dichas áreas analizadas osciló entre 194.700 ha (partido de Azul, provincia de Buenos Aires) y 1.574.300 ha (departamento de General López, provincia de Santa Fe). La considerable extensión de estas áreas permitió realizar los cálculos del TVDI para zonas cultivadas en forma adecuada con las imágenes productos MODIS de resolución espacial de 1 km.

---

<sup>2</sup> En el Capítulo 2 se detallan los períodos críticos para cada ecorregión y cultivo.

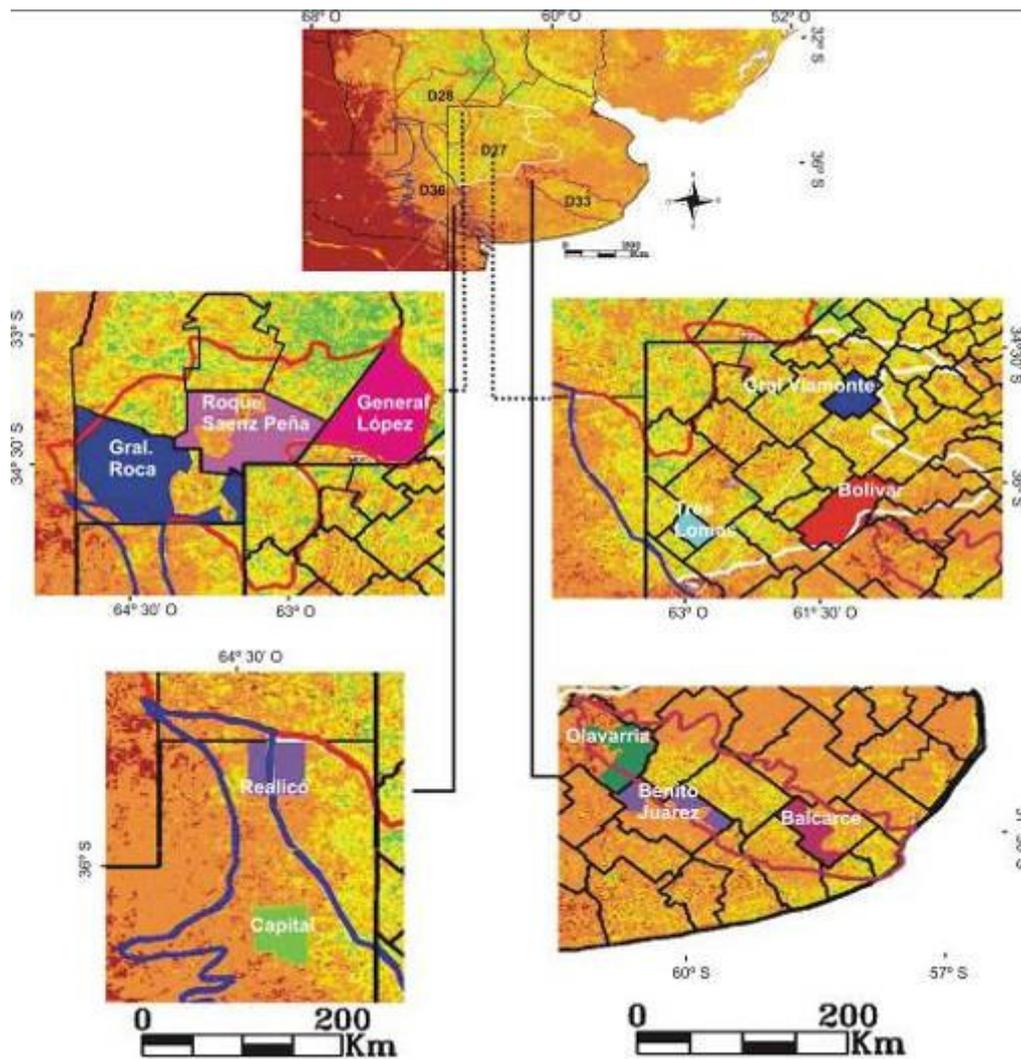


Figura 3.11. Ecorregiones y partidos/departamentos utilizadas en la validación de los ajustes entre TVDI y rendimiento de cultivos, imagen EVI de enero 2011.

Tabla 3.1. Superficie de las áreas cultivadas utilizadas para el cálculo de los ajustes entre TVDI y rendimiento y su validación.

Ecorregión	Partido/departamento	Superficie (ha)
D27	Carlos Tejedor	553.900
	Carlos Casares	356.100
	Pellegrini	266.000
	General Viamonte	302.000
	Bolívar	702.200
	Tres Lomas	178.200
D28	General Roca	1.528.800
	General Villegas	760.600
	General López	1.574.300
	Roque Sáenz Peña	1.028.700
D33	Tandil	350.400
	Azul	194.700
	Olavarría	372.700
	Benito Juárez	278.500
	Balcarce	284.700
D36	Capital	250.000
	Trenel	198.900
	Realicó	264.300

### **3.2.3.1. Estimaciones de rendimiento utilizadas**

Una de las funciones del MAGyP es suministrar la información estadística básica del sector agropecuario nacional. Para ello dispone de una red de 34 delegaciones en las principales zonas productivas del país y con 34 delegados, en su mayor parte profesionales. Actualmente sus esfuerzos están centrados en 18 cultivos principales (cereales, oleaginosas, poroto y algodón). Los técnicos de la Sede Central tienen la función de recibir los informes y datos de las delegaciones y analizar la información, como así también realizar publicaciones periódicas de las estimaciones agrícolas.

La captación de los datos comprende principalmente 2 métodos. Un método “subjetivo” o de informantes calificados. Básicamente consiste en la consulta a personas que tienen relación directa con la producción y/o comercialización de productos agrícolas (productores, gerentes de firmas acopiadoras y cooperativas, distribuidores de agroquímicos, extensionistas del INTA, etc.), organismos que realizan predicciones (empresas exportadoras e industrias) y organismos que brindan información relacionada al sector (Servicio Meteorológico Nacional, Instituto de Clima y Agua del INTA, etc.).

Debido a que esta metodología se basa en la apreciación de los informantes y no frecuentemente en la medición sistemática de las variables de interés, se utiliza además el método de “módulos”. El mismo es aplicado por varios delegados y se fundamenta en subdividir cada partido/departamento que integra la delegación en unidades menores con una cierta homogeneidad en el tipo de producción (soja, maíz, tambo, etc.), estructura productiva o tipo de rotación y con límites claramente definidos en mapas. Una vez obtenida la superficie de esas subáreas o módulos se determina, con el concurso de los informantes allí localizados, el porcentaje correspondiente a ganadería, agricultura y zonas no utilizadas en la producción. Dentro de la superficie agrícola luego se define la distribución de los distintos cultivos, el área sembrada, superficie cosechada, una calificación de la humedad del suelo (en exceso, adecuada, principio de sequía, sequía), estado fenológico de crecimiento y desarrollo, aspecto del cultivo (muy bueno, bueno, regular y malo), fechas de inicio y finalización de la siembra o la cosecha y registros pluviométricos. Estos análisis son complementados paralelamente con el empleo de imágenes satelitales. El procedimiento se repite a nivel semanal en cada uno de los módulos hasta completar el partido o departamento y la Delegación. Posteriormente la Sede Central realiza las estimaciones a nivel nacional. Una vez consolidadas las cifras finales para cada cultivo, éstas son incorporadas a la base de datos del SIIA.

### 3.2.4. Flujo metodológico integrado

Como los parámetros del TVDI son propios de las imágenes analizadas, el método de trabajo desarrollado en este estudio puede ser replicado en otras regiones con el fin de relacionar el TVDI con el rendimiento de los cultivos. Con el fin de brindar una integración del método de trabajo y facilitar su potencial aplicación, la Figura 3.12 esquematiza el flujo metodológico completo desarrollado en esta tesis. Se detalla el proceso que se inicia con imágenes MODIS producto de Ts y EVI y culmina con la estimación de rendimientos a nivel regional.

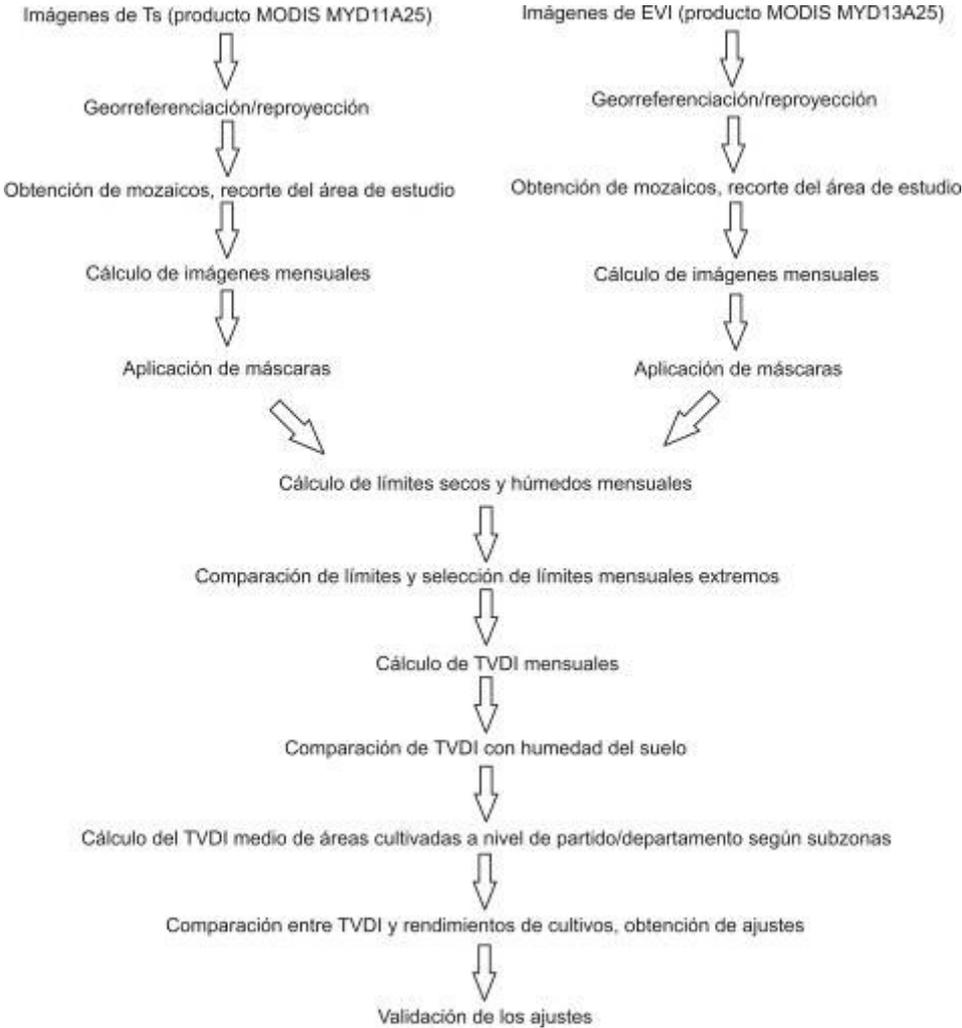


Figura 3.12. Flujo metodológico integrado desarrollado en la tesis.

## Capítulo 4

### RESULTADOS Y DISCUSION

#### 4.1. Índice de sequedad en función de la temperatura y la vegetación (TVDI)

Como se detalló en la metodología de trabajo, a partir de los diagramas triangulares de dispersión de  $T_s$  en función de EVI, se obtuvieron los límites secos y húmedos para el cálculo del TVDI. En este capítulo primeramente se presentan los resultados y el análisis de los límites secos y húmedos mensuales obtenidos. Luego se muestra el análisis espacial y temporal de las imágenes mensuales de TVDI. Posteriormente se exponen los resultados de la relación entre TVDI y la humedad superficial del suelo. Luego se aborda el estudio de la relación entre TVDI y rendimiento para 4 ecorregiones de la región pampeana. El capítulo finaliza con una propuesta de un modelo conceptual basado en los resultados obtenidos.

##### 4.1.1. Límites húmedos y secos obtenidos

El parámetro  $T_{s_{min}}$  o límite húmedo de la ecuación del TVDI fue estimado a partir de los píxeles con valores mínimos de  $T_s$  para cada valor de EVI extraídos de los triángulos de dispersión propios de cada imagen mensual. Con el fin de corroborar la correcta definición de los límites húmedos se observó la  $T_s$  en los cuerpos de agua que componen las lagunas Las Encadenadas ( $36^{\circ} 57' 52,56''$  S;  $62^{\circ} 28' 22,36''$ ,  $930 \text{ km}^2$ ). La Figura 4.1 muestra el comportamiento temporal de la  $T_{s_{min}}$  y de la  $T_s$  de dichos cuerpos de agua. En todos los casos la  $T_s$  de ellos fue menor a la  $T_{s_{min}}$  estimada para superficies húmedas, con diferencias entre 0,7 K (marzo de 2008) y 7,9 K (diciembre de 2007). De esta manera se comprueba que los valores de los límites húmedos establecidos fueron adecuadamente definidos para el cálculo del TVDI, aún en los períodos de escasez hídrica 2007-2008 y 2010-2011.

Corroborada la coherencia de los valores de  $T_{s_{min}}$  y con el fin de que los resultados del TVDI de distintos períodos puedan ser comparables, se establecieron límites húmedos extremos, definidos como las  $T_{s_{min}}$  más bajas para cada mes. La Tabla 4.1 muestra los valores de  $T_{s_{min}}$  mensuales obtenidos y en negrita, los límites húmedos extremos seleccionados para el cálculo del TVDI. Los valores oscilaron entre un mínimo de 293,9 ( $20,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , correspondiente al mes de octubre de 2009) y un máximo de 303,5 ( $30,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , correspondiente al mes de diciembre de 2007).

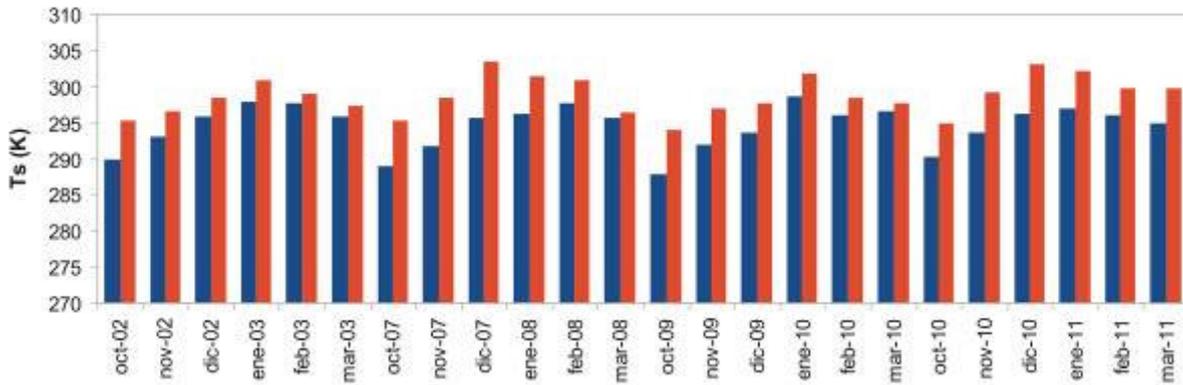


Figura 4.1. Comparación entre Ts (rojo) en cuerpos de agua y Tsmín (azul) calculada para cada mes.

Tabla 4.1. Límites húmedos calculados para el conjunto de imágenes utilizadas en el estudio.

Fecha	Límite Húmedo (K)						
oct-02	295,3	oct-07	295,4	oct-09	<b>293,9</b>	oct-10	294,8
nov-02	<b>296,6</b>	nov-07	298,5	nov-09	297,0	nov-10	299,3
dic-02	298,5	dic-07	303,5	dic-09	<b>297,6</b>	dic-10	303,2
ene-03	<b>300,8</b>	ene-08	301,5	ene-10	301,9	ene-11	302,2
feb-03	299,0	feb-08	300,9	feb-10	<b>298,5</b>	feb-11	299,8
mar-03	297,3	mar-08	<b>296,4</b>	mar-10	297,6	mar-11	299,8

(Negrita: límites húmedos extremos utilizados para el cálculo del TVDI)

Luego de la obtención de los límites húmedos se realizó el cálculo de los límites secos mensuales. En la Figura 4.2 se observan dichos límites, propios de las 24 imágenes mensuales consideradas en el análisis. En general, el EVI y la Ts aumentan desde octubre alcanzando máximos en diciembre, enero y febrero y luego declinan en marzo. En los 4 períodos de estudio se observaron valores máximos de EVI próximos a 0,8 en los meses de enero, febrero y marzo. Octubre y noviembre pueden ser caracterizados por los valores más bajos de EVI (próximos a 0,7), a excepción de octubre de 2007 que mostró máximos mayores a los observados en los otros 3 años. Por la poca variabilidad de las Ts observadas en esa fecha, se deduciría un alto contenido de humedad previa en el suelo que permitió un buen desarrollo temprano de la vegetación.

En cuanto al comportamiento temporal, los valores de EVI responden fundamentalmente a la etapa de crecimiento en la que se encuentra la vegetación dominante en el área. Es decir, los cultivos de grano grueso en octubre y noviembre se encuentran en etapas iniciales e intermedias de su desarrollo fenológico, con baja cobertura foliar, por lo que la incidencia del suelo en la señal recibida por el satélite es mayor que en los meses subsiguientes, resultando en bajos valores de EVI. En enero, febrero y marzo se encuentran en pleno desarrollo, con máximos valores de EVI.

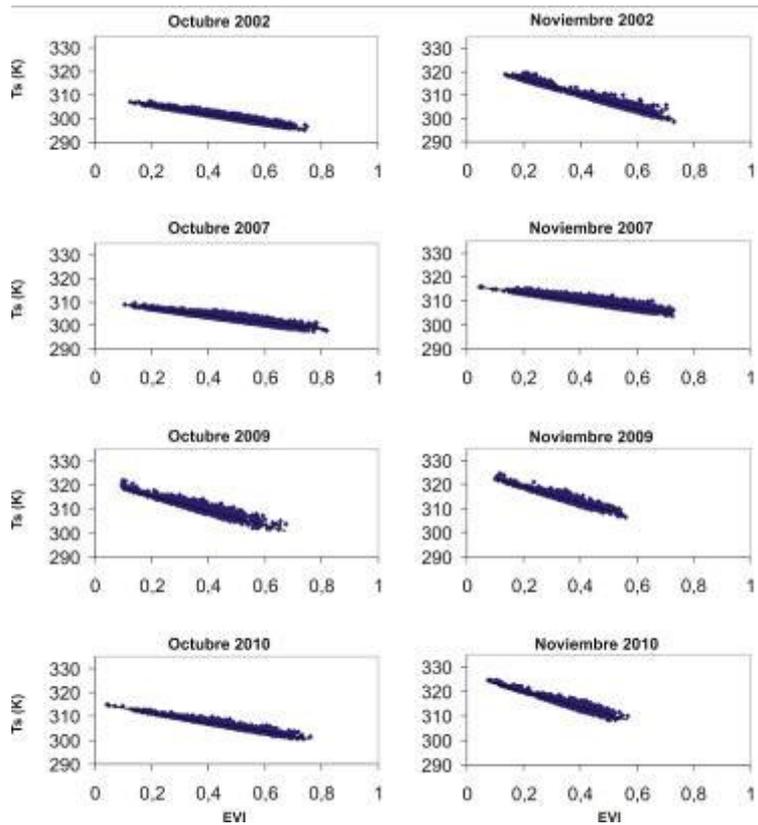


Figura 4.2. Dispersiones EVI/Ts utilizadas para el cálculo de los límites secos para las 24 imágenes mensuales analizadas.

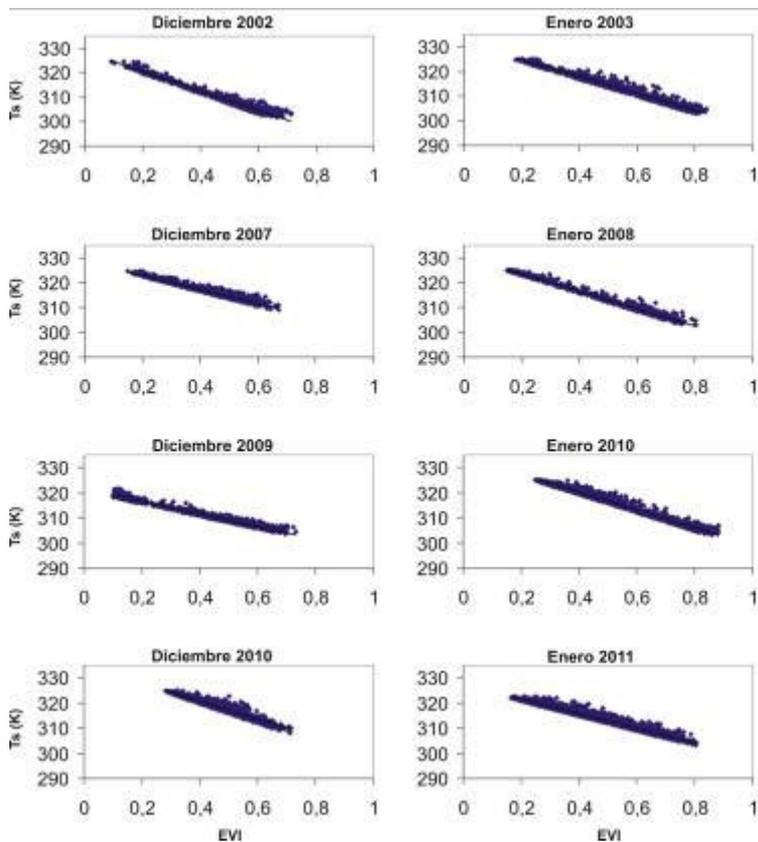


Figura 4.2. Continuación.

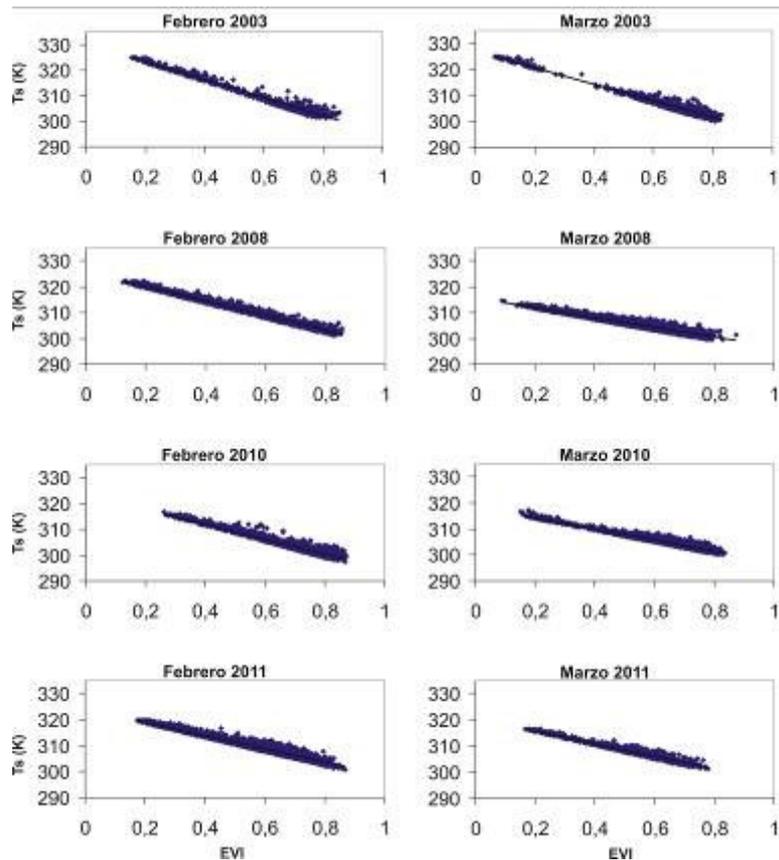


Figura 4.2. Continuación.

En cuanto a la variabilidad temporal entre los períodos, se observa que para los meses de octubre y noviembre los valores más bajos de EVI se observaron en 2009. En diciembre y enero las condiciones fueron similares durante los 4 períodos, excepto para 2010 donde se observa una tendencia a valores de EVI altos y comparativamente más uniformes, es decir con menor amplitud entre sus valores máximos y mínimos que en los otros casos. En febrero y marzo se observaron condiciones similares en los períodos de análisis, con valores más uniformes en febrero de 2010 que en los otros años.

En cuanto al comportamiento de la  $T_s$ , las condiciones más uniformes se observaron en octubre de 2002; octubre, noviembre y marzo de 2007-2008; marzo de 2010 y octubre y marzo de 2010-2011. Esa escasa amplitud de  $T_s$  es un indicador de alta disponibilidad de agua en el sistema suelo-planta, pues en tales condiciones en general la evapotranspiración es alta, resultando en valores de  $T_s$  uniformes.

La Tabla 4.2 muestra los parámetros  $a_i$  y  $b_i$  y los coeficientes de determinación de los límites presentados en la Figura 4.2. A su vez en negrita se destacan cada una de las ecuaciones de los límites secos extremos utilizadas posteriormente para la estimación del TVDI en los diferentes meses. Se observa que en los meses analizados se encontraron fuertes relaciones lineales negativas entre  $T_s$  y EVI, con coeficientes de determinación entre 0,87 y

0,99, lo que implica que la ecuación lineal  $aEVI + b$  es adecuada para representar el límite seco. Estos resultados concuerdan con trabajos previos de otros autores (Sandholt et al., 2002; Rivas y Houspanossian, 2006; Tang et al., 2010 y Chen et al., 2011), los cuales hallaron relaciones lineales con  $r^2$  mayores a 0,80. En cuanto a las ordenadas al origen, se observó un valor mínimo de 309,4 K en octubre de 2002 y un máximo de 335,5 K en diciembre de 2010, indicando condiciones de mínima y máxima variabilidad espacial en las Ts, respectivamente. Se debe destacar que estos valores surgen de las ecuaciones lineales ajustadas, sirviendo como un indicador más de las condiciones de humedad, lo que no implica necesariamente que la superficie observada presente tales valores realmente.

Tabla 4.2. Ecuaciones de los límites secos para las imágenes mensuales consideradas.

2002-2003		
<b>Oct-02</b>	<b>Tsmax = -18,131EVI + 309,4</b>	<b>r2 = 0,92</b>
<b>Nov-02</b>	<b>Tsmax = -33,208EVI + 323,8</b>	<b>r2 = 0,97</b>
<b>Dic-02</b>	<b>Tsmax = -39,630EVI + 328,4</b>	<b>r2 = 0,97</b>
<b>Ene-03</b>	<b>Tsmax = -33,949EVI + 331,5</b>	<b>r2 = 0,97</b>
<b>Feb-03</b>	<b>Tsmax = -35,508EVI + 330,6</b>	<b>r2 = 0,98</b>
<b>Mar-03</b>	<b>Tsmax = -31,973EVI + 327,1</b>	<b>r2 = 0,97</b>
2007-2008		
<b>Oct-07</b>	<b>Tsmax = -15,152EVI + 310,4</b>	<b>r2 = 0,90</b>
<b>Nov-07</b>	<b>Tsmax = -15,777EVI + 316,6</b>	<b>r2 = 0,87</b>
<b>Dic-07</b>	<b>Tsmax = -28,105EVI + 328,7</b>	<b>r2 = 0,95</b>
<b>Ene-08</b>	<b>Tsmax = -34,831EVI + 330,5</b>	<b>r2 = 0,99</b>
<b>Feb-08</b>	<b>Tsmax = -28,343EVI + 325,8</b>	<b>r2 = 0,98</b>
<b>Mar-08</b>	<b>Tsmax = -18,954EVI + 315,7</b>	<b>r2 = 0,93</b>
2009-2010		
<b>Oct-09</b>	<b>Tsmax = -29,052EVI + 318,0</b>	<b>r2 = 0,94</b>
<b>Nov-09</b>	<b>Tsmax = -30,001EVI + 324,3</b>	<b>r2 = 0,95</b>
<b>Dic-09</b>	<b>Tsmax = -33,273EVI + 327,0</b>	<b>r2 = 0,93</b>
<b>Ene-10</b>	<b>Tsmax = -35,287EVI + 334,5</b>	<b>r2 = 0,98</b>
<b>Feb-10</b>	<b>Tsmax = -29,027EVI + 323,5</b>	<b>r2 = 0,92</b>
<b>Mar-10</b>	<b>Tsmax = -21,692EVI + 318,8</b>	<b>r2 = 0,95</b>
2010-2011		
<b>Oct-10</b>	<b>Tsmax = -19,747EVI + 315,5</b>	<b>r2 = 0,95</b>
<b>Nov-10</b>	<b>Tsmax = -32,369EVI + 326,7</b>	<b>r2 = 0,94</b>
<b>Dic-10</b>	<b>Tsmax = -36,630EVI + 335,5</b>	<b>r2 = 0,91</b>
<b>Ene-11</b>	<b>Tsmax = -28,961EVI + 327,5</b>	<b>r2 = 0,96</b>
<b>Feb-11</b>	<b>Tsmax = -25,796EVI + 324,3</b>	<b>r2 = 0,96</b>
<b>Mar-11</b>	<b>Tsmax = -24,191EVI + 320,6</b>	<b>r2 = 0,95</b>

(Negrita: límites secos extremos utilizados para el cálculo del TVDI)

La Figura 4.3 muestra en forma integrada la evolución temporal de las pendientes (Figura 4.3a) y ordenadas al origen de los límites secos (Figura 4.3b) y las  $T_{s_{min}}$  obtenidas (Figura 4.3c). En general se advierte una correspondencia temporal en dichos parámetros. Es decir, las pendientes crecen negativamente y las ordenadas al origen y  $T_{s_{min}}$  lo hacen positivamente a partir de octubre hasta alcanzar máximos en diciembre y enero y decrecen

nuevamente a partir de febrero. Además se observa un comportamiento temporal más uniforme en las ordenadas al origen y  $T_{s_{\min}}$  que en las pendientes, ya que si bien éstas últimas también muestran los máximos en diciembre o enero, se detectan valores dispares entre distintos períodos para un mismo mes. Adicionalmente, la pendiente de las ecuaciones y la ordenada al origen son indicadores de las condiciones hídricas (Rivas y Houspanossian, 2006). Mayores pendientes y ordenadas al origen dan indicios de condiciones más secas. En este sentido, en la subzona semiárida utilizada para el cálculo de los límites secos, se observaron las peores condiciones hídricas en diciembre de 2010, siendo octubre de 2007 y octubre de 2002 las de mayor disponibilidad de agua.

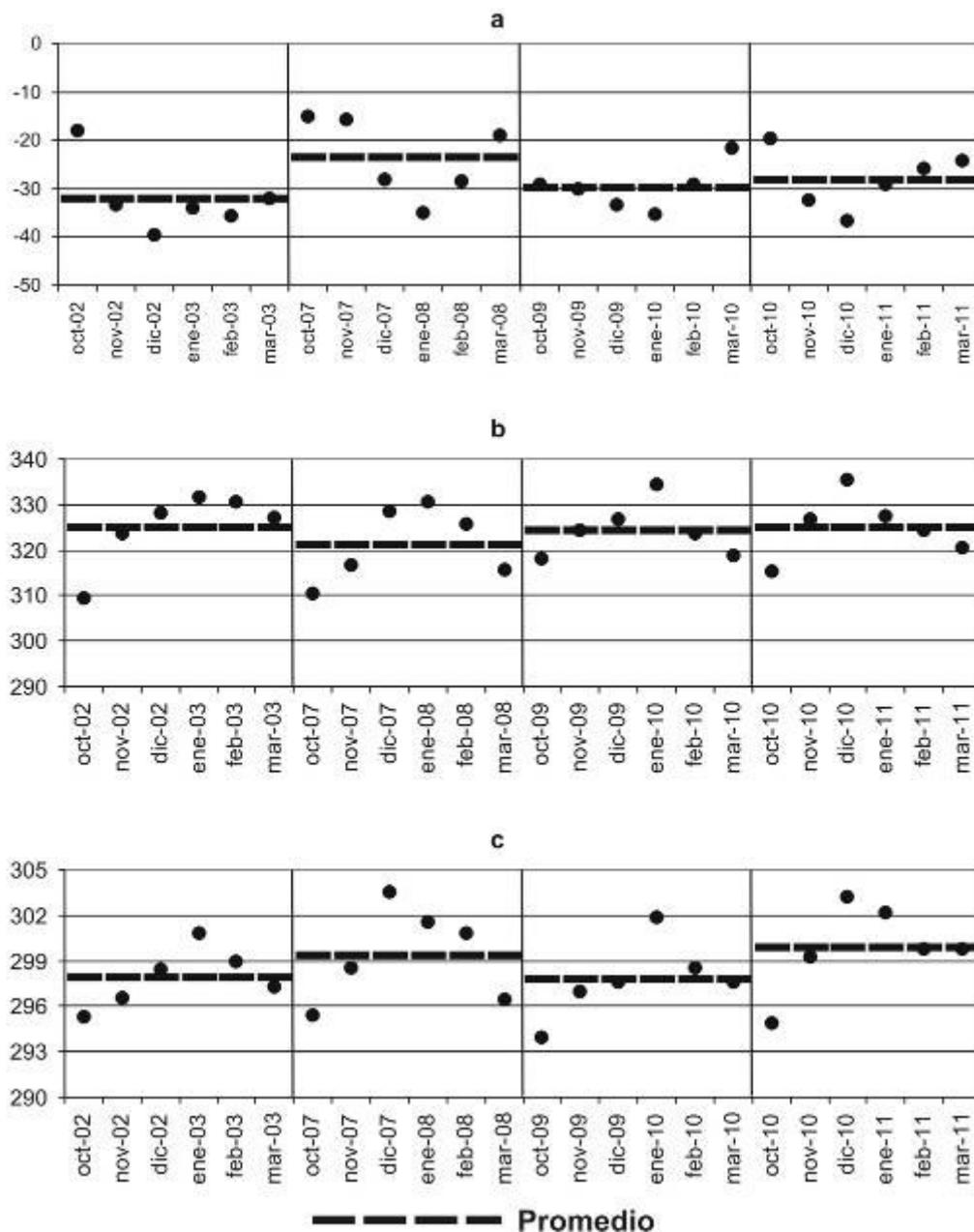


Figura 4.3. Evolución temporal de (a) pendiente, (b) ordenada al origen de los límites secos y (c)  $T_{s_{\min}}$  derivadas del promedio de  $T_s$  en los píxeles de la parte inferior de los triángulos de dispersión.

Con respecto a la  $T_{s_{min}}$ , en general los meses de diciembre, enero y febrero pueden ser caracterizados por los valores más altos. Estos resultados son coherentes con el comportamiento de la radiación incidente sobre la superficie, pues en verano la radiación solar entrante es mayor que en las otras estaciones del año, siendo esperable una temperatura de superficie superior que en primavera. Interanualmente se observaron significativas diferencias en octubre, noviembre, diciembre y febrero, con  $T_{s_{min}}$  mayores en los períodos 2007-2008 y 2010-2011. Este comportamiento en esos 2 períodos podría explicarse por las condiciones de mayor déficit hídrico debido a la ocurrencia de eventos La Niña. Como ha sido señalado por varios autores (Agosta y Compagnucci, 2008; Compagnucci y Agosta, 2008; Holzman et al., 2012), si bien el efecto de ENSO (El Niño Oscilación del Sur) no es directo en la región pampeana, en la subzona seleccionada para el cálculo de los límites húmedos (norte de Buenos Aires, cuenca inferior del río Paraná y sur de Uruguay) su impacto es más claro que en el resto de la región, con la mayor señal en primavera y verano, específicamente en los meses de noviembre y diciembre (Montecinos et al., 2000; Boulanger et al., 2005, entre otros). Además se comprobó que la  $T_s$  media en dicha subzona fue de 304,6 K; 310,0 K; 303,8 K y 312,2 K para noviembre-diciembre de 2002, 2007, 2009 y 2010, respectivamente, con condiciones más uniformes en 2002-2003 y 2009-2010 que en los otros dos períodos. Esto constituye otro indicio de condiciones más húmedas y uniformes durante El Niño de 2002-2003 y 2009-2010 en dicha subzona.

#### **4.1.2. Imágenes de TVDI**

Una vez calculados los límites húmedo y seco extremos, se obtuvieron los mapas mensuales de TVDI. Los valores de dicho índice fueron clasificados en intervalos de 0,2 con el fin de describir los niveles de humedad disponible en el suelo. Recordemos que un valor muy próximo a 0 indica un píxel muy húmedo y un valor cercano a 1 indica un píxel muy seco. La evolución espacio-temporal de la humedad del suelo de octubre a marzo durante los 4 períodos estudiados se muestra en la Figura 4.4. Se observa un alto grado de variación en la humedad del suelo en el espacio y en el tiempo. Espacialmente, valores bajos de TVDI (0-0,4), que indican alto contenido de humedad en el suelo, fueron observados en general en áreas cercanas a cursos y cuerpos de agua y en el extremo Este de la región donde el aporte de humedad oceánica es evidente. No obstante, en períodos húmedos dichos valores se encontraron ampliamente extendidos en grandes zonas del sector centro-este de la región. En períodos secos como 2010-2011, fue posible observar valores bajos de TVDI en zonas vegetadas cercanas a ríos importantes como el Paraná. Allí, con alta disponibilidad de agua, la capacidad evaporativa de la vegetación es elevada, con altos valores de EVI que muestran vegetación muy vigorosa y  $T_s$  correspondientemente

bajas. A su vez en áreas densamente vegetadas, como en gran parte de la provincia de Buenos Aires, sur de las provincias de Entre Ríos o Santa Fe, en períodos de escasa humedad la vegetación no logra captar la humedad necesaria, por lo que la capacidad evaporativa decrece, la temperatura del dosel de la planta se incrementa, reduciéndose posteriormente el EVI y resultando en mayores valores de TVDI que en condiciones húmedas. Adicionalmente, el TVDI tiene la capacidad de discriminar depresiones regionales, las cuales presentan bajos valores del índice, como por ejemplo la cuenca del río Salado en la Pampa deprimida de la provincia de Buenos Aires o los valles transversales del centro-este de la provincia de La Pampa. Así también son observables extensas áreas irrigadas, como es el Valle de Río Negro.

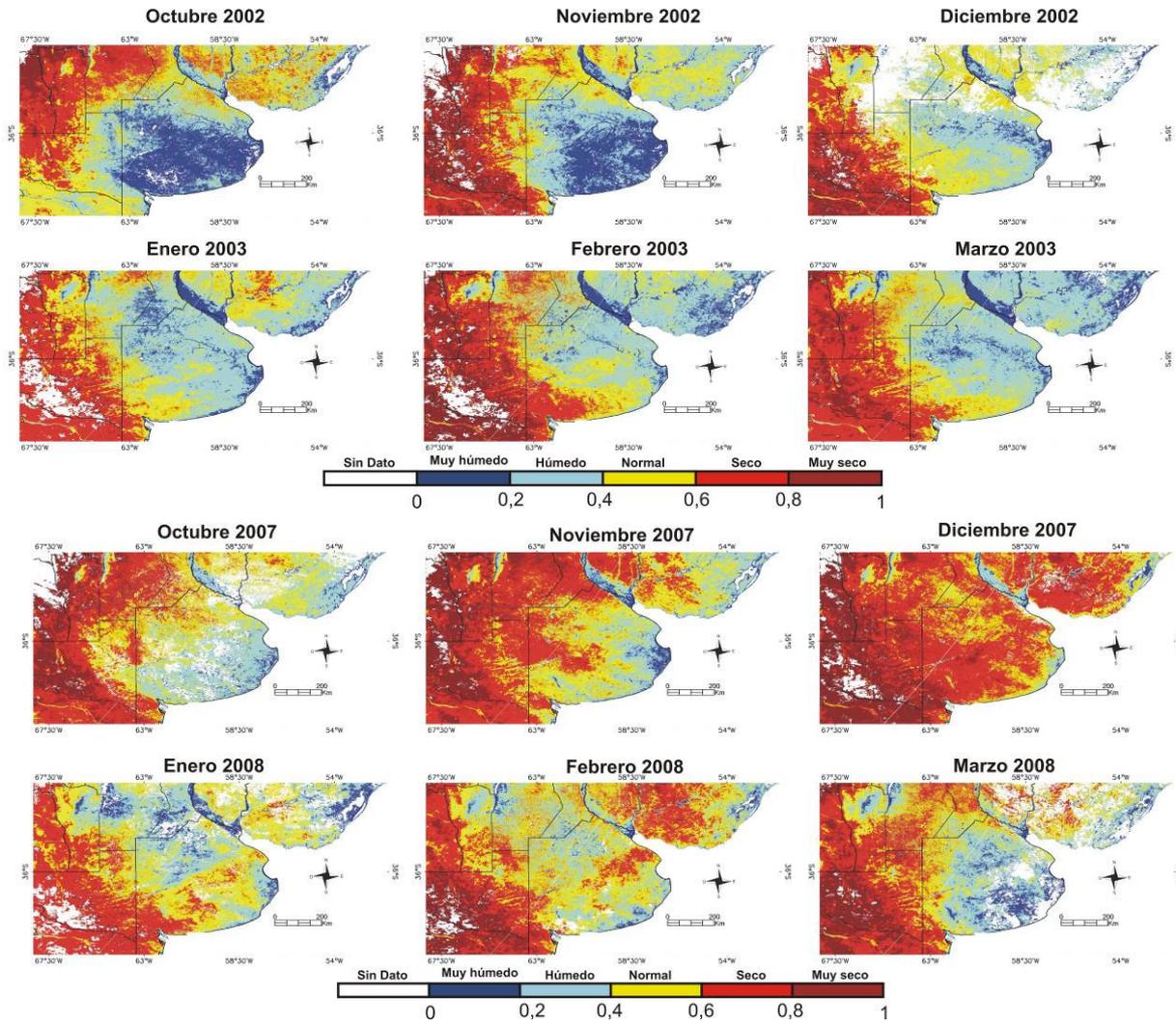


Figura 4.4. Evolución espacio-temporal de la disponibilidad de agua en el suelo, expresada a través de valores mensuales de TVDI.

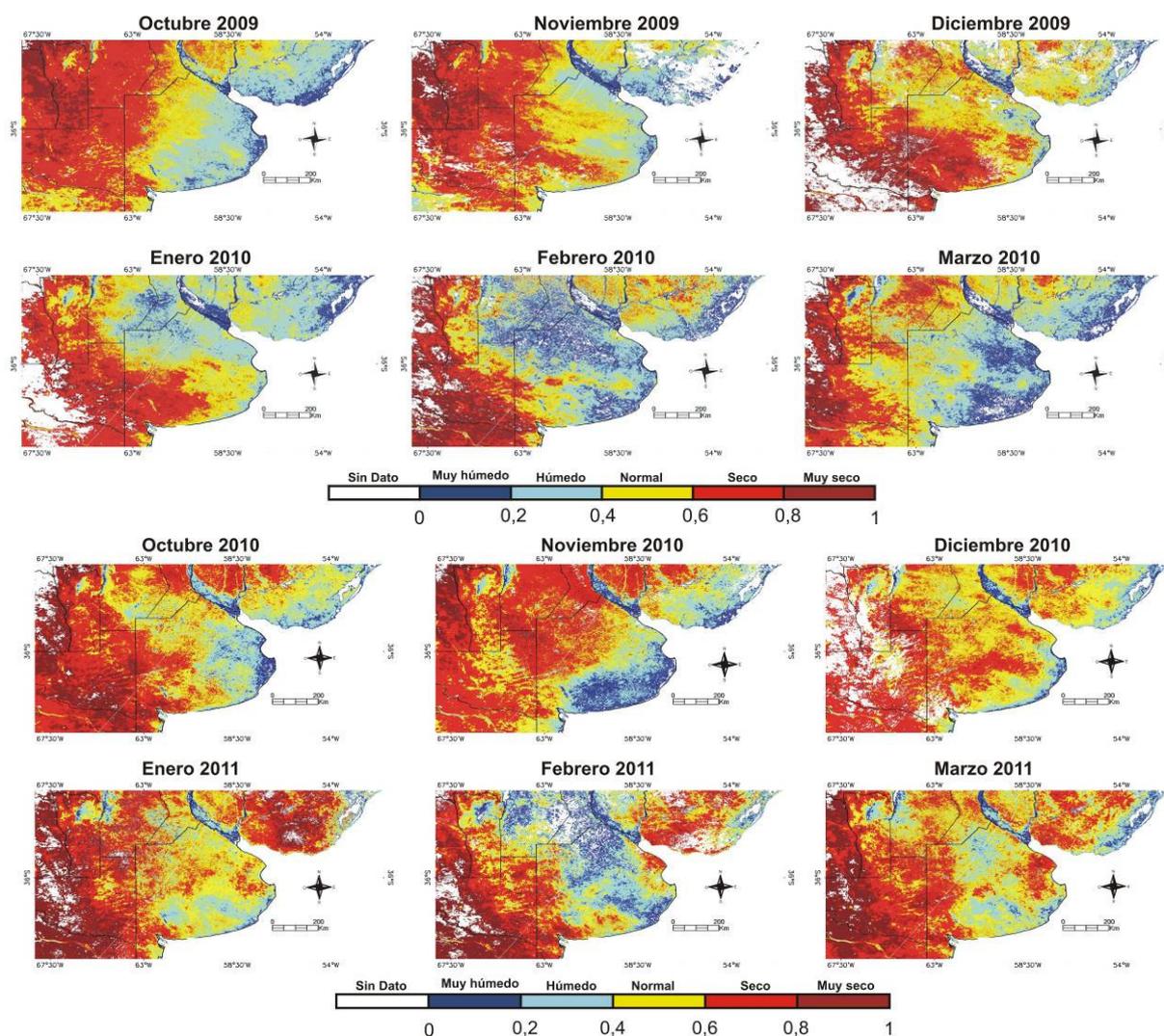


Figura 4.4. Continuación.

Valores intermedios de TVDI en general se identificaron en el sector central de la región, en el límite entre la región húmeda-subhúmeda y la semiárida del Oeste, indicando contenidos normales de humedad en el suelo en esas áreas. Sin embargo en la mayor parte de los meses de 2007-2008 y 2010-2011 su distribución espacial fue altamente variable. Altos valores de TVDI (mayores a 0,6), indicando condiciones secas y muy secas, se observaron principalmente en el sector semiárido y árido de la región. Cabe destacar que en 2007-2008 y 2010-2011 estos valores se encontraron extendidos en gran parte de la región, inclusive en áreas altamente productivas. Adicionalmente, son observables grandes áreas con ausencia de datos, fundamentalmente debido a la cobertura nubosa durante la toma de las imágenes. En este sentido es necesario remarcar que ésta fue la principal limitante para el cálculo del TVDI en el presente trabajo.

La evolución temporal de los valores de TVDI indica en general que las condiciones de escasez hídrica se extienden hacia el Este de la región semiárida a partir de noviembre y

retornan hacia el Oeste a partir de febrero, por lo que el límite entre condiciones normales y secas-muy secas tiene un notable dinamismo temporal. Las zonas más húmedas, como la cuenca del río Paraná o el límite este de la provincia de Buenos Aires, son las más estables temporalmente, conservando en general características húmedas y muy húmedas aún en períodos secos. Cabe señalar que el patrón espacial de TVDI es muy irregular interanualmente. Diversos autores han mostrado la fuerte relación entre las precipitaciones y el TVDI ([Gillies et al., 1997](#); [Goward et al., 2002](#), [Sandholt et al., 2002](#); [Chen et al., 2011](#)), decreciendo este último después de un evento de lluvia. De esta forma la irregularidad interanual del TVDI dependería principalmente de la distribución espacial de las precipitaciones.

Por otro lado, los meses de diciembre, enero y febrero pueden ser caracterizados como los de menor contenido de agua en el suelo, debido a una mayor demanda evaporativa de la atmósfera en relación a octubre, noviembre y marzo. Es necesario destacar que las condiciones de humedad del suelo en esos 3 meses son de especial importancia para la producción agropecuaria regional, pues en gran parte de la región los principales cultivos de grano grueso se encuentran en la etapa fenológica determinante de su rendimiento. De esta forma, condiciones de exceso de humedad y de intensos déficits en esos meses “clave” constituyen potenciales limitantes a la producción agrícola regional.

Comparando la disponibilidad de agua en el suelo para los 4 períodos analizados se observa que el área con condiciones húmedas y muy húmedas fue mayor en 2002-2003 que en los otros años, con alta estabilidad en su distribución espacial. Los períodos 2007-2008 y 2010-2011 se caracterizaron por extensas condiciones de escasez hídrica, observándose la mayor superficie con valores de TVDI mayores a 0,6, diferencia que se hace más notable respecto a los otros 2 períodos a partir de diciembre cuando la demanda evaporativa de la atmósfera es mayor. A su vez, noviembre, diciembre y enero pueden ser caracterizados como los más dinámicos en cuanto a la superficie con condiciones secas y muy secas, pues son los meses en los que se observó la mayor diferencia con respecto a los meses anteriores. Estos resultados son confirmados por el área total con condiciones secas y muy secas, calculada a partir de las imágenes mensuales de TVDI, usando el método de máscaras para valores de TVDI entre 0,6 y 1 (Figura 4.5). Estas diferencias en las condiciones generales entre períodos podría explicarse por la ocurrencia del fenómeno La Niña en 2007-2008 y 2010-2011 y El Niño en 2002-2003 y 2009-2010. Cabe destacar que, no obstante estas condiciones medias, los patrones espaciales de TVDI son muy dinámicos, como se mostró en los mapas de TVDI (Figura 4.4). Estos resultados concuerdan con los de [Boulanger et al \(2005\)](#), quienes mostraron que a pesar de las tendencias a condiciones más secas durante La Niña y más húmedas en El Niño, existe un marcado desplazamiento del

patrón espacial de los impactos de un evento a otro, dificultando la definición de una relación estadística robusta.

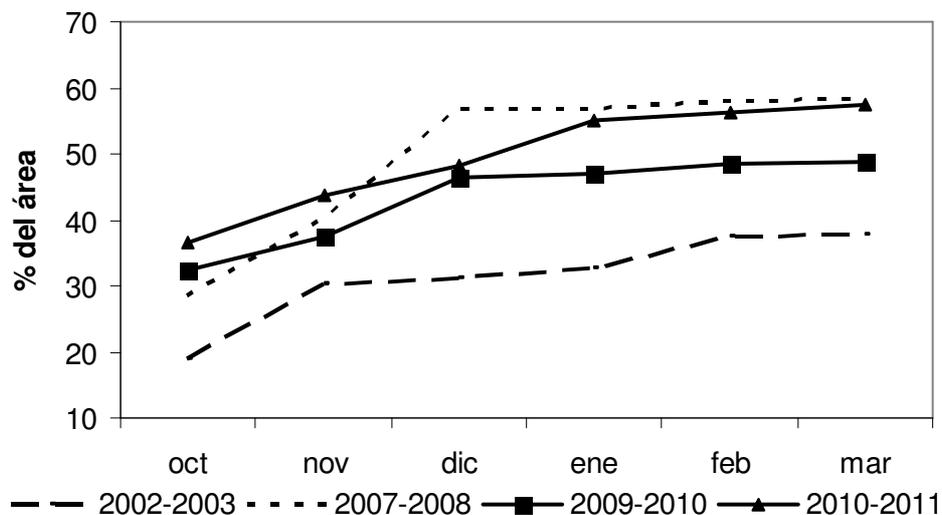


Figura 4.5. Porcentaje del área de estudio con condiciones de escasa humedad en el suelo (clases seco y muy seco de valores de TVDI) para los 4 períodos analizados.

### 4.1.3. Relación entre TVDI y humedad del suelo

Aunque diversos autores (Sandholt et al., 2002; Wan et al., 2004; Han et al., 2010, entre otros) han analizado la relación entre TVDI y humedad del suelo, se evaluó la sensibilidad del TVDI a los cambios de humedad en el suelo en el área de estudio con medidas de humedad *in situ*. Para ello se relacionaron los datos de contenido de humedades integradas a 10 y 20 cm de profundidad calculados a partir de valores diarios medidos en la estación cercana al Campus Tandil con el TVDI areal medio de una cuadrícula de 3x3 píxeles centrada en dicha estación (Figura 4.6). El período de datos comprendió de noviembre de 2009 a marzo de 2010 y de noviembre de 2010 a febrero de 2011. Durante dicho período se observaron condiciones variables de humedad en el suelo, con valores mínimos de 8,2% y máximos de 23,2%, lo que permitió evaluar la sensibilidad del TVDI a distintos rangos de contenido de humedad. Se comprobó que existe una fuerte relación lineal negativa entre TVDI y la humedad del suelo, confirmando que altos valores de dicho índice se corresponden con bajo contenido de humedad superficial del suelo.

Los coeficientes de determinación encontrados ( $r^2$ ) fueron 0,82 y 0,60 para humedades integradas a 10 y 20 cm de profundidad, respectivamente. Dichos valores concuerdan con los resultados presentados en otros trabajos. Wan et al. (2004), en China, hallaron significantes relaciones negativas entre TVDI y la humedad superficial del suelo, con  $r^2$  entre 0,35 y 0,68. Köksal (2008), con el fin de plantear esquemas de irrigación en cultivos de arvejas en Turquía, relacionó 3 tipos distintos de índices de déficit hídrico basados en

diferentes índices de vegetación (NDVI y SAVI), encontrando fuertes relaciones lineales negativas entre el volumen irrigado, estos índices y la evapotranspiración del cultivo, con coeficientes de determinación variando entre 0,66 y 0,92. Han et al. (2010) estimando la humedad del suelo en una zona montañosa del noreste de China a través del TVDI reportaron una marcada relación lineal negativa entre este índice y la humedad relativa media mensual del suelo, con un  $r^2$  de 0,76.

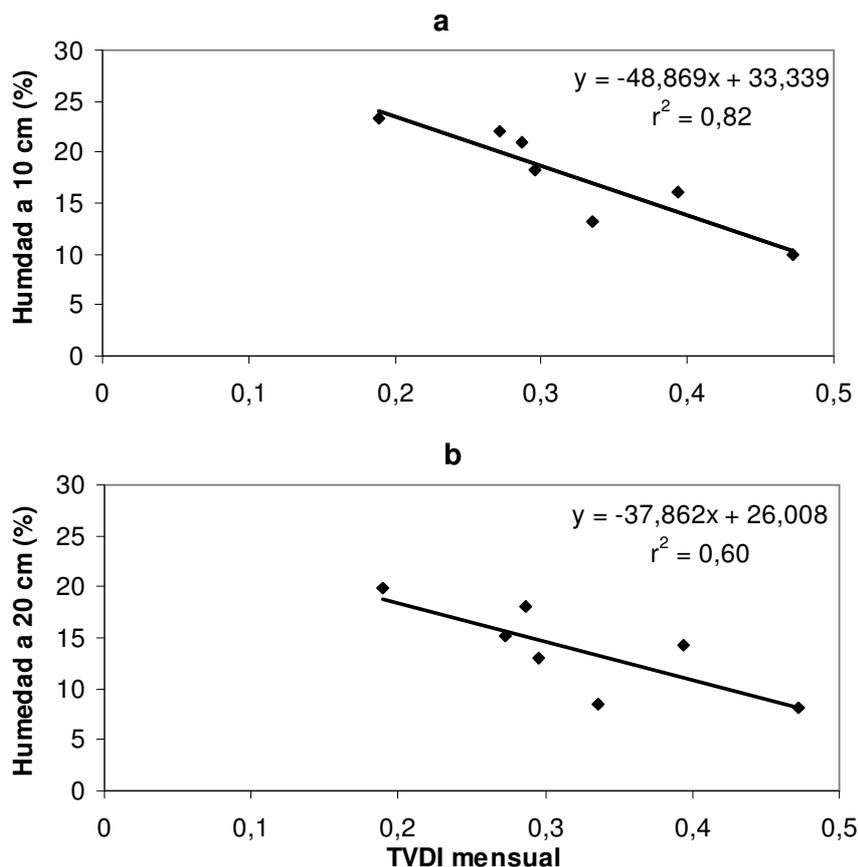


Figura 4.6. Relación entre TVDI y la humedad del suelo relativa integrada a) 10 cm y b) 20 cm de profundidad.

Con el propósito de validar el ajuste encontrado y testear la robustez y la habilidad del mismo para estimar la humedad del suelo se consideraron los datos semanales de enero a marzo de 2010 de humedad del suelo a 10 cm de profundidad de la estación ubicada en el establecimiento Laura Leofú (37° 14' S, 59° 34' O, 235 msnm). Sandholt et al. (2002) ha señalado que la incertidumbre del TVDI para estimar la humedad del suelo es mayor a altas coberturas de vegetación donde las isolíneas de humedad, incluidos el límite seco y húmedo están muy próximas. Según dichos autores esta incertidumbre se debería a que a muy altas coberturas la mayor parte del suelo está sombreado, por lo que son esperables los mayores errores en esos píxeles. Adicionalmente, Gillies y Carlson (1995) sugirieron que los resultados más confiables se pueden obtener limitando la evaluación de la humedad del

suelo a rangos intermedios de cobertura de vegetación. [Moran et al. \(1994\)](#) también han señalado que el error de cálculo del TVDI aumenta a muy bajos porcentajes de cobertura de vegetación. Por lo expuesto, sobre una cobertura uniforme con cultivo de soja se calculó a escala semanal el TVDI areal medio de una cuadrícula de 3x3 píxeles centrada en dicha estación, considerando valores intermedios de EVI. De esta forma, de los 13 datos disponibles originalmente fueron considerados 8. A partir de los valores de TVDI y utilizando el ajuste mostrado anteriormente para 10 cm de profundidad, se contrastaron los valores estimados y medidos *in situ*.

Los valores de los parámetros calculados en la validación fueron:  $r^2=0,70$  (significancia a nivel de 5%); MBE=11%; RMSE=11%; RE=0,38 y d=0,84. La ecuación de ajuste fue  $y = 0,8549x - 6,3682$ , donde  $y$  es la humedad estimada y  $x$  es la humedad medida a 10 cm de profundidad. Si bien se utilizó sólo 8 datos, los valores mostraron buena amplitud de condiciones de humedad. El valor de MBE señala que el ajuste tiende a subestimar la humedad del suelo en la zona analizada.

Los valores de RMSE son semejantes a los mostrados en otros trabajos realizados en distintas regiones del mundo. [Saleh et al. \(2007\)](#) obtuvieron un rango de RMSE entre 1,5 y 12%, utilizando imágenes RADARSAT SAR en Estados Unidos. [Sandholt et al. \(2002\)](#) compararon el patrón de TVDI con la humedad del suelo simulada con el modelo distribuido MIKE SHE en el norte de Senegal a escala de paisaje. Encontraron valores máximos de  $r^2$  de 0,90, aunque no realizaron estimaciones directas del contenido de humedad en el suelo. [Mallick et al. \(2009\)](#) realizaron un exhaustivo trabajo en el que estimaron la humedad volumétrica de superficie en áreas cultivadas de distintos estados de India a través del índice SWI (soil wetness index), cuyo método de cálculo es similar al del TVDI utilizando la  $T_s$  y el NDVI. Estos autores realizaron las estimaciones para 2 escalas espaciales diferentes, una a nivel de potrero utilizando imágenes ASTER y otra a nivel de paisaje con imágenes MODIS/Aqua. Los resultados reportados fueron un RMSE de 20% a nivel de potrero y  $r^2$  de 0,76, con errores mayores para altos contenidos de humedad comparados con los asociados a niveles intermedios. A nivel de paisaje encontraron en general valores de RMSE menores, entre 8 y 39%, con los mayores errores asociados a NDVI bajos y altos. Dichos autores argumentan que la mejor resolución espacial de ASTER, comparada con MODIS/Aqua, no logra capturar la heterogeneidad de  $T_s$  e índice de vegetación requerida para la determinación de los parámetros del triángulo de dispersión, lo que sería la principal fuente de error en este tipo de imágenes. En el caso de las imágenes MODIS/Aqua, la agregación de la información captada conduce a menores errores de estimación de la humedad a escalas de paisaje o menores aún. A su vez, estos autores estudiaron los

errores asociados a distintos niveles de NDVI, los que serían menores a valores intermedios de ese índice.

En conjunto los resultados obtenidos y los reportados en otros trabajos corroboran la capacidad del TVDI para detectar la variabilidad espacial y temporal de contenido de humedad en el suelo. Una probable fuente de error en la validación realizada en el presente trabajo podría deberse al efecto de la heterogeneidad a nivel de subpíxel, que puede surgir por diferencias en la geometría de las hojas como así también por diferencias topográficas en el terreno, dado que la estación se ubica en un área ondulada.

#### **4.1.4. Relación entre TVDI y rendimiento de cultivos**

Corroborada la concordancia entre TVDI y contenido de humedad en el suelo, se analizó la relación entre dicho índice y rendimiento de cultivos en el área de estudio. Es necesario aclarar que las ecuaciones halladas para cada ecorregión y cultivo serían potencialmente aplicables para la estimación de rendimientos de cultivos en el rango de TVDI determinado por el mínimo y máximo detallado en este apartado para cada caso particular.

Como se especificó en la metodología de trabajo, posteriormente la validación de los resultados se realizó para fechas y/o partidos no considerados en el cálculo de los ajustes y sus ecuaciones. El desempeño de tales ecuaciones se evaluó a través de los parámetros RMSE, MBE, RE y *d*. A continuación se presentan los ajustes hallados para los principales cultivos de las ecorregiones Pampa arenosa, Pampa endorreica, Sierras septentrionales bonaerenses y Planicies poligenéticas de La Pampa y los resultados de la validación. No se incluyen los resultados de la Pampa ondulada por no haber mostrado en los períodos analizados suficiente variabilidad de humedad como para obtener buenos ajustes.

##### **4.1.4.1. Ecorregión Pampa arenosa (D27)**

Como se mostró en el Capítulo 2, el cultivo de grano grueso más importante en cuanto a superficie cultivada en esta ecorregión es la soja y los de grano fino son trigo y avena. Para el caso de la soja, su período crítico comprende enero y febrero. Para el cultivo de trigo y avena no se logró una clara relación entre TVDI y rendimiento en esta ecorregión. El problema fundamental fue la escasa superficie cubierta por cultivos de invierno, menor a 4% (ver Capítulo 2), lo que produce que la señal captada por el satélite esté influida por otro tipo de cubiertas, de tal forma que el TVDI no estaría mostrando sólo las condiciones hídricas de tales cultivos. Cabe destacar que si el manejo de la ecorregión cambiase hacia una mayor extensión de este tipo de cultivos debería seleccionarse una zona homogénea y extensa con predominio de éstos para realizar los ajustes TVDI-rendimiento.

Con respecto a la soja, de los datos utilizados para el ajuste, el TVDI acumulado de esos 2 meses mostró un mínimo de 0,54 para 2003 en el partido de Carlos Casares y un máximo de 1,27 para 2011 en el partido de Pellegrini. El rendimiento mínimo ( $1.712 \text{ kg ha}^{-1}$ ) se presentó en 2011 para el partido de Pellegrini y el máximo fue de  $3355 \text{ kg ha}^{-1}$  en 2008 para el partido de Carlos Casares. La Figura 4.7a muestra estos resultados y la relación entre el TVDI acumulado del período crítico para la soja y su rendimiento en los partidos de Carlos Casares, Carlos Tejedor y Pellegrini de la provincia de Buenos Aires. Se observa que el mejor modelo que explica esta asociación es el lineal y además se advierte una significativa relación negativa entre dichas variables, con un  $r^2$  de 0,68. Estos resultados coinciden con los presentados por Rhee et al. (2010), que hallaron ajustes lineales para distintas zonas de Estados Unidos. Por otro lado, no se evidenciaron reducciones en el rendimiento por excesos hídricos (valores bajos de TVDI). Este comportamiento probablemente podría ser explicado por la baja capacidad de retención de agua útil de los suelos arenosos. En este sentido los déficits son evidentes por esa escasa capacidad de almacenamiento de agua y los excesos no son observados por la alta capacidad de infiltración de dichos suelos.

La Figura 4.7b muestra el gráfico de validación 1:1 de los rendimientos estimados a través del TVDI con los datos del MAGyP en los partidos de General Viamonte, 25 de Mayo y Tres Lomas, provincia de Buenos Aires. En ella se observa que los bajos rendimientos son estimados adecuadamente, en tanto que el modelo tiende a subestimar los rendimientos altos, en conjunto el modelo tiende a la subestimación. Con un  $n=12$ , los valores de los parámetros de la validación fueron los siguientes:

- RMSE=  $376 \text{ kg ha}^{-1}$  (13% del rendimiento medio)
- MBE=  $216 \text{ kg ha}^{-1}$
- RE= 0,13
- d= 0,88

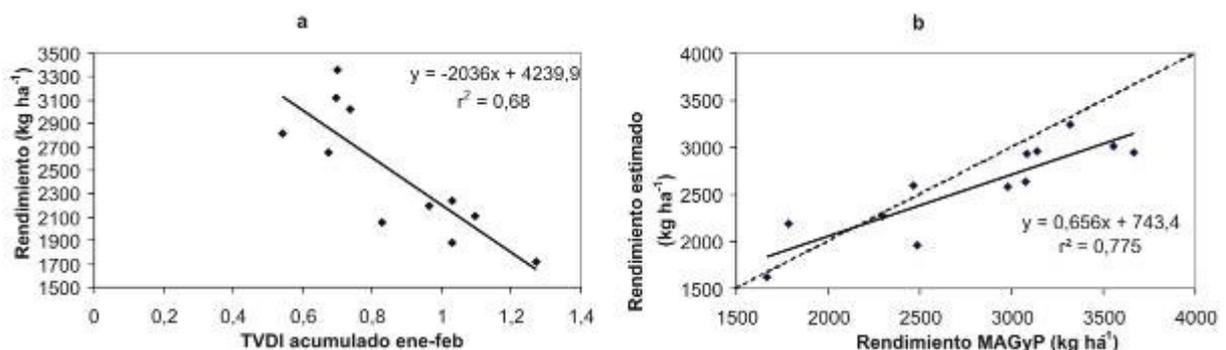


Figura 4.7. a) Relación entre rendimiento de soja y TVDI acumulado de su período crítico en los partidos de Carlos Casares, Carlos Tejedor y Pellegrini (provincia de Buenos Aires), b) validación de las estimaciones de rendimiento en los partidos de General Viamonte, 25 de Mayo y Tres Lomas .

#### 4.1.4.2. Ecorregión Pampa endorreica (D28)

En esta ecorregión el cultivo de grano grueso más importante por su superficie sembrada es la soja (período crítico en enero-febrero) y el de invierno es el trigo. En forma similar a la ecorregión anterior, no se logró un buen ajuste entre TVDI y rendimiento para trigo por su escasa superficie cultivada (ver Capítulo 2). En esta ecorregión se utilizaron también imágenes de 2004-2005 con el fin de lograr una cantidad y variación adecuada de datos para el cálculo de la relación TVDI-rendimiento y la validación de los ajustes.

Con respecto a la soja, el TVDI acumulado de su período crítico mostró un mínimo de 0,55 para 2010 en el partido de General Villegas, provincia de Buenos Aires y un máximo de 1,16 en 2011 en el departamento de General Roca, Córdoba. El rendimiento mínimo observado fue de 2080 (kg ha<sup>-1</sup>) en 2011 para General Roca y un máximo de 3352 (kg ha<sup>-1</sup>) en 2005 para General Villegas. La Figura 4.8a muestra la relación TVDI-rendimiento de soja para el departamento de General Roca y el partido de General Villegas. Se puede observar que el ajuste más adecuado para representar la relación TVDI-rendimiento fue el lineal, con un  $r^2=0,79$ . No se evidenciaron limitaciones en el rendimiento por excesos hídricos, exceptuando el caso puntual General Villegas en 2010 donde se registró el mínimo valor de TVDI. En cuanto a la pendiente del ajuste lineal (1.820 kg ha<sup>-1</sup>), ésta es levemente menor que la correspondiente a la ecorregión anterior (2.036 kg ha<sup>-1</sup>). Esto indica que el rendimiento es más sensible a las fluctuaciones del TVDI en la ecorregión Pampa arenosa que en la Pampa endorreica. A su vez se observó una amplitud del TVDI de 0,61 y 0,73 para la Pampa endorreica y la Pampa arenosa, respectivamente. En conjunto esto indicaría que aunque en la Pampa endorreica los suelos son poco desarrollados (Hapludoles y Haplustoles), tendrían mayor capacidad de almacenamiento de agua y permitirían valores de TVDI más uniformes que los de textura arenosa de la ecorregión Pampa arenosa.

La Figura 4.8b muestra el gráfico de validación 1:1 de rendimiento de soja en base a los datos del departamento General López, provincia de Santa Fe y Roque Sáenz Peña, provincia de Córdoba. En ella se observa que en general el ajuste estima adecuadamente rendimientos bajos (hasta aproximadamente 3.200 kg ha<sup>-1</sup>) y tiende a subestimar los más altos. Como muestra el parámetro MBE, en general el ajuste subestima el rendimiento. Los parámetros obtenidos en la validación, con n=10 fueron los siguientes:

- RMSE= 366 kg ha<sup>-1</sup> (12% del rendimiento medio)
- MBE= 169 kg ha<sup>-1</sup>
- RE= 0,12
- d= 0,81

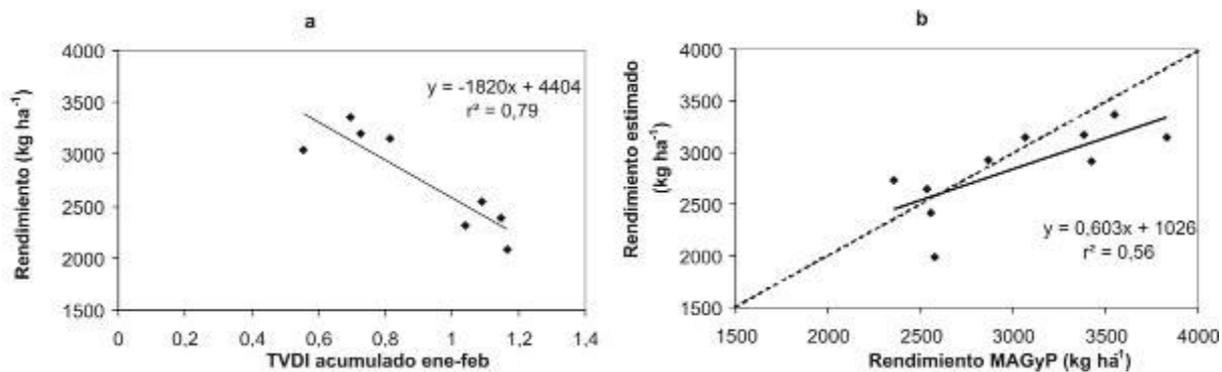


Figura 4.8. a) Relación entre rendimiento de soja y TVDI acumulado de su período crítico en base a datos de General Roca (provincia de Córdoba) y General Villegas (provincia de Buenos Aires), b) validación de las estimaciones de rendimiento para los departamentos de General López (provincia de Santa Fé) y Roque Sáenz Peña (provincia de Córdoba).

Los valores de estos parámetros fueron similares a los de la ecorregión Pampa arenosa, excepto por un menor coeficiente  $d$  en la Pampa endorreica.

#### 4.1.4.3. Ecorregión Sierras septentrionales bonaerenses (D33)

En esta ecorregión los cultivos arealmente más importantes son la soja y el trigo. Sin embargo, para la soja no se logró un buen ajuste que represente la relación TVDI-rendimiento, posiblemente por la falta de un área de cultivo suficientemente homogénea. Sí se halló un buen ajuste para el maíz, donde se encontró que el TVDI de diciembre tenía la mayor incidencia sobre el rendimiento. Como el período crítico del maíz en esta zona puede comprender de noviembre a enero (Oficina de Riesgo Agropecuario-MAGyP), se relacionó el TVDI acumulado de cada uno de esos tres meses en forma separada con el rendimiento y fue de este modo que se comprobó que el mejor ajuste corresponde a diciembre. Para los datos utilizados en el ajuste, el mínimo valor de TVDI (0,36) se observó en 2002 en Tandil y el máximo (0,61) en 2007 en Azul, ambos partidos de la provincia de Buenos Aires. El mínimo rendimiento fue de 5.000 kg ha<sup>-1</sup> para Azul en 2002-2003 y el máximo fue de 8.000 kg ha<sup>-1</sup> para Tandil en 2009-2010. En la Figura 4.9a se observa la relación TVDI rendimiento de maíz y los parámetros del ajuste para los partidos de Azul y Tandil. Se observa que el ajuste cuadrático es el más adecuado para describir dicha relación.

En forma similar a estos resultados, en un trabajo de [Hayes y Decker \(1996\)](#) se muestra un ajuste cuadrático entre NDVI y rendimiento de maíz en el cinturón maicero de Estados Unidos. Se detectaron evidentes limitaciones para el desarrollo del cultivo de maíz por excesos hídricos, lo que se observa en la disminución del rendimiento para valores de TVDI bajos, los cuales se corroboró que correspondieron al período húmedo de 2002-2003 (año de exceso hídrico importante en la mayor parte de la región). Este resultado coincide con lo reportado por [Irmak et al. \(2000\)](#) en Turquía para maíz bajo distintos esquemas de riego,

quienes observaron reducciones del rendimiento sobrepasando cierto umbral húmedo del índice de estrés CWSI (Crop Water Stress Index). En esta ecorregión las condiciones climáticas y de suelo hacen más probable la ocurrencia de estas limitaciones que en las otras ecorregiones analizadas. Como se mencionó en el Capítulo 2, en esta ecorregión los excesos hídricos son frecuentes en gran parte del año y los suelos dominantes (Argiudoles) se caracterizan por poseer un horizonte enriquecido en arcilla (Bt) de baja permeabilidad. Ante excesos de agua la capacidad de percolación es baja y hay probabilidad alta de saturación de la zona radical del cultivo en períodos lo suficientemente extendidos como para afectar el desarrollo del mismo.

La Figura 4.9b muestra el gráfico de validación 1:1 de rendimiento de maíz en base a los datos de los partidos de Balcarce, Olavarría y Benito Juárez, provincia de Buenos Aires. Se observa que en general el método estima adecuadamente el rendimiento de maíz. Es necesario destacar que hubo una limitación en los datos utilizados para el cálculo del ajuste y de su validación debido al alto porcentaje del área con cobertura nubosa. Con  $n=8$ , los parámetros asociados a la validación del modelo fueron los siguientes:

- RMSE= 85 kg ha<sup>-1</sup> (13,5% del rendimiento medio)
- MBE= 114 kg ha<sup>-1</sup>
- RE= 0,13
- d= 0,86

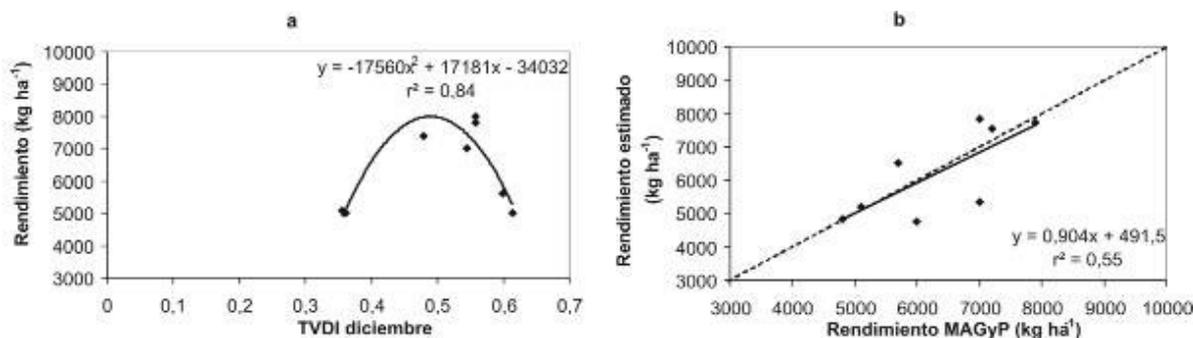


Figura 4.9. a) Relación entre rendimiento de maíz y TVDI acumulado de su período crítico en base a datos de los partidos de Azul y Tandil (provincia de Buenos Aires), b) validación de las estimaciones de rendimiento calculadas en los partidos de Balcarce, Olavarría y Benito Juárez, provincia de Buenos Aires.

Con respecto al cultivo de trigo, por su mayor área sembrada en esta zona se pudo aplicar el método con menores errores que en las otras ecorregiones. En esta ecorregión su período crítico comprende los meses de noviembre y diciembre. Según los datos utilizados para el ajuste de la relación TVDI-rendimiento en los partidos de Azul y Tandil, el mínimo valor del índice (0,49) y el máximo (1,12) se registraron en Azul para 2002 y 2007, respectivamente. El rendimiento mínimo fue de 1.810 kg ha<sup>-1</sup> para Azul en 2007 y el máximo

de 5.101 kg ha<sup>-1</sup> para Tandil en 2010. Estos resultados se muestran en la Figura 4.10, en la que se observa el ajuste hallado para la relación TVDI-rendimiento y sus parámetros.

En el caso del trigo un ajuste de tipo cuadrático fue el más representativo de aquella relación, siendo evidente las limitaciones al rendimiento por excesos y déficits hídricos. Los puntos extremos de la curva en los que el rendimiento es bajo correspondieron a 2002 en el caso de valores mínimos de TVDI y a 2007 para los valores máximos. Esto concuerda con los patrones de TVDI mostrados anteriormente en la Figura 4.4 de maíz, que permiten caracterizar en esta ecorregión a 2002-2003 y 2007-2008 como períodos húmedo y seco, respectivamente. Para el trigo se detectaron algunos valores de rendimiento anormales, es decir mucho más bajos que los esperados según las condiciones de TVDI observadas. Los cultivos de invierno pueden verse afectados por la ocurrencia de heladas tardías o anomalías excesivas en la temperatura del aire, que afectan el llenado de grano reduciendo de esta forma significativamente el rendimiento (Ferris et al., 1998; Challinor et al., 2005). En los casos donde se disponía de información se comprobó que estos rendimientos anómalos no se debieron a la ocurrencia de estos eventos. Evidentemente se deben buscar otros factores que pueden incidir en el rendimiento.

A continuación se detallan los parámetros asociados a la validación en los partidos de Balcarce, Olavarría y Benito Juárez, provincia de Buenos Aires (n=9):

- RMSE= 556 kg ha<sup>-1</sup> (13,5% del rendimiento medio)
- MBE= 99 kg ha<sup>-1</sup>
- RE= 0,13
- d= 0,97

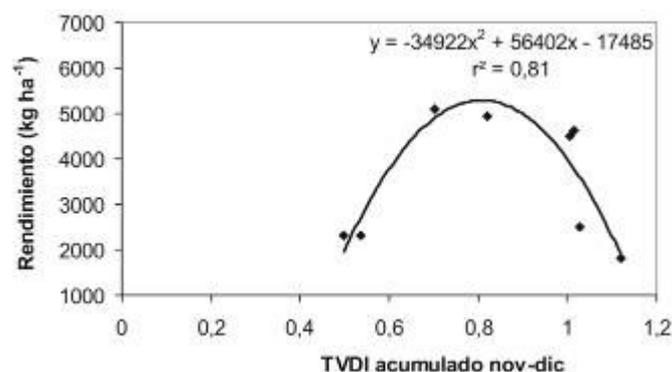


Figura 4.10. Relación entre rendimiento de trigo y TVDI acumulado de su período crítico, calculada en base a datos de los partidos de Azul y Tandil (provincia de Buenos Aires).

#### 4.1.4.4. Ecorregión Planicies poligenéticas de La Pampa (D36)

Debido a la gran extensión de esta ecorregión, para evaluar la relación TVDI-rendimiento se analizó el área Norte-Noreste de la provincia de La Pampa. Esta zona específicamente

abarcó los departamentos de la denominada planicie con tosca. Se utilizaron imágenes de 2004-2005 y 2005-2006 para lograr la cantidad de datos adecuada para el cálculo de los ajustes. Para cultivos de grano grueso, el análisis de la relación TVDI-rendimiento se realizó con maíz, uno de los dos más importante en cuanto al área sembrada (ver Capítulo 2). El período crítico para este cultivo en esta zona comprende el mes de diciembre. En los valores de TVDI para este mes se observó un mínimo en el departamento de Trenel de 0,45 en 2002 y un máximo de 0,84 en 2007 para el mismo departamento. Estos valores son considerablemente mayores a los observados en la región D33 para este cultivo, lo que refleja el carácter semiárido de la ecorregión D36. El mínimo rendimiento se registró en el departamento de Trenel en 2007-2008 y 2009-2010 con  $3.000 \text{ kg ha}^{-1}$ , en tanto que el máximo fue de  $4.545 \text{ kg ha}^{-1}$  para Trenel en 2002-2003. Es observable una diferencia notable entre los rendimientos de esta ecorregión y la D33. Los valores máximos registrados en los departamentos de la provincia de La Pampa son cercanos a los mínimos de dicha ecorregión de la provincia de Buenos Aires.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.11, donde se observa la relación TVDI-rendimiento para los departamentos de Trenel y Capital. Diferente a lo hallado en la ecorregión D33, el ajuste más representativo de la relación TVDI-rendimiento fue el lineal, con evidentes limitaciones al rendimiento por déficit de humedad en el suelo y marcados aumentos del rendimiento a valores bajos de TVDI en respuesta a una buena disponibilidad de agua. Estos resultados muestran que las condiciones climáticas y edafológicas son marginales para el cultivo de maíz, pues si bien se pueden obtener buenos rendimientos con condiciones adecuadas de humedad del suelo, las limitaciones son evidentes. En esta zona los déficits de humedad se concentran en verano, cuando el maíz se encuentra en etapa de madurez fisiológica. A su vez los suelos son caracterizados por el poco desarrollo pedogenético y por estar secos gran parte del año (régimen de humedad ústico), constituyendo estas características las principales limitaciones ambientales para el desarrollo de este cultivo.

En cuanto a la validación para maíz, con  $n=7$ , los resultados detallados a continuación muestran una adecuada capacidad del TVDI para predecir los rendimientos en esta zona. Se observó que el método muestra tendencia a subestimar el rendimiento.

- $RMSE= 683 \text{ kg ha}^{-1}$  (19% del rendimiento medio)
- $MBE= 181 \text{ kg ha}^{-1}$
- $RE= 0,19$
- $d= 0,98$

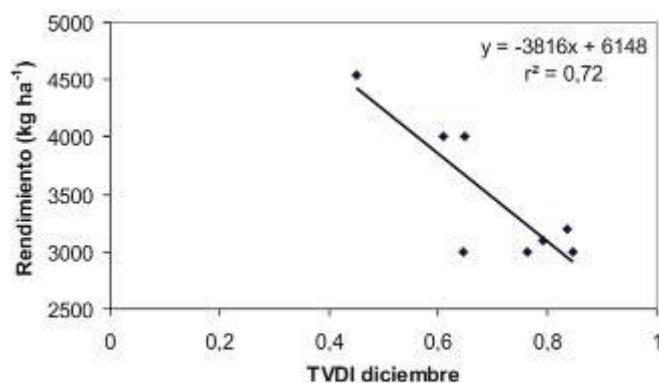


Figura 4.11. Relación entre rendimiento de maíz y TVDI acumulado de su período crítico calculada en base a datos de los departamentos de Trenel y Capital (provincia de La Pampa).

En cuanto al cultivo de trigo, su período crítico comprende octubre y noviembre. El valor mínimo de TVDI acumulado para estos meses fue de 0,84 para el departamento de Trenel en 2002 y el máximo fue 1,5 para el mismo departamento en 2009, valores marcadamente superiores a los observados en la ecorregión D33 para el mismo cultivo. En cuanto a los rendimientos, el mínimo ( $724 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y el máximo ( $3.000 \text{ kg ha}^{-1}$ ) correspondieron a dichas fechas, respectivamente. Estos rendimientos son considerablemente menores que los registrados en la ecorregión D33. A su vez los valores de TVDI para este cultivo fueron mayores que en esta ecorregión, lo que en conjunto refleja el diferente potencial productivo de ambas. La Figura 4.12a muestra estos resultados y la relación TVDI-rendimiento, la cual fue representada adecuadamente por un ajuste cuadrático. Se observa una alta variabilidad en el rendimiento, con limitaciones por escasez y exceso hídrico.

A diferencia del maíz, el trigo es un cultivo de invierno con gran parte de su desarrollo en invierno-primavera, cuando la demanda evaporativa de la atmósfera es baja, por lo que es más susceptible a los excesos de agua que el maíz. Sin embargo ha sido mostrado por [Bhattacharya et al. \(2011\)](#) que el trigo tiene el mayor uso consuntivo de agua en la etapa de madurez fisiológica, por lo que el déficit hídrico en esa época se evidencia también en el rendimiento.

Para la validación de las estimaciones de trigo se usaron datos del departamento Capital para las fechas no utilizadas en el ajuste y del departamento Realicó, el cual se encuentra también en la planicie con tosca, lográndose un  $n=5$  (Figura 4.12b). A través de la validación se observó una buena aptitud del método para estimar el rendimiento de trigo, con una leve tendencia a la subestimación. Los parámetros obtenidos fueron los siguientes:

- RMSE=  $307 \text{ kg ha}^{-1}$  (22% del rendimiento medio)
- MBE=  $270 \text{ kg ha}^{-1}$
- RE= 0,22

- $d = 0,90$

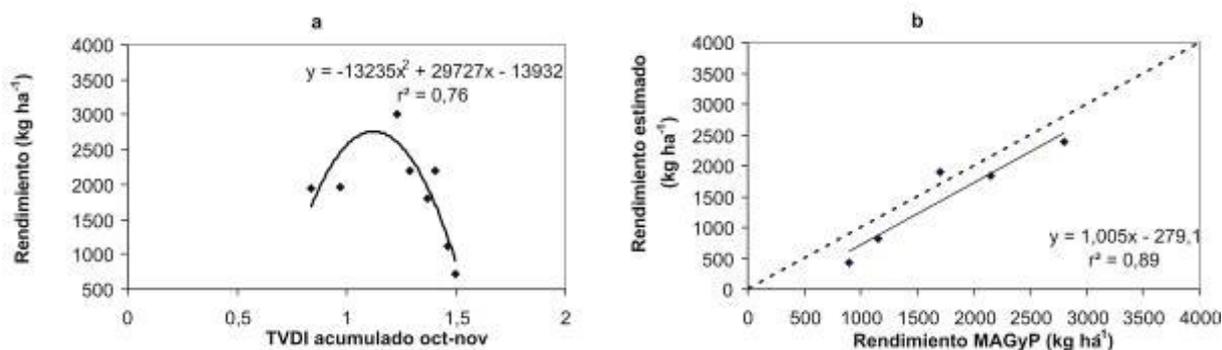


Figura 4.12. a) Relación entre rendimiento de trigo y TVDI acumulado de su período crítico departamentos de Capital y Trenel, b) validación de las estimaciones de rendimiento calculadas en base a datos de los departamentos de Capital y Realicó (provincia de La Pampa).

Comparativamente con los valores logrados para la validación en la ecorregión D33 para trigo, se observa que el modelo hallado en la provincia de La Pampa logró estimar el rendimiento en forma menos adecuada que en la provincia de Buenos Aires. Sin embargo, estos resultados son similares o mejores que los reportados en otros trabajos. [Bhattacharya et al. \(2011\)](#) estimando el rendimiento de trigo con imágenes MODIS/Aqua para distintas zonas semiáridas de India a través de la eficiencia de uso del agua y eficiencia del uso de radiación, encontraron  $r^2$  entre 0,80 y 0,94 con RMSE mínimos de  $337 \text{ kg ha}^{-1}$  (21,8% de la media) y  $232 \text{ kg ha}^{-1}$  (14,8% de la media) para ambos métodos, respectivamente. Los  $r^2$  de la correlación entre los rendimientos observados y estimados reportados en dicho estudio fueron de 0,80 y 0,92, muy similares al valor de 0,89 hallado en el presente trabajo para la zona semiárida.

Interpretando en conjunto los tipos de ajustes hallados en este trabajo, como ha sido mostrado en un reciente estudio de [Mkhabela et al. \(2011\)](#), los contrastantes resultados muestran que los mismos dependen de distintos factores como el tipo de cultivo, tipo de suelo y ambiente. Por ejemplo, [Ma et al. \(2001\)](#) han encontrado para soja que el mejor ajuste entre NDVI y rendimiento es una función potencial, a diferencia del ajuste lineal hallado en el presente trabajo.

Específicamente para el caso del trigo y en base a los resultados de las 2 ecorregiones analizadas, se obtuvieron ajustes cuadráticos. A su vez se observó que la eficiencia de los modelos para estimar rendimiento es similar y en muchos casos superior a las reportadas en otros estudios de modelación de rendimiento basados únicamente en el uso de índices de vegetación ([Wall et al., 2007](#); [Mkhabela et al., 2005](#); [Moriondo et al., 2007](#)) o en el uso combinado con datos de precipitaciones ([Balaghi et al., 2008](#)), los cuales explican sólo el 42-68% de la variabilidad con errores de predicción entre  $80$  y  $762 \text{ kg ha}^{-1}$ . [Vicente-Serrano et](#)

al. (2006) combinando el NDVI-AVHRR e índices de sequía, encontraron que su modelo podía explicar el 88% de la variación del rendimiento. En un trabajo reciente de Mkhabela et al. (2011) se reportó un valor de  $r^2$  de 0,47 para la relación NDVI-rendimiento en una zona subhúmeda de India y un valor de 0,80 para la zona semiárida.

Con respecto a los errores de estimación, los valores de RMSE obtenidos también son comparables con los del estudio de Dadhwal et al. (2003) quienes reportaron un RMSE de 335 kg ha<sup>-1</sup> usando un modelo de simulación del cultivo basado en el índice de área foliar para la región subhúmeda de India. Mkhabela et al. (2011) reportaron valores mínimos de RMSE de 462 kg ha<sup>-1</sup> y MBE de 117 kg ha<sup>-1</sup> para la zona subhúmeda de India, similares a los hallados en el presente trabajo.

Por otro lado, ha sido cuantificado por You et al. (2009) que un aumento del 1% en la temperatura del trigo reduce el rendimiento en un 0,5%. Con los resultados hallados de los ajustes se reafirma la idea de que el TVDI, al considerar la temperatura del cultivo, tiene mejor capacidad de capturar las fluctuaciones en el rendimiento que el sólo uso de índices de vegetación.

A pesar de los mejores resultados logrados con TVDI respecto a los métodos utilizados en los trabajos mencionados, no se observó una relación clara con los rendimientos de cultivos de invierno en la ecorregión Pampa arenosa y Pampa endorreica. La baja correlación se debería al hecho de que estos cultivos presentaron una pequeña superficie de la zona analizada y que el TVDI fue el promedio de esa superficie. Además, aunque se pudo enmascarar las zonas no cultivadas, no fue posible extraer el TVDI para cada cultivo específicamente, lo que podría haber mejorado los resultados obtenidos. Para estudios futuros la utilización de imágenes de mejor resolución espacial, como las MODIS de 250 m combinadas con Ts a 1.000 m, puede arrojar mejores resultados para estos cultivos y aún mejores validaciones que las logradas en general para todos los cultivos analizados en el presente trabajo.

Con respecto al cultivo de maíz, los valores de coeficientes de determinación obtenidos son más altos que los reportados en otros trabajos realizados en base a índices de vegetación. Hayes y Decker (1996) encontraron un  $r^2$  de 0,54 en el cinturón maicero de Estados Unidos. Unganai y Kogan (1998) estimando rendimientos con NDVI del período de llenado de grano de maíz a partir de imágenes AVHRR mostraron resultados similares. Lewis et al. (1998) con el mismo índice explicó el 68% de la variación del rendimiento en Kenya. Contrariamente, Dobermann y Ping (2004) encontraron para maíz coeficientes  $r^2$  entre 0,18 y 0,46 a través de diferentes índices de vegetación. Dicho trabajo fue realizado en una pequeña zona de Estados Unidos con imágenes IKONOS (4 m de resolución espacial). Los

coeficientes más bajos allí encontrados se correspondieron con áreas bien irrigadas con altos rendimientos, por lo que las variaciones en él no eran considerables y se debían a otros factores distintos a la disponibilidad de agua. En tal caso, los índices de vegetación son insensibles a la condición de la vegetación (Gitelson et al., 2003). Mkhabela et al. (2005) usando NDVI mostraron  $r^2$  entre 0,51 y 0,68.

Distintos autores (Lewis et al., 1998; Unganai y Kogan, 1998; Baez-Gonzalez et al., 2002, entre otros) han señalado la capacidad de estimar rendimientos de maíz a través de diferentes índices de vegetación con 1-2 meses de anticipación. Los resultados obtenidos en el presente trabajo fueron aún más alentadores para este cultivo, pues con las ecuaciones halladas es posible lograr la estimación de rendimientos de maíz 2-3 meses antes de la cosecha a escala regional para el Este de la provincia de La Pampa y el centro de la provincia de Buenos Aires (ecorregión Sierras septentrionales bonaerenses). Para el cultivo de trigo se logró la estimación del rendimiento con un mes de anticipación para ambas zonas. Para la soja se obtuvieron buenos resultados en las ecorregiones Pampa endorreica y Pampa arenosa en cuanto a períodos de anticipación del rendimiento, con 2 a 3 meses antes de la cosecha.

## 4.2. Modelo conceptual propuesto

Para arribar a un modelo conceptual a partir de los resultados obtenidos, primeramente es necesaria la comprensión de los mecanismos asociados a las alteraciones en los rendimientos de los cultivos por fluctuaciones en el agua disponible. Monteith y Unsworth (1990) establecieron que la tasa de evapotranspiración de una cubierta vegetal ( $\lambda ET$ ) depende, entre otros factores de la radiación neta absorbida por el dosel de la planta, la resistencia de dicha planta y la resistencia aerodinámica. Matemáticamente, la relación entre estos factores se puede expresar mediante la siguiente ecuación (Monteith y Unsworth, 1990):

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho \cdot C_p \cdot \frac{(e_a - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (4.1)$$

donde  $\lambda ET$  es el flujo de calor latente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $\Delta$  la pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $R_n$  la radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $G$  la densidad de flujo de calor en el suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $\rho$  la densidad del aire ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  el calor específico del aire ( $\text{MJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $e_a$  la presión de vapor de aire a saturación ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $e_d$  la presión de vapor actual ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $r_a$

es la resistencia aerodinámica ( $s\ m^{-1}$ ),  $\gamma$  la constante psicrométrica ( $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ ) y  $r_c$  la resistencia de la cubierta del cultivo ( $s\ m^{-1}$ ).

Paralelamente, el efecto del déficit hídrico sobre un cultivo puede dividirse en dos etapas. Al comienzo de un período de déficit se produce una reducción del contenido de agua en el suelo por el uso consuntivo de la vegetación. Seguidamente la planta puede controlar la transpiración mediante diferentes mecanismos eco-fisiológicos como la reducción del transporte de agua a través de las raíces, tallos y hojas y por el cierre de los estomas (Waring y Running, 2007). Dichos cambios llevan a una rápida disminución de la eficiencia del uso de la radiación y consecuentemente en la fotosíntesis. Esta primera fase de alteración de la fotosíntesis por estrés hídrico es caracterizada por mecanismos rápidos de adaptación, los cuales también pueden revertirse fácilmente y no implican significantes cambios estructurales en la cubierta vegetal y los pigmentos de las hojas (Running y Nemani, 1988). Dichos mecanismos conducen a un aumento de las resistencias del cultivo ( $r_c \rightarrow$ máximo) y una reducción de la transpiración (Ecuación 4.1), con muy pequeños descensos en el índice de vegetación, por lo que mayormente son detectables a través de fluctuaciones en la  $T_s$  de la cubierta vegetal.

En una segunda etapa, si el estrés hídrico se incrementa, ya sea en el tiempo o en intensidad afectando los horizontes más profundos del suelo, se producen cambios estructurales en la vegetación y en la integridad de su aparato fotosintético (estructura de la hoja y contenido de pigmentos). Estos procesos son difíciles de revertir y producen marcados descensos del índice de vegetación (Friedl et al., 1995).

Por otro lado, además de la incidencia del déficit hídrico en la producción vegetal, el rendimiento puede ser afectado en períodos de exceso de humedad por la baja radiación neta absorbida por el cultivo asociada a una alta cobertura de nubes. Adicionalmente, el exceso hídrico puede incidir sobre el cultivo por un estado de anoxia en la zona radical o malas condiciones sanitarias como presencia de hongos y enfermedades (Andrade y Sadras, 2000). Esto repercute en el comportamiento reflectivo de la vegetación, aumentando la reflectividad en la región del rojo y disminuyendo la señal en el infrarrojo cercano, siendo detectables estos cambios por bajos valores de EVI.

A partir de lo anteriormente expuesto y de la interpretación de los resultados vinculados a la relación entre TVDI y rendimiento obtenidos en las 4 ecorregiones analizadas se puede arribar a la elaboración de un modelo conceptual como el que se representa en la Figura 4.13. El modelo general permite identificar valores de rendimiento máximos u óptimos cuando las condiciones ambientales son ideales para ese cultivo, de tal forma que no existen limitantes ni por exceso ni por déficit hídrico y la tasa de transpiración es muy

cercana a su capacidad evaporativa (punto A). Esas condiciones hídricas ideales para el cultivo van a estar reflejadas en un rango acotado de valores de TVDI, más allá del cual las pérdidas de rendimiento son mayores a medida que dicho índice aumenta o disminuye. Las limitaciones a la producción del cultivo pueden estar causadas por:

- punto B: el rendimiento del cultivo es mínimo debido a condiciones de exceso hídrico asociado a una baja radiación absorbida por alta cobertura de nubes y/o condiciones sanitarias inadecuadas.
- punto C: para valores altos de TVDI el rendimiento también es mínimo por la existencia de déficits hídricos que limitan la transpiración del cultivo y la producción de biomasa.

Los ajustes lineales (línea punteada) encontrados en este trabajo serían un caso particular dentro del modelo general propuesto en el que por distintos factores ambientales (tipo de suelo, régimen de humedad edáfico, etc.) y tipo de cultivo sólo se observan condiciones deficitarias para el mismo.

Los resultados obtenidos en este trabajo tienen la potencialidad de constituir un sistema de soporte de decisión ya que permiten la evaluación y monitoreo de las condiciones hídricas durante el crecimiento de los cultivos y así lograr una estimación anticipada del rendimiento. Cabe destacar que su aplicación puede ser de interés para organismos relacionados a la planificación y gestión agro-productiva, de transporte de cereales, alimentación, entre otros, pues la metodología presentada es utilizable a escala regional (1:1.000.000). Así, queda excluido su uso a escala de potrero o similar por la baja resolución espacial de las imágenes empleadas para esas aplicaciones. Con el fin de que los resultados obtenidos puedan ser

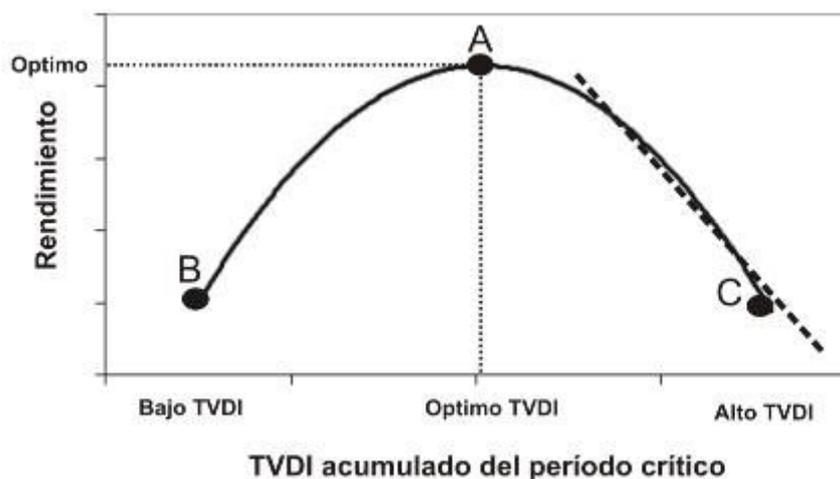


Figura 4.13. Modelo conceptual propuesto para la relación TVDI-rendimiento a partir de los resultados obtenidos.

utilizados con fines prácticos, en la Figura 4.14 se muestra en forma integrada los ajustes entre TVDI y rendimiento obtenidos y las zonas en las que éstos serían aplicables.

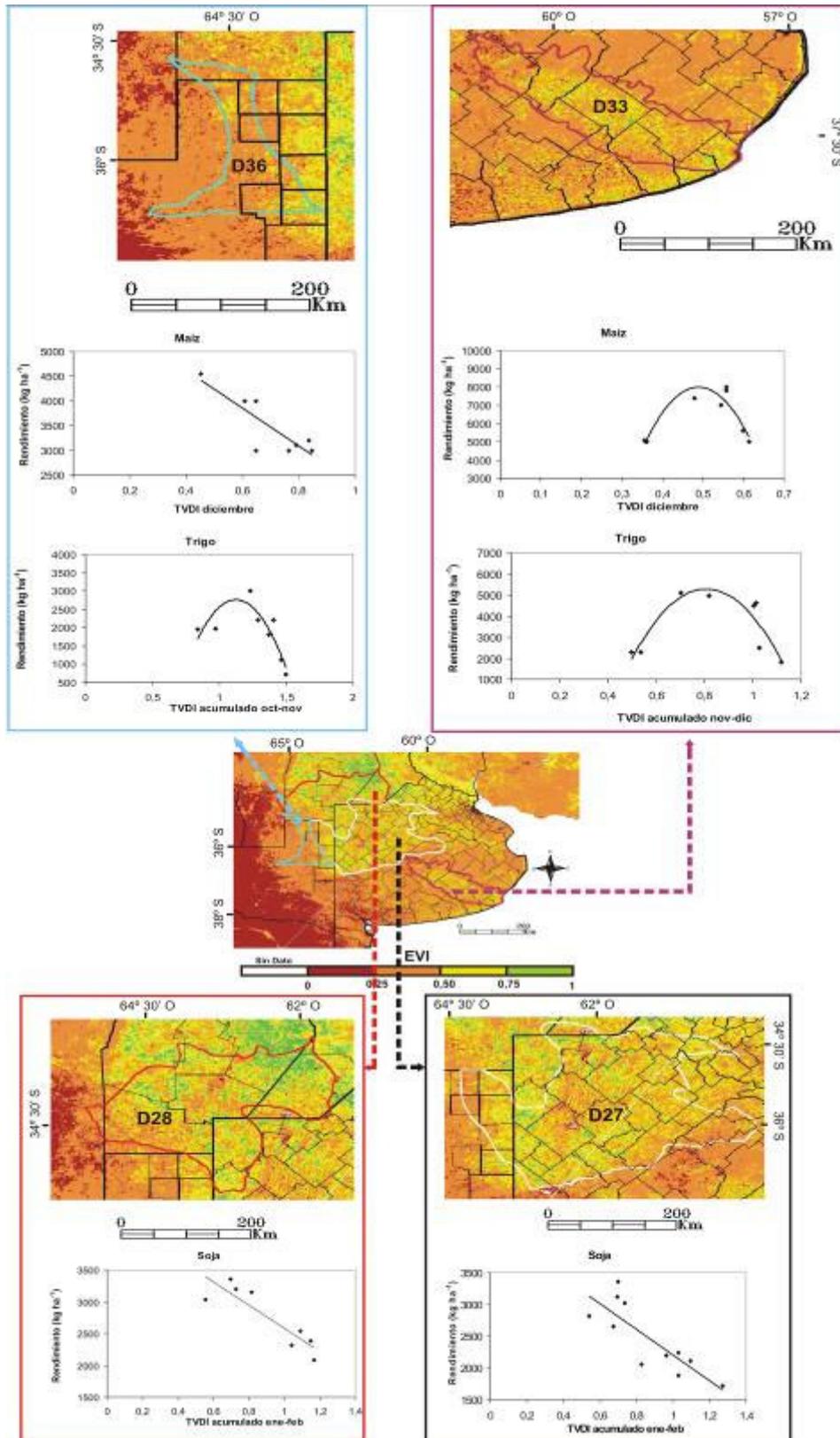


Figura 4.14. Ecorregiones y sus correspondientes ajustes aplicables para la estimación de rendimiento.

Las ecuaciones que se podrían emplear en cada ecorregión, dentro de los límites de TVDI especificados, son las siguientes:

- 1) Ecorregión Pampa arenosa (D27)
  - Soja:  $R = -2036 \times TVDI + 4239,9$  (TVDI entre 0,55 y 1,27)
  
- 2) Ecorregión Pampa endorreica (D28)
  - Soja:  $R = -1820 \times TVDI + 4404$  (TVDI entre 0,55 y 1,17)
  
- 3) Ecorregión Sierras septentrionales bonaerenses (D33)
  - Maíz:  $R = -17560 \times TVDI^2 + 17181 \times TVDI - 34032$  (TVDI entre 0,35 y 0,60)
  - Trigo:  $R = -34922 \times TVDI^2 + 56402 \times TVDI - 17485$  (TVDI entre 0,50 y 1,10)
  
- 4) Ecorregión Planicies poligenéticas de La Pampa
  - Maíz:  $R = -3816 \times TVDI + 6148$  (TVDI entre 0,45 y 0,85)
  - Trigo:  $R = -13235 \times TVDI^2 + 29727 \times TVDI - 13932$  (TVDI entre 0,84 y 1,50)

donde  $R$  es el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y  $TVDI$  es el TVDI acumulado del período crítico para el cultivo en la correspondiente ecorregión. En los casos en que el TVDI esté fuera de los rangos de aplicación especificados se debería verificar si el ajuste se mantiene para esos valores.

Es necesario destacar que las ecuaciones presentadas son propias de cada ecorregión y cultivo y que los parámetros utilizados en el cálculo del TVDI son propios de la región de estudio. No obstante, la metodología explicada en el Capítulo 3 puede ser aplicada en distintas regiones con el fin de hallar los ajustes entre TVDI y rendimiento. Para estos casos es necesario destacar que el rendimiento es muy sensible a los cambios del TVDI, por lo que se requiere de un cálculo confiable de dicho índice utilizando imágenes corregidas adecuadamente de los efectos geométricos y atmosféricos y para realizar los ajustes se deben seleccionar áreas de interés lo suficientemente extensas y homogéneas para asegurarse de que el TVDI muestre las condiciones de los cultivos de interés. A su vez, para el adecuado cálculo de los parámetros  $T_{s_{\min}}$  y  $T_{s_{\max}}$  del TVDI, como se explicó en el Capítulo 3, se deben seleccionar áreas que presenten condiciones de mucha humedad en el suelo y de escasez hídrica, con variado grado de cobertura de vegetación.

## Capítulo 5

### CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluó la relación entre la disponibilidad de agua en el suelo y el rendimiento de cultivos de la región pampeana de la República Argentina a través del índice de estrés hídrico TVDI, calculado sólo con información captada desde satélite en la región del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético. Para el cálculo se utilizaron imágenes producto de temperatura de superficie (MYD11A2) e índice de vegetación (MYD13A2) del sensor Aqua/MODIS. El estudio se realizó considerando los principales cultivos de grano fino y grueso de zonas con distintas condiciones ambientales y potenciales productivos de la región.

Metodológicamente, se realizaron innovaciones en el procedimiento de cálculo tradicional del TVDI. En este sentido se tuvieron en cuenta las fuentes de error del método señaladas previamente por otros autores ([Sandholt et al., 2002](#) y [Mallick et al., 2009](#)) y así los efectos geométricos y de sombra por nubes que inciden en la señal captada por el satélite fueron reducidos mediante el uso de imágenes producto. A su vez, en el cálculo del TVDI se optó por el índice de vegetación EVI en vez del tradicional NDVI, el cual presenta limitaciones que han sido reportadas en diversas publicaciones ([Liu y Huete, 1995](#); [Wang et al., 2005](#); entre otros). Por otro lado, como los parámetros del TVDI son propios de cada región e imagen, se determinaron límites seco y húmedo extremos de los períodos analizados para el cómputo del índice y de esta forma hacer comparables sus valores en el tiempo.

En cuanto a la estimación de la disponibilidad de agua en el suelo mediante el TVDI, se comprobó la sensibilidad de éste para detectar las fluctuaciones temporales y espaciales de dicha variable. Se confirmó la existencia de una fuerte relación lineal entre el índice y el contenido volumétrico de humedad del suelo integrada a 10 y 20 cm de profundidad medida a campo en una zona agrícola del centro de la provincia de Buenos Aires. Se obtuvieron coeficientes de determinación de 0,82 y 0,60 para dichas profundidades, respectivamente. En cuanto a los errores entre los valores medidos y los calculados, la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) fue de 11%; bias (MBE), 11%; error relativo (RE), 0,38; índice de concordancia de Willmott ( $d$ ), 0,84 y coeficiente de determinación ( $r^2$ ), 0,70. Estos resultados concuerdan con trabajos previos que señalan la estrecha relación entre estos dos parámetros ([Sandholt et al., 2002](#); [Mallick, et al., 2009](#); [Han et al., 2010](#), entre otros), mostrando la potencialidad de aplicación del TVDI en el estudio integral de los procesos hidrológicos del sistema suelo-agua-planta.

Si bien en la República Argentina actualmente se están desarrollando algunas metodologías para la estimación de la humedad del suelo basadas en la teledetección, operativamente se aplican métodos puntuales como el balance hídrico en el suelo. Esas técnicas clásicas de toma de datos en puntos específicos implican grandes costos económicos y de tiempo. A su vez se caracterizan por tener poca utilidad a escala regional debido a que no consideran la variabilidad espacial de las características de la superficie y de las precipitaciones. Además, requieren de información secundaria que frecuentemente no está disponible. En este contexto, el TVDI calculado con imágenes de 1 km de resolución espacial se presenta como una metodología apta para el estudio espacial y temporal de la humedad del suelo a escala regional, prescindiendo de la utilización de información secundaria. De esta manera, dicho índice sería útil tanto para aplicaciones hidrológicas, como por ejemplo el estudio de cuencas y previsión de inundaciones, como para la producción agrícola.

En cuanto a la relación del TVDI con el rendimiento de cultivos de la región, se pudo comprobar la buena correlación entre este índice y las fluctuaciones del rendimiento en 3 de los principales cultivos (soja, maíz y trigo) de las ecorregiones Pampa arenosa, Pampa endorreica, Sierras septentrionales bonaerenses y Planicies poligenéticas de la provincia de La Pampa. En general se observó que la relación TVDI-rendimiento responde a una función cuadrática, con particularidades según las condiciones ambientales de cada ecorregión. En cuanto a la validación, el análisis estadístico arrojó como resultados los siguientes valores: RMSE entre 85 kg ha<sup>-1</sup> (13,5% del rendimiento medio) y 683 kg ha<sup>-1</sup> (19% del rendimiento medio); MBE entre 99 kg ha<sup>-1</sup> y 270 kg ha<sup>-1</sup>; RE entre 0,12 y 0,22; índice *d* entre 0,81 y 0,98 y *r*<sup>2</sup> entre 0,68 y 0,84.

Estos resultados son similares a los obtenidos en otros trabajos a través de modelos más complejos con mayor requerimiento de información como son los de simulación del desarrollo del cultivo. A su vez, se logró una adecuada estimación del rendimiento de trigo con 1 mes de anticipación y de 2-3 meses para el cultivo de maíz y soja. Estos resultados también son comparables y aún más alentadores a los reportados en trabajos sustentados en métodos más tradicionales como es el uso del NDVI, lo que confirma la mayor capacidad de detectar cambios en las condiciones del cultivo a través de la combinación de la información del infrarrojo térmico y del visible con respecto al solo uso de bandas reflectivas. Esto permite sostener que, si bien el método del TVDI aplicado al estudio del rendimiento es una simplificación de los procesos determinantes del mismo, las estimaciones logradas fueron adecuadas, mostrando la aptitud del TVDI para tal fin.

El análisis de la relación TVDI-rendimiento durante períodos secos, normales y húmedos y los tipos de ajustes hallados en cada ecorregión de la región pampeana permitió la

elaboración de un modelo conceptual generalizado de las fluctuaciones del rendimiento según los distintos grados de humedad en el suelo, aspecto que no ha sido frecuentemente analizado en forma integral para dicha región. Dicho modelo permitió comprender los procesos físicos y fisiológicos asociados a las limitaciones al rendimiento debido a excesos y déficits de agua en el suelo. Es esperable que en superficies cultivadas de otras ecorregiones se presente dicho modelo con ciertas particularidades según predominen condiciones de excesos o déficits hídrico.

A su vez, también es necesario destacar que el TVDI ha sido aplicado por otros autores para estimar la humedad del suelo, no obstante al menos en la búsqueda bibliográfica realizada, no se encontraron antecedentes de su utilización en la estimación de rendimiento de cultivos. Por tal motivo estos resultados abren la posibilidad al uso de este método en la estimación en forma anticipada del rendimiento de los cultivos a escala regional en forma sencilla, requiriendo sólo de datos captados desde satélite. En este sentido, el presente trabajo sigue la tendencia internacional actual acerca del monitoreo y estudio de los procesos que ocurren en la superficie terrestre mediante teledetección sin necesidad de utilizar datos auxiliares.

Si bien el TVDI ha mostrado ser un método sencillo para el estudio de las condiciones hídricas de la superficie a nivel de píxel de 1 km<sup>2</sup>, se debe indicar que es necesario contar con imágenes satelitales adecuadamente procesadas y una apropiada estimación de los parámetros del modelo (límites seco y húmedo). En este sentido, el uso de imágenes producto de Ts e índice de vegetación puede facilitar aún más la aplicación del método por parte de usuarios no habituados al procesamiento de imágenes satelitales. . Esto permite potenciar aún más la utilización de esta metodología para la planificación y gestión productiva y económica. De esta manera, si bien el trabajo fue abordado desde el punto de vista físico de la Geografía, puede ser un elemento a tener en cuenta para el abordaje de temáticas relacionadas a otras ramas de dicha ciencia, como la económica o rural.

Es importante señalar que, los resultados obtenidos en este trabajo brindan una metodología aún escasamente explorada en la región pampeana para el monitoreo integrado de la condición hídrica del sistema suelo-planta-agua en forma espacialmente distribuida. Por otro lado, dada la vulnerabilidad social y económica de la región y de la República Argentina a las fluctuaciones interanuales en los volúmenes de producción de granos, se procura brindar una herramienta potencialmente aplicable por los tomadores de decisiones para la planificación productiva y económica. En tal sentido, se recomienda y estimula la incorporación del TVDI como parte integrante de sistemas de soporte de decisión.

Por último es necesario destacar que, dada la tendencia mundial de incrementos en la demanda de granos para alimento y producción de energía, el método del TVDI podría ser aplicado en el estudio de las condiciones de humedad de la superficie y del rendimiento de cultivos en distintas regiones del mundo de importancia por su producción de granos, como en Estados Unidos o China, entre otras. De esta manera se esperaría contribuir a la seguridad alimentaria y al suministro de energía renovable.

## Bibliografía

Agosta, E. A. y Compagnucci, R. H. 2008. Procesos atmosféricos/oceánicos de baja frecuencia sobre la cuenca sudoeste del Atlántico Sur y la variabilidad de la precipitación en el centro-oeste de Argentina. *GEOACTA*, 33, 21-31.

Aizen, M. A., Garibaldi, L. A. y Dondo, M. 2009. Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología Austral-Asociación Argentina de Ecología*, 19, 45-54.

Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P. y Mecikalski, J. R. 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 60, 195–216.

Andrade, F.H. y Sadras, V.O. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Andrade, F.H. y Sadras, V.O. (Editores), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Editorial Médica Panamericana S.A., Argentina, 173-206 pp.

Baez-Gonzalez, A.D., Chen, P., Tiscareno-Lopez, M. y Srinivasan, R. 2002. Using satellite and field data with crop growth modelling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop Science*, 42, 1943–1949.

Balaghi, R., Tychon, B., Eerens, H., Jlibene, M., 2008. Empirical regression model using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 438–452.

Banco Mundial. 2006. *Agricultura y desarrollo rural en Argentina: Temas claves*. Informe N° 32763.

Basnyat, P., McConkey, B., Lafond, G. R., Moulin, A. y Pelcat, Y. 2004. Optimal time for remote sensing to relate to crop grain yield on the Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science*, 84, 97–103.

Bhattacharya, B.K., Mallick, K. Nigam, R. Dakore, K. y Shekh, A.M. 2011. Efficiency based wheat yield prediction in a semi-arid climate using surface energy budgeting with satellite observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1394-1408.

Becker-Reshef, I., Vermonte, E., Lindeman, M. y Justice, C., 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1312-1323.

Benedetti, R. y Rossini, P. 1993. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: the case study of wheat yield estimate and forecasting in Emilio Romagna. *Remote Sensing of Environment*, 45, 311–326.

Bisang, R. 2003. Apertura económica, innovación y estructura productiva: La aplicación de la biotecnología en la producción agrícola pampeana argentina. *Desarrollo Económico*, 171. Buenos Aires.

Boken, V. K. y Shaykewich, C. F. 2002. Improving an operational wheat yield model using phenological phase-based Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 4155–4168.

Bono, A., Quiroga, A. y Frasier I. 2010. El cultivo de trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Anguil, Publicación técnica N° 79, ISSN 0325-2132, 91 pp.

Boulanger, J-P., Leloup, J., Penalba, O., Rusticucci, M., Lafon F. y Vargas, W. 2005. Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate Dynamics*, 24, 393-413.

Boulet, G., Chehbouni, A., Gentine, P. Duchemin, B., Ezzahar, J. y Hadria, R. 2007. Monitoring water stress using series of observed to unstressed surface temperature difference. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146, 159-172.

Brevedan, R.E y Egli, D.B. 2003. Short Periods of Water Stress during Seed Filling, Leaf Senescence, and Yield of Soybean. *Crop Science* 43 (6), 2083-2088.

Brocca, L., Morbidelli, R., Melone, F. y Moramarco, T. 2007. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *Journal of Hydrology*, 333 (2–4), 356–373.

Burgos, J.J. 1963. Las heladas en la Argentina. Colección Científica, 3. INTA, Buenos Aires, 388 pp.

Capehart, W.J. y Carlson, T.N. 1997. Decoupling of surface and near-surface soil water content: a remote sensing perspective. *Water Resour. Res.* 33 (6), 1383– 1395.

Cárcova, J., Maddonni, G.A. y Ghersa, C.M. 1998. Crop water stress index of three maize hybrids grown in soils with different quality. *Field Crops Research*, 55, 165-174.

Carlson, T. 2007. An overview of the “triangle method” for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, 7, 1612-1629.

Carlson, T. N., Gillies, R. R. y Perry, E. M. 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9, 161– 173.

Carlson, T.N., Gillies, R.R. y Schmugge, T.J. 1995. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 191– 205.

Carmona, F., Rivas, R., Ocampo, D., Schirmbeck, J. y Holzman, M. 2011. Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escala local y regional a partir del balance de energía. *Aqualac*, 3 (1), 26-36.

Casas, R. R. 1998. Causas y evidencias de la degradación de los suelos en la Región Pampeana. Hacia una agricultura productora y sostenible en la pampa. Orientación Gráfica S.R.L. Buenos Aires.

Challinor, A.J., Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Slingo, J.M., 2005. Simulation of the impact of high temperature stress on annual crop yields. *Agriculture and Forest Meteorology*, v. 135, p. 180–189.

Chen, C-F, Son, N-T, Chang, L-Y y Chen, C-C. 2011. Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the Vietnamese Mekong Delta using MODIS data. *Applied Geography*, 31, 463-475.

Cihlar, J. C., Ly, H., Li, Z., Chen, J., Pokrant, H. y Huang, F. 1997. Multi temporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies-Artifacts and corrections, *Remote Sensing of Environment*, 60, 35-57.

Clarke, T. R. 1997. An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. *HortTechnology*, A Publication of the American Society for Horticultural Science Alexandria, VA 2314, 7 (1), 9– 16.

Clawson, K.L. y Blad, B.L. 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agronomy Journal*, 74, 311-316.

Coll, C., Caselles. V., Galve, J.M., Valor, E. y Niclòs, J.M. 2005. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 97, 288–300.

Compagnucci, R. H y Agosta, E. A. 2008. La precipitación de verano en el centro-oeste de Argentina y los fenómenos interanual El Niño/Oscilación Sur (ENOS) e interdecádico “tipo” ENOS. *GEOACTA*, 33, 107-114.

Custodio, E y M. R. Llamas, 1983. *Hidrología subterránea*, Ed. Omega SA., 2ª ed, Barcelona.

Dadhwal, V.K., Sehgal, V.K., Singh, R.P., Rajak, D.R. 2003. Wheat yield modeling using satellite remote sensing with weather data: recent Indian experience. *Mausam*, 54, 253–262.

Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M.E. y Sadras, V.O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., De la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E. y Savin, R. (Editores), *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires, 377-406 pp.

Deering, D. W. 1978. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. Ph.D. Dissertation, Texas A & M University, College Station, TX, 338 pp.

Dobermann, A., Ping, J.L. 2004. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. *Agronomy Journal*, 96, 285–297.

Donald, P.F. 2004. Biodiversity impacts of some agricultural commodity production systems. *Conserv Biol*, 18, 17-37.

Doraiswamy, P. C. y Cook, P. W. 1995. Spring wheat yield assessment using NOAA AVHRR data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21, 43–51.

Doraiswamy, P. C., Moulin, S., Cook, P. W. y Stern, A. 2003. Crop yield assessment from remote sensing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 665–674.

Eidenshink, J. C. y Faundeen, J. L. 1994. The 1km AVHRR global land data set: first stages in implementation, *International Journal of Remote Sensing*, 15 (17), 3443-3462.

Estebanez, J. 1986. *Tendencias y problemática actual de la Geografía*. Editorial CINCEL, Madrid, 144 p.

Farquhar, G. D. y Sharkey, T. D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 33, 317.

Ferris, R., Ellis, R.H. Wheeler, T.R. y Hadley, P. 1998. Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat. *Annals of Botany*, 82 (5), 631-639.

Fioretti, M., Bredan, R., Miravalles, M.T., Fernandez, M.A., Zingaretti, O., Faraldo, M.L., Ferrero, C., Mirasson, H., y Dedurana, J. 2010. Effects of Sowing Date, Climate and Genotype On Wheat Yield and Its Components. ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings, Long Beach, CA.

Fischer, R. A. 1975. Yield potential in dwarf spring wheat and the effect of shading. *Crop Science*, 15, 607–613.

Friedl, M.A. y Davis, F.W. 1994. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, 48, 1–17.

Friedl, C.B., Randerson, J.T. y Malmstrom, C.M., 1995. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51, 74–88.

García-Mora, T. J. y Mas, J. F. 2011. Modland: los productos de superficie terrestre MODIS. En: J. F. Mas (Coordinador), *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. ISBN: 978-607-790-855-5. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, México, 25-70 pp.

Ghida Daza, C. A. 2008. Análisis del cultivo de maíz-Aspectos económicos. Informe EEA INTA Marcos Juárez <http://inta.gob.ar/documentos/analisis-del-cultivo-de-maiz.-aspectos-economicos/>

Gillies, R.R. y Carlson, T.N. 1995. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *Journal Applied Meteorology*, 34, 745–756.

Gillies, R. R., Carlson, T. N., Gui, J., Kustas, W. P. y Humes, K. S. 1997. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (15), 3145– 3166.

Girolimetto D., Venturini V. y Rodríguez L. 2011. Influencia de la resolución espacial de los diagramas NDVI – Ts en el cálculo de la fracción evaporable. *Ingeniería Hidráulica en México*, 2(3), 21-33.

Gitelson, A.A., Viña, A., Arkebauer, T.J., Rundquist, D.C., Keydan G. y Leavitt, B. 2003. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies, *Geophysical Research Letter*, 30, 1247.

Goetz, S. J. 1997. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (1), 71– 94.

Goward, S. N., Markham, B. L., Dye, D. G., Dulaney, W. y Yang, J. 1991. Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 35, 257-277.

Goward, S.N., Xue, Y. y Czajkowski, K.P. 2002. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/ vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment*, 79 (2–3), 225–242.

Goward, D. G., Turner, S., Dye, D. G. y Liang, J. 1994. University of Maryland improved Global Vegetation Index, *International Journal of Remote Sensing*, 15 (17), 3365-3395.

Grayson, R.B. y Western, A.W. 1998. Towards areal estimation of soil water content from point measurement: time and space stability of mean response. *Journal of Hydrology*, 207, 68–82.

Groten, S.M.E. 1993. NDVI-Crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1495–1515.

Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M., Culot, J. Ph. 1992. Field-crop systems of the Pampas. C.J. Pearson (Ed.), *Field Crop Ecosystems*, Serie: *Ecosystems of the World*, Elsevier, Amsterdam, 413–450

Han, Y., Wang, Y. y Zhao, Y. 2010. Estimating soil moisture conditions of the Greater Changbai Mountains by Land Surface Temperature and NDVI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (6): 2509-2515.

Hayes, J.M. y Decker, W.L. 1996. Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 3189–3200.

Holben, B. N. 1986. Characterization of maximum value composites from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1417-1434.

Holzman, M. E., Rivas, R. y Piccolo, M. C. 2012. Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería*, 28, 25-33.

Houspanossian, J., 2007. Evaluación de la respuesta de índices de estrés hídrico en vegetación de la región pampeana. Tesis de grado Licenciatura en Tecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Física. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

Housper, P.R., Rodell, M., Jambo, U., Gottschalck, J., Mcosgro, B., Radkovich, J., Arenault, K., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Mitchell, K., Pan, H.L. y Meng, C.J. 2002. Global land data assimilation system. *GEWEX News*, 11, 11–13.

Huete, A. y Justice, C. 1999. MODIS Vegetation Index (MOD 13), algorithm theoretical basis document. Version 3.

Huete, A. R. y Liu, H. Q. 1994. An error and sensitivity analysis of the atmospheric and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 32(4), 897-905.

Idso, S.B. y Baker, D.G. 1967. Relative importance of reradiation, convection and transpiration in heat transfer from plants. *Plant Physiology*, 42, 631–640.

INTA, 2010. Argentina hacia la industrialización del campo. Proyecto de Eficiencia de Cosecha, Postcosecha e Industrialización de los Granos. Actualización técnica N° 54.

INTA, 2011. Evolución del sistema productivo agropecuario argentino. INTA PRECOP, Actualización técnica N° 69.

Irmak, S., Haman, D. Z. y Bastug, R. 2000. Determination of Crop Water Stress Index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92, 1221-1227.

Jackson, R.D., 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advanced Irrigation*, 1, 43–85.

Jackson, R.D., Reginato, R.J. y Idso, S.B. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17, 1133–1138.

Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K. y Miura, T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3833-3845.

Kahimba, F.C., Bullock, P.R., Sri-Ranjan, R. y Cutforth, H.W. 2009. Evaluation of the SolarCalc model for simulating hourly and daily incoming solar radiation in the Northern Great Plains of Canada. *Can. Biosyst. Eng.* 51, 111–121.

Kaufman, Y. J. and Tanré, D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 30, 261-270.

Kirnak, H. y Dogan, E., 2009. Effect of seasonal water stress imposed on drip irrigated second crop watermelon grown in semi-arid climatic conditions. *Irrigation Science*, 27, 155-164.

Köksal E. Irrigation water management with water deficit index calculated based on oblique viewed surface temperature. *Irrigation Science*. 2008, 27:41–56.

Köppen, W. 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Walter de Gruyter, 12: 338 pp. Berlín

Leeuwen van, W. J. D., Huete, A. R., Jia, S. y Walthall, C. L. 1996. Comparison of vegetation index compositing scenarios: BRDF versus maximum VI approaches, *IEEE-IGARSS '96*, Lincoln, Nebraska, 3, 1423-1425.

Lewis, J.E., Rowland, J. y Nadeau, A. 1998. Estimating maize production in Kenya using NDVI: some statistical considerations. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 2609–2617.

Liu, H. Q. y Huete, A. R. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 33, 457-465.

Ma, B.L., Dwyer, L.M., Costa, C., Cober, E.R. y Morrison, M.J. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal*, 93, 1227–1234.

Maddison, A. *Statistics on World Population, GDP and Per Capita GDP*, 1-2006 AD. Marzo 2009.

Magrin G.O., Travasso, M.I., López, G.M., Rodríguez, G.R. y Lloveras, A.R. 2006. Vulnerabilidad de la Producción Agrícola en la Región Pampeana Argentina. Componente B3 de la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático. 86 p. disponible en [www.ambiente.gov.ar](http://www.ambiente.gov.ar)

Mahey, R. K., Singh, R., Sidhu, S. S., Narang, R. S., Dadhwal, V. K. y Parihar, J. S. 1993. Preharvest state-level wheat acreage estimation using IRS-IA LISS-I data in Punjab (India). *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1099–1106.

Mallick, K., Battacharya, B.K. y Patel, N.K. 2009. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1327-1342.

Manjunath, K. R., Potdar, M. B., y Purohit, N. L. 2002. Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 3023–3038.

Manzanal, M. 1995. Globalización y ajuste en la realidad regional argentina: reestructuración o difusión de la pobreza? *Realidad Económica*, 134, 67-82.

Maselli, F., & Rembold, F. 2001. Analysis of GAC NDVI data for cropland identification and yield forecasting in Mediterranean African countries. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 593–602.

Menzel, W.P. y Purdom, J.F.W. 1994: Introducing GOES-I: The first of a new generation of geostationary operational environmental satellites. *Bulletin American Meteorology Society*, 75, 757–781.

Mkhabela, M.S., Bullock, P., Raj, S., Wang, S. y Yang, Y. 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 385-393.

Mkhabela, M.S., Mkhabela, M.S. 2000. Exploring the possibilities of using NOAA AVHRR data to forecast cotton yield in Swaziland. *Uniswa Journal of Agronomy*, 9, 13–21.

Mkhabela, M.S., Mkhabela, M.S., Mashinini, N.N. 2005. Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data from NOAA's- AVHRR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 1–9.

Montecinos, A., Diaz, A., Aceituno, P. 2000. Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical South America based on tropical Pacific SST. *Journal of Climate*, 13, 746-758.

Monteith, J.L. y Unsworth, M.H. 1990. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, Londres, segunda edición, 291 pp.

Moody, A. y Strahler, A. H. 1994. Characteristics of composited AVHRR data and problems in their classification, *International Journal of Remote Sensing*, 15 (17), 3473-3491.

Moran, M.S. 2004. Thermal infrared measurement as an indicator of planet ecosystem health. *Thermal remote sensing in land surface processes*. D. Quattrochi, CRC- Taylor & Francis, 257–282.

Moran, M.S., Clarke, T. R., Inoue, Y. y Vidal, A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49, 246-263.

Moran, M. S., Vidal, A., Troufleau, D., Qi, J., Clarke, T. R., Pinter, P. J. Jr., Mitchell, T. A., Inoue, Y. y Neale, M. U. 1997. Combining multifrequency microwave and optical data for crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61, 96– 109.

Moriondo, M., Maselli, F. y Bindi, M. 2007. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy*, 26, 266–274.

Nemani, R., Pierce, L., Running, S. y Goward, S. 1993. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology*, 32 (3), 548– 557.

Nemani, R. y Running, S. W. 1989. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 28, 276–284.

Nemani, R. y Running, S.W. 1997. Land cover characterization using multi-temporal red, near-IR and thermal-IR data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, 7 (1), 79– 90.

O'Shaughnessy, S.A., Evett, S.R., Colaizzi, P.D. y Howell T.A., 2011. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. *Agricultural Water Management*, 98, 1523-1535.

Patel, N.R., Anapashsha, R., Kumar S., Saha, S.K. y Dadhwal, V.K. 2009. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 23–39.

Pereyra, F. 2003. Ecorregiones de la Argentina. SEGEMAR. ISSN 0328-2325, 189 pp.

Pizarro, J. B. 2003. La evolución de la producción agraria pampeana en la segunda mitad del siglo XX. Buenos Aires, *Revista Interdisciplinaria de Estudios Agrarios*, 18, 1º semestre.

PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), 2009. Caracterización de la producción agrícola en Argentina frente al cambio climático. Documento técnico presentado en la Jornada de Contribución al Esfuerzo Global de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático. Buenos Aires.

Pordomingo, A. J. 1998. Evaluación de la sustentabilidad de los agroecosistemas mixtos de la región pampeana. AAPA, 22 Congreso Argentino de Producción Animal “Sustentabilidad de los sistemas mixtos agroganaderos. Río Cuarto, Córdoba.

Prasad, A.K., Chai, L. y Singh, R.P. 2006. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (1), 26-33.

Quarmby, N. A., Milnes, M., Hindle, T. L. y Silleos, N. 1993. The use of multitemporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 199–210.

Quiroga, A. B. y Pérez Fernández, J. 2008. El cultivo de girasol en la región semiárida pampeana. Publicación técnica Nº 72. ISSN: 0325-2132. Ediciones INTA.

Rasmussen, M.S., 1992. Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from AVHRR. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 3431–3442.

Rasmussen, M. S. 1997. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: Reduction of environmental and inter-annual variability. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 1059–1077.

Ren, J. Q., Chen, Z. X., Zhou, Q. B. y Tang, H. J. 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 403–413.

Rhee, J., Jungho, I y Carbone, G.L. 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 2875-2887.

Rivas, R. y Caselles, V. 2005. Reference evapotranspiration in a pasture of Argentina. En: Recent research developments in thermal remote sensing. Caselles, V., Valor, E. y Coll, C. (editores), 119-134.

Rivas, R. y Houspanossian, J., 2006. Obtención de mapas de estrés hídrico a partir de datos captados por los sensores AVHRR y MODIS. VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Paraguay.

Running, S.W., Nemani, R.R. 1988. Relating Seasonal Patterns of the AVHRR Vegetation Index to Simulated Photosynthesis and Transpiration of Forests in Different Climates. *Remote Sensing of Environment*, 24, 347-367.

Sacarpati, O.E., Forte Lay, J.A. y Capriolo, A.D. 2008. La inundación del año 2001 en la provincia de Buenos Aires. *Mundo Agrario*, 9 (17), 1-29.

Saleh, K., Wigneron, J.P., Waldteufel, P., de Rosnay, P., Schwank, M., Calvet, J.C., Kerr, Y.H. 2007. Estimates of surface soil moisture under grass covers using L-band radiometry. *Remote Sensing of Environment*, 109, 42–53.

Sandholt I., Rasmussen, K., ANDERSEN, J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing and Environmental*. Volumen 79 (2-3), 213–224.

Satorre, E.H. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Revista Ciencia Hoy*, 15 (87), 24-31.

Sobrino, 2000, "TELEDETECCION", ISBN 84-370-4220-8, 467 pp, Universitat de Valencia.

Soriano, A., León, R.J.C., Sala, O.E., Lavado, R.S., Deregibus, V.A., Cauhépé, M.A., Scaglia, O. A., Velázquez, C.A. y Lemcoff, J.H. 1991. Temperate subhumid grassland of South America. En: Coupland R. T. (Editor), *Natural Grasslands. Ecosystems of the World*. Elsevier Scientific Publishing Company, Ámsterdam, 8, 367-407.

Tang, R., Li, Z-L y Tang, B. 2010. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114, 540-551.

Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8 (2), 127-150.

Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H. y McMurtrey, J. E. 1980. Relationships of spectral data to grain yield variation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 657–666.

Tucker, C.J. y Sellers, P.J. 1986. Satellite remote sensing of primary production, *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11), 1395-1416.

Unganai, L.S. y Kogan, F., 1998. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 63, 219-232.

Varillas, M.A., Fioretti, M.N., Baioni, S.S., Marisson, H. y Brevedan, R. 2010. Soybean Plants Affected by Phosphorus and Water Deficiency. ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings, Long Beach, CA.

Vázquez P. y Rivas R. 2010. Comparación De Índices De Estrés Hídrico (CWSI, WDI y TDVI) Utilizando datos del sensor MODIS. Actas X Congreso de ALHSUD, Ref.90-AR, T4:1-8. Caracas, Venezuela. ISBN 978-980-7346009-9.

Vilá Valenti, J. 1983. Introducción al estudio teórico de la Geografía: objetivos, contenidos y enfoques. Editorial Ariel, Barcelona, 377 p.

Vicente-Serrano, S., Cuadrat-Prats, J.M. y Romos, A. 2006. Early prediction of crop production using drought indices at different time-scales and remote sensing data: application in Ebro Valley (north-east Spain). *International Journal of Remote Sensing*, 27, 511–518.

Wall, L., Larocque, D. y Leger, P. M. 2007. The early explanatory power of NDVI in crop yield modeling. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 2211–2225.

Walthall, C. L., Norman, J. M., Welles, J. M., Campbell, G. y Blad, B. L. 1985. Simple equation to approximate the bi-directional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces, *Applied Optics*, 24 (3), 383-387.

Wan, Z. 1999. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document, version 5. Institute for Computational Earth System Science, University of California, 75 pp.

Wan, Z., 2008. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112 (1), 59-74.

Wan, Z. y Dozier, J. 1989. A generalizad splits-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (4), 892-905.

Wan, Z. y Dozier, J. 1996. A generalizad splits-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (4), 892-905.

Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Y.Q. y Li, Z-L. 2004. Quality assessment and validation of the global land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 261–274.

Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J. y Granier, A. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94, 244–255.

Waring, H.R y Running, S.W. 2007. *Forest Ecosystems. Analysis at Multiples Scales.* 3rd edition. Academic Press, San Diego.

Willmott, C. 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 181-194.

Willmott, C.J., Matsuura, K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing model performance. *Climate Research*, 30, 79–82.

You, L., Rosegrant, M.W., Wood, S. y Dongsheng, S. 2009. Impact of growing temperature on wheat productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1009-1014.

Zamorano, M. 1985. La Geografía, ciencia de una actualizada realidad espacial. *Revista Universitaria de Geografía*, 1 (1), 7-16. Bahía Blanca, Departamento de Geografía, UNS.

# ANEXO 1

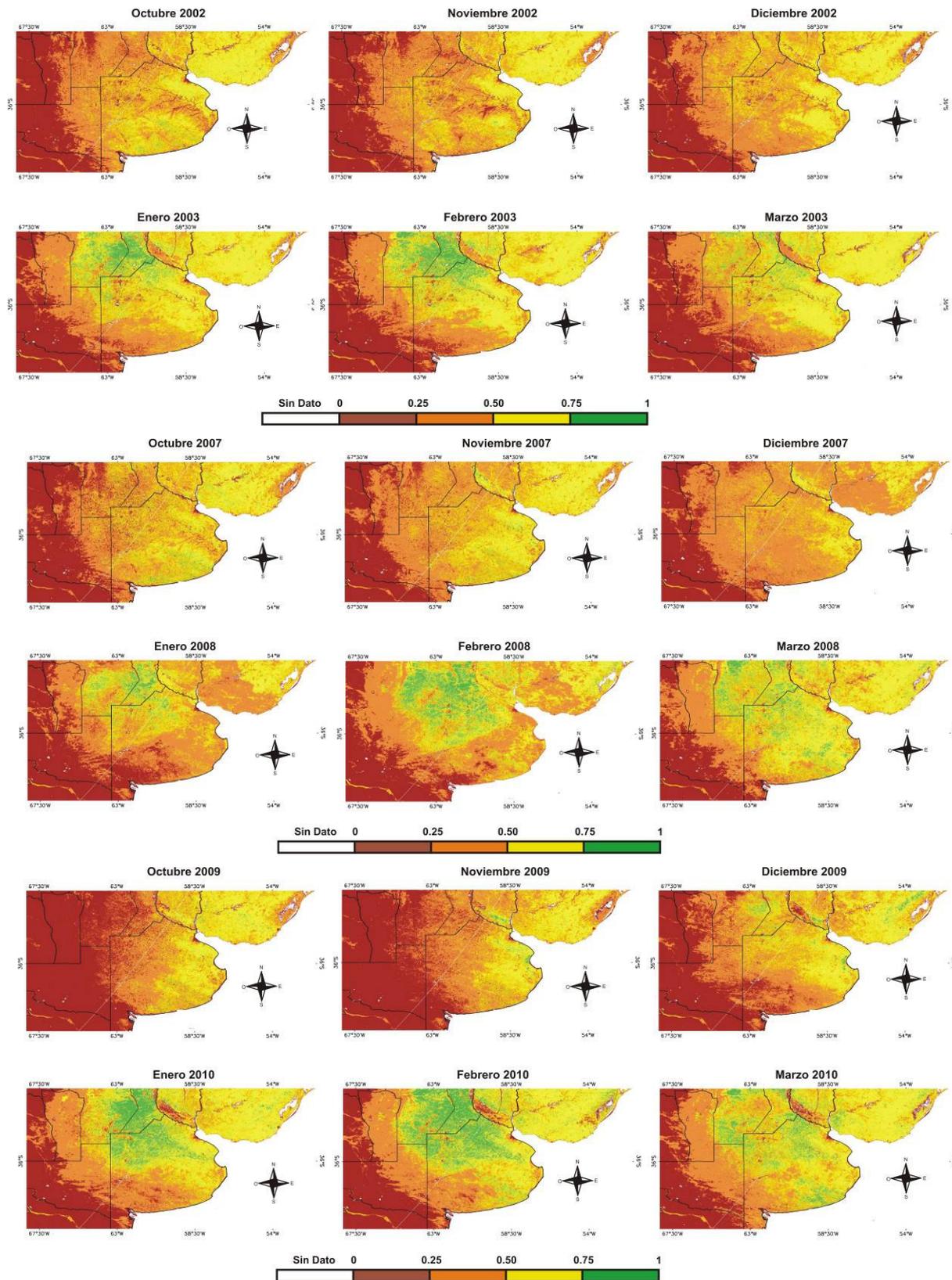


Figura 1. Imágenes mensuales de EVI utilizadas para el cálculo del TVDI.

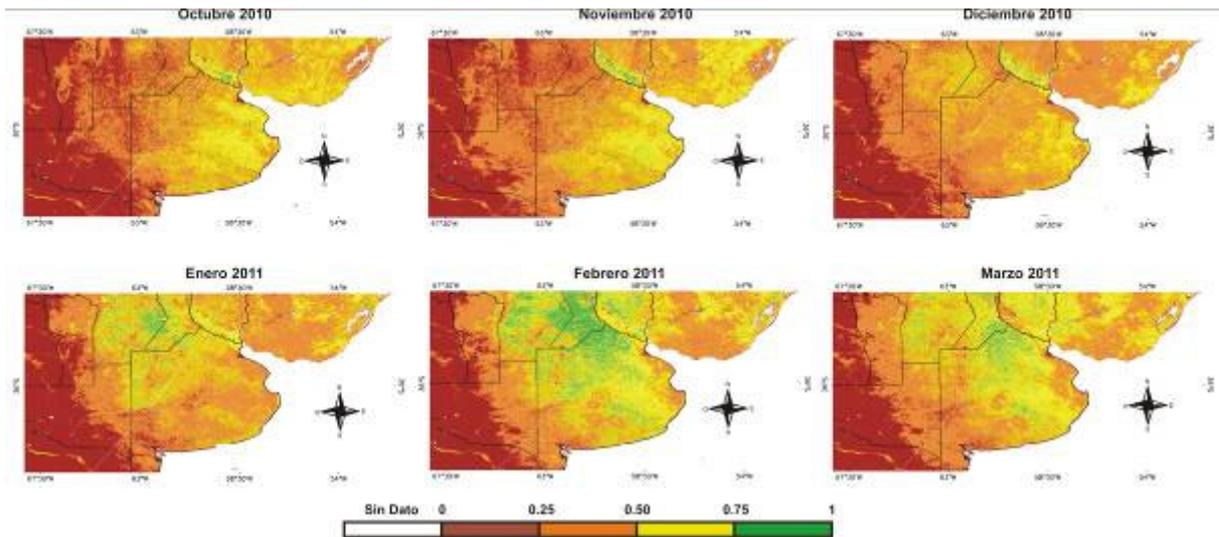


Figura 1. Continuación

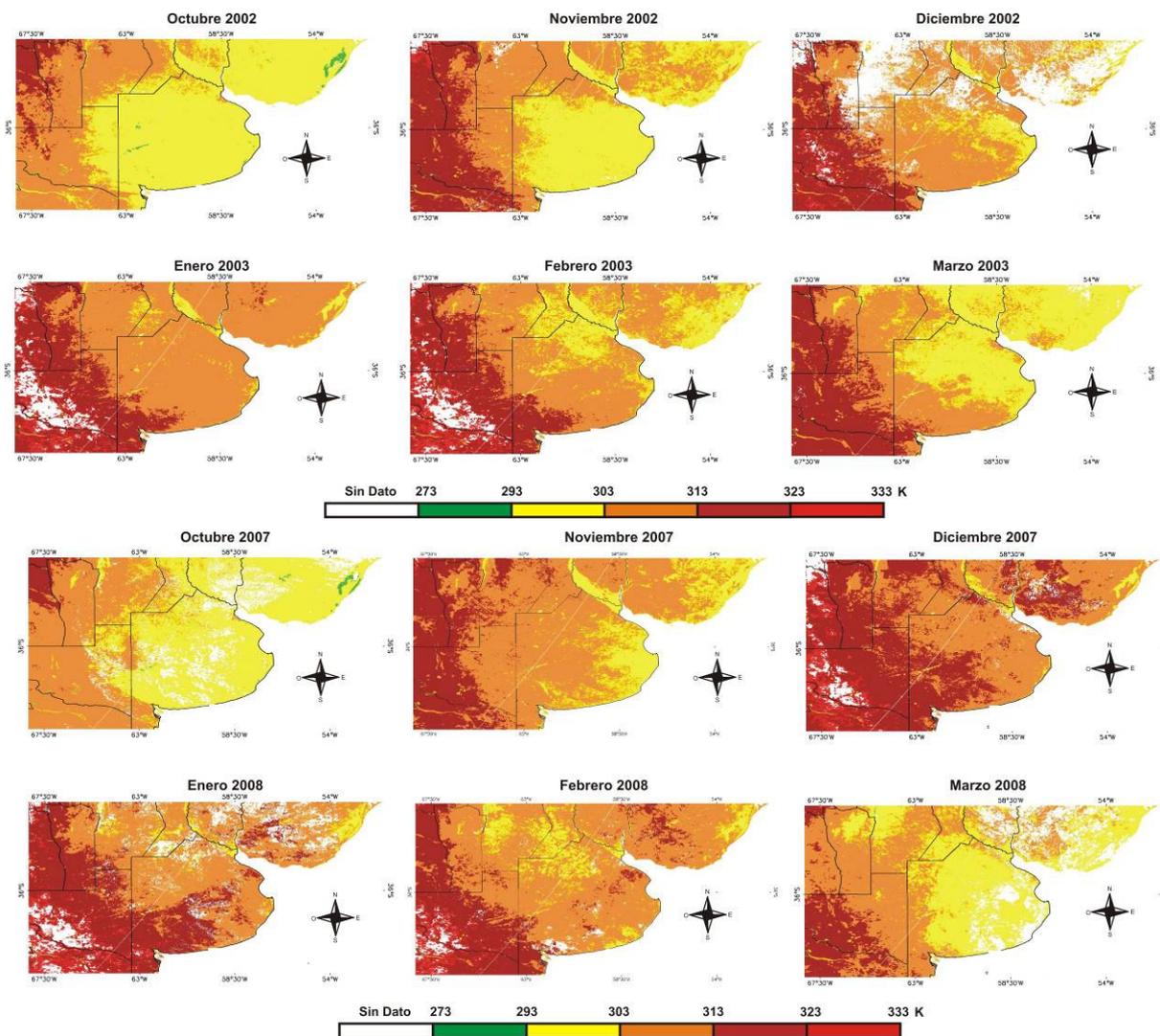


Figura 2. Imágenes mensuales de Ts utilizadas para el cálculo del TVDI.

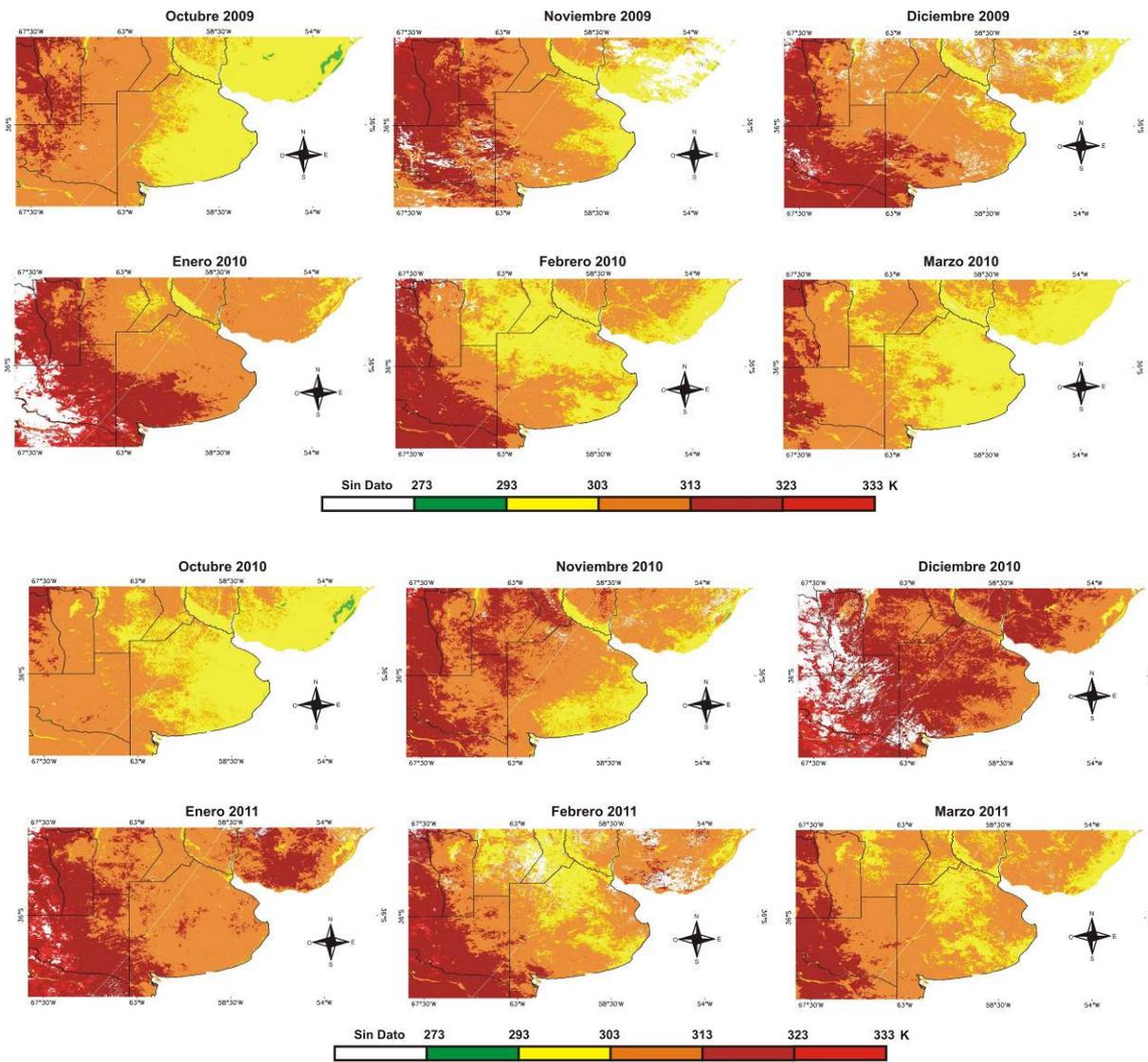


Figura 2. Continuación.