

# **Impacto del uso del suelo sobre el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) en el noroeste argentino**

*Trabajo final presentado para la Especialización en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica Aplicados al Estudio de los Recursos Naturales y la Producción Agropecuaria*

**Marcelo Darío Rabaglio**

Calculista Científico - Universidad Nacional de La Plata - 1987

Lugar de trabajo: Instituto de Economía y Sociología. INTA.



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

## COMITÉ CONSEJERO

Tutor

**José Volante**

Licenciado en Recursos Naturales (Universidad Nacional de Salta)

Asesor

**Victor P. Brescia**

Estadístico (Universidad Nacional de Rosario)  
Ms Sc en Estadística (Iowa State University, USA)

## JURADO

Director

**Carlos M. Di Bella**

Ingeniero Agrónomo (Facultad de Agronomía, UBA)  
Doctor del Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris-Francia)

JURADO

**Martín Oesterheld**

Ingeniero Agrónomo (Facultad de Agronomía, UBA, Argentina)  
Doctor of Philosophy in Biology, Department of Biology, Syracuse University, Estados Unidos  
de Norteamérica

JURADO

**José Volante**

Licenciado en Recursos Naturales (Universidad Nacional de Salta)

Fecha de defensa del trabajo: 7 de Junio de 2012

## INDICE GENERAL

- 1. Introducción**
- 2. Materiales y método**
  - 2.1. Área de estudio
  - 2.2. Base de datos y variables
- 3. Selección de datos para el análisis**
  - 3.1. Definición de ambientes
  - 3.2. Referencia agroeconómica
- 4. Análisis estadístico**
- 5. Resultados**
  - 5.1. Entornos no modificados: modelos estimados para los atributos del índice NDVI
  - 5.2. Extrapolación de los modelos estimados a los entornos modificados
  - 5.3. Impacto del uso del suelo
- 6. Conclusiones**
- 7. Bibliografía**
- 8. Anexo A - Metodología para el análisis**
  - 8.1. Descripción general
  - 8.2. Modelización de los atributos de NDVI en ambientes naturales o poco intervenidos
  - 8.3. Variables de control
  - 8.4. Interpretación de los modelos estimados
- 9. Anexo B - Prueba de Hipótesis Múltiple**

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Grupo NO\_MODIF (Q1). Ambiente seco. Modelos estimados.

Tabla 2 - Grupo NO\_MODIF (Q1). Ambiente húmedo. Modelos estimados.

Tabla 3 - Superficies ocupadas según combinación de cultivos o secuencia de uso del suelo. Campaña 2001-02. Fuente: elaboración propia en base a mapa de cultivos y áreas desmontadas del NOA (PRORENOA, INTA Salta)

Tabla 4 - Cantidad de celdas seleccionadas por uso de suelo predominante y ambiente (seco o húmedo)

Tabla 5 - Modelo estimado para NDVI-I. Ambiente Húmedo

Tabla 6 - Modelo estimado para NDVI-I. Ambiente Seco

Tabla 7 - Estimaciones NDVI-I – Ambiente Húmedo – Agrupamiento ESTE

Tabla 8 - Estimaciones NDVI-I – Ambiente Húmedo – Agrupamiento OESTE

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Representación de la dinámica estacional del NDVI y los tres atributos derivados: NDVI-I, RREL y DMAX (Tomado de Guerschman et al. 2003)

Fig. 2 - Ubicación del área de estudio. En sombreado oscuro se presenta el área con precipitaciones medias mayores a 300 mm/año y pendientes inferiores a 5%.

Fig. 3 - Área con potencial agropecuario y detalle de la grilla con unidades espaciales de análisis de 5.5 km de lado.

Fig. 4 - Área de cobertura de las escenas MODIS utilizadas.

Fig. 5 - (a) Grilla construida sobre el área de estudio. (b) Celdas de la grilla con superficie de actividad agropecuaria mayor o igual a 1% (en gris oscuro).

Fig. 6 - (a) Precipitación media anual (PMA) del área de estudio (Bianchi y Yañez, 1993); en gris claro, zonas con PMA inferiores a 625 mm y en gris oscuro, zonas con PMA superiores a 625 mm. (b) Celdas con áreas destinadas a uso agropecuario categorizadas por ambiente (seco o húmedo).

Fig. 7 - Distribución espacial de las 3360 celdas que componen el universo de estudio diferenciadas según el ambiente al cual pertenecen (seco en gris claro y húmedo en gris oscuro).

Fig. 8 - Valores estimados y observados de atributos de NDVI para celdas del grupo MODIF (Q2-Q4) en ambientes seco y húmedo.

Fig. 9 - Relación entre las diferencias de valores observados y estimados, y la superficie destinada a la actividad agropecuaria (porcentaje de desmonte).

Fig. 10 - (a) Ambiente seco: ajuste entre desvíos y porcentajes de tipo de cultivo por celda para NDVI-I (arriba), RREL (centro) y DMAX (abajo) (b) Ambiente húmedo: ajuste entre desvíos y porcentajes de tipo de cultivo por celda para NDVI-I (arriba), RREL (centro) y DMAX (abajo)

Fig. 11 - (a) celdas con predominancia de doble cultivo. (b) celdas con predominancia de un solo cultivo (cosecha gruesa). (c) celdas con predominancia de cultivo de caña de azúcar. (Las celdas en ambiente seco en color claro y en ambiente húmedo en color más oscuro).

Fig. 12 - Relación entre atributo NDVI-I y superficie desmontada. Subconjuntos de celdas de acuerdo a la predominancia de uso de suelo y al ambiente.

Fig. 13 - Relación entre atributo RREL y superficie desmontada. Subconjuntos de celdas de acuerdo a la predominancia de uso de suelo y al ambiente.

Fig. 14 - Relación entre atributo DMAX y superficie desmontada. Subconjuntos de celdas de acuerdo a la predominancia de uso de suelo y al ambiente.

Fig. 15 - Distribución espacial de los grupos NO\_MODIF (Q1) y MODIF (Q2-Q4). Ambiente seco

Fig. 16 - Distribución espacial de los grupos NO\_MODIF (Q1) y MODIF (Q2-Q4). Ambiente húmedo

Fig. 17 - Ubicación de las fracciones consideradas para el cálculo de los valores promedios

*Declaro que el material incluido en este trabajo es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como un trabajo en ésta u otra institución.*

### **Agradecimientos:**

A mis tutores, Victor Brescia y José Volante, quiénes le dedicaron una importante cantidad de horas a este trabajo. Sin ellos no me hubiera sido posible terminarlo.

Además a Victor un agradecimiento especial por haberme avisado de que se estaba iniciando la primera cohorte de esta Especialización y haberme entusiasmado para que me anotara.

Al INTA, en particular al Instituto de Economía y Sociología, por haber solventado los gastos derivados de la Especialización y brindarme las condiciones laborales adecuadas para encarar y concluir este trabajo.

A José Paruelo, por evacuar algunas dudas con toda predisposición.

A Fernanda, Josefina y Joaquín, por estar siempre conmigo.

## **Título**

### **Impacto del uso del suelo sobre el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) en el noroeste argentino**

## **Resumen**

En este trabajo se evalúan los impactos del cambio del uso del suelo en la región Chaqueña noroccidental de Argentina abordando cuestiones como la relación entre factores ambientales y edáficos y la dinámica del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) en áreas donde la vegetación ha sido ligeramente modificada y cómo afecta a la dinámica del NDVI la intensificación del uso de la tierra.

El NDVI constituye una cuantificación de la fracción de energía absorbida por la vegetación y, bajo ciertas condiciones, de la productividad primaria neta (PPN). Fue obtenido desde el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ubicado a bordo de las misiones satelitales de la NASA Aqua y Terra.

Se incorporó información de uso de suelo, clima, suelo y NDVI en un sistema de información geográfica con una resolución espacial coincidente con la grilla de la serie temporal de NDVI denominada LTDR (Long Term Data Record). El uso del suelo fue caracterizado por la proporción de cultivos en cada celda de la grilla. Tres atributos fueron derivados de la dinámica estacional del NDVI: la integral anual (NDVI-I), el rango relativo (RREL) y la fecha del máximo NDVI (DMAX).

La influencia de los factores ambientales para las celdas con menor proporción de cultivos se analizó mediante regresiones individuales con los tres atributos de NDVI como variables dependientes y las variables de clima y suelo como variables independientes. Para los tres atributos de NDVI persiste en la variabilidad observada un porcentaje importante que no es explicado por las variables consideradas.

Se aplicaron los modelos obtenidos a las celdas con mayor proporción de cultivos y se analizaron las diferencias entre los valores observados y predichos de los atributos derivados del NDVI. Ninguno de los modelos ajustados explica la mayor parte de la variabilidad observada cuando se aplican a entornos modificados. En líneas generales, para el NDVI-I los valores observados son menores que los estimados; para RREL, los valores observados son mayores que los estimados y para DMAX no hay evidencias claras de diferencias entre ambos valores.

Se analizaron los desvíos entre valores observados y estimados y su relación con el uso de suelo. La magnitud de los cambios observados en la radiación absorbida y la estacionalidad están vinculados a la proporción del paisaje agriculturizado. Por un lado, se observa una disminución del NDVI-I. Por el otro el efecto más relevante de la agriculturización del paisaje sobre la dinámica del carbono es el incremento significativo de la estacionalidad evidenciado por un aumento del RREL. Con respecto a la fecha de máximo NDVI no surgen evidencias claras acerca de la influencia de la agriculturización sobre la misma.

## **Palabras Claves**

NDVI, Uso de suelo, Productividad Primaria Neta, Teledetección, Censos Agropecuarios, Agriculturización.

## **Title**

### **Impact of land use on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the norwest of Argentina**

## **Abstract**

This study evaluates the impacts of land use change in the Chaco region of northwestern Argentina by addressing issues such as the connection between environmental and soils indicators and the dynamic of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in areas where vegetation has been slightly modified and how the intensification of land use affects the dynamic of NDVI.

The NDVI is a measurement of the fraction of energy absorbed by vegetation and thus of the net primary productivity (NPP). It was obtained from the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensor located on board of the Terra and Aqua NASA satellite missions.

Information from land use, climate, soil and NDVI was incorporated in a geographic information system with a spatial resolution in agreement with the grid of NDVI time series called LTDR (Long Term Data Record). Land use was characterized by the proportion of crops in each grid cell. Three attributes were derived from the seasonal dynamics of NDVI: the annual integral (NDVI-I), the relative range (RREL) and the date of maximum NDVI (DMAX).

The influence of environmental indicators for cells with the lowest proportion of crops were analyzed by individual regressions with the three NDVI attributes as dependent variables and, as independent variables, the climatic and soil variables. For the three NDVI attributes the observed variability persists in a significant percentage that is not explained by the variables considered.

The resulting models were applied to cells with a higher proportion of crops and the differences between observed and predicted values of the attributes derived from NDVI were analyzed. None of the fitted models explains much of the variability observed when applied to modified environments. Overall, for the NDVI-I the observed values are lower than estimated; for RREL, the observed values are higher than estimated and for DMAX there is no clear evidence of differences between both values.

We analyzed the deviations between observed and estimated values and their connection with land use. The magnitude of the changes observed in the NPP and seasonality are linked to the proportion of the landscape under agriculturization. On the one hand, there is a decrease of NPP. On the other hand the most relevant effect of the agriculturization on carbon dynamics is the significant rise of seasonality evidenced by increased RREL. With regard to the date of maximum NDVI there is no clear evidence for the influence of agriculturization on it.

## **Keywords**

NDVI, Land Use, Net Primary Productivity, Remote Sensing, Agricultural Census, Agriculturization.

## 1. Introducción

Importantes procesos de cambio de uso del suelo se están desarrollando en Argentina, por expansión de la frontera agropecuaria e intensificación de la agricultura (Paruelo et al. 2006).

Una de las áreas más afectadas por este proceso es la correspondiente al noroeste argentino (NOA). En ella se observan procesos de desmonte que transforman entornos naturales en áreas de cultivos. En particular, en la zona correspondiente a la región Chaqueña la expansión del área agrícola ocurre principalmente por reemplazo de bosques nativos, removidos a tasas del 1.6% anual superando ampliamente el promedio continental (0.51%), (FAO, 2009; Volante et al. 2011).

Cambios de esta naturaleza conllevan reducciones en la capacidad de proveer servicios ecosistémicos; es decir que afectan aquellos procesos y estructuras de los ecosistemas que son utilizados para generar bienestar humano (Boyd & Banzhaf 2007; Fisher et al. 2009). Estos cambios producen impactos en términos socio-económicos y ambientales con potenciales riesgos para la sustentabilidad de los ecosistemas. (Paruelo et al., 2011, Volante et al. 2011).

Entre los servicios ecosistémicos más importantes se encuentra la regulación del ciclo biogeoquímico del carbono. En ese sentido, aún cuando la agriculturización juega un papel fundamental en el ciclo del carbono (influyendo en el ciclo, por ejemplo, a través de la pérdida de materia orgánica de los suelos al producirse el reemplazo de vegetación natural por cultivos anuales, por la aplicación de diferentes prácticas de manejo, mediante la extracción de grandes cantidades de C al momento de la cosecha, etc.), el impacto de la agricultura sobre el mismo no está completamente explicado (Kicklighter et al. 1999, Paruelo et al. 2001). Por ejemplo, no está claro cómo la agricultura incrementa o disminuye la cantidad de radiación absorbida por el canopeo, ni cómo la agricultura altera la estacionalidad de la captura de carbono (Ruimy et al. 1999).

Monteith (1972, 1977) en la década del 70' sugirió que la productividad primaria neta (PPN) de la vegetación, bajo ciertas condiciones, se relaciona linealmente con la cantidad de energía solar absorbida por la vegetación. Más adelante, otros autores demostraron que la porción fotosintéticamente activa de la energía absorbida (FPAR) podía ser estimada con sensores remotos a través de los índices de vegetación espectrales (Sellers, 1987; Asrar et al. 1992; Myneni et al. 1997b) y que la relación índice de vegetación-FPAR está mucho menos afectada por otros factores (como por ejemplo arquitectura de la cubierta vegetal o presencia de material senescente) que las relaciones con el índice de área foliar o con la biomasa (Di Bella et al. 2004). Es así como el análisis de la información generada por sensores a bordo de satélites es útil para realizar descripciones de procesos biofísicos a nivel de ecosistema y analizar los cambios funcionales que los mismos han experimentado en las últimas décadas (Paruelo 2008).

El índice de vegetación más usado es el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) y constituye una cuantificación de la fracción de energía absorbida por la vegetación y bajo ciertas condiciones, de la productividad primaria neta o ganancias de C.

El NDVI combina datos espectrales de la franja visible del espectro en el rojo (R, longitud de onda: 620-670 nanómetros) y en el infrarrojo cercano (IR, longitud de onda: 841-876 nm), quedando definido como:

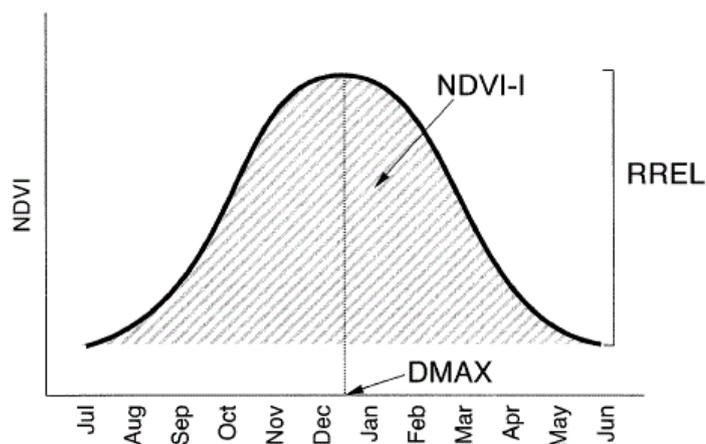
$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R}).$$

Este índice aprovecha características de la vegetación verde que hacen que las reflectancias en estas dos bandas (R e IR) sean notoriamente diferentes según el estado de la vegetación. Así, las superficies fotosintéticamente activas reflejan una mayor proporción de la radiación incidente en la banda infrarroja (debido a la estructura del mesofilo de las hojas) y, una menor proporción en la banda roja (debido a la absorción por parte de la clorofila). Consecuentemente, el NDVI calculado asumirá mayores valores cuanto más intensa sea la actividad fotosintética de la cobertura vegetal observada.

Las series temporales de índices de vegetación constituyen descriptores del funcionamiento ecosistémico. La integral anual del NDVI es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el canopeo (Sellers et al. 1992) y, así, constituye un indicador de la producción primaria (Tucker et al. 1985b, Prince 1991, Paruelo et al. 1997).

El rango relativo y la fecha de máximo NDVI capturan rasgos esenciales de la estacionalidad de la captura de carbono (Paruelo and Lauenroth 1998, Paruelo et al. 2001, Jobbágy et al. 2002).

Una síntesis de los tres atributos discutidos, se refleja en la Figura 1.



**Fig. 1 - Representación de la dinámica estacional del NDVI y los tres atributos derivados: NDVI-I, RREL y DMAX (Tomado de Guerschman et al. 2003)**

Diversos autores han utilizado al NDVI a escala regional para evaluar la influencia del cambio de uso del suelo sobre las ganancias de C.

Paruelo y colaboradores (2004) observaron que en Sudamérica el NDVI disminuyó de forma significativa en muchas de las áreas en las que la agricultura se extendió por sobre los bosques.

Guerschman y colaboradores (2003) han utilizado a la dinámica estacional del NDVI para evaluar los impactos del cambio del uso del suelo en la región Pampeana argentina a escala de Departamento o Partido. Para ese objetivo emplearon imágenes de los satélites NOAA del período 1981-1999 e información de uso del suelo (de origen censal), clima y tipos de suelo.

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar los impactos del cambio del uso del suelo en la región Chaqueña noroccidental de Argentina siguiendo la aproximación metodológica utilizada por Guerschman y colaboradores (2003) para la región Pampeana. Se pretende contestar a las siguientes preguntas:

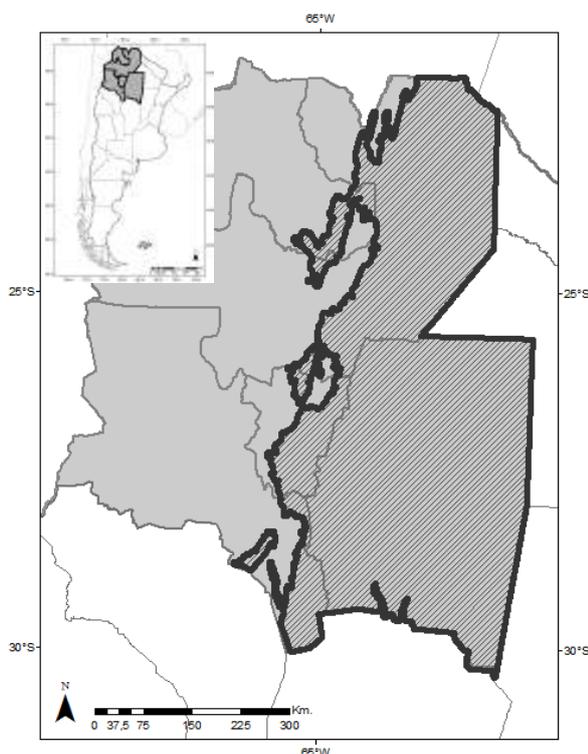
- 1) ¿Cuál es la relación entre factores ambientales y edáficos y la dinámica del NDVI en áreas donde la vegetación ha sido ligeramente modificada?
- 2) ¿Cómo el cambio en el uso de la tierra (intensificación del uso) modifica la dinámica del NDVI observada en áreas ligeramente modificadas?

## 2. Materiales y método

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo está constituida por la región noroeste de la República Argentina (NOA) abarcando las provincias de Catamarca, Jujuy, Salta, Santiago del Estero y Tucumán (aproximadamente 47 millones de ha.) y quedando delimitada por los paralelos con latitud  $21^{\circ} 40'$  S al norte y  $30^{\circ} 25'$  S al sur y por los meridianos con longitud  $61^{\circ} 35'$  W al este y  $69^{\circ} 10'$  W al oeste. (Fig. 2).

Dentro de la región NOA, y de acuerdo a características climatológicas y edáficas, se seleccionó el área con potencial agropecuario (Fig. 2), de manera tal de favorecer la comparabilidad de las unidades bajo estudio. Se consideraron las áreas que tienen precipitaciones medias anuales promedio superiores a los 300 mm y pendientes inferiores al 5%. Esta región ha registrado las mayores transformaciones del paisaje en los últimos 30 años (Volante et al., 2011) y se corresponde en gran medida con el Chaco Subhúmedo Occidental, Chaco Seco y Pedemonte de Yungas.



**Fig. 2 - Ubicación del área de estudio. En sombreado oscuro se presenta el área con precipitaciones medias mayores a 300 mm/año y pendientes inferiores a 5%.**

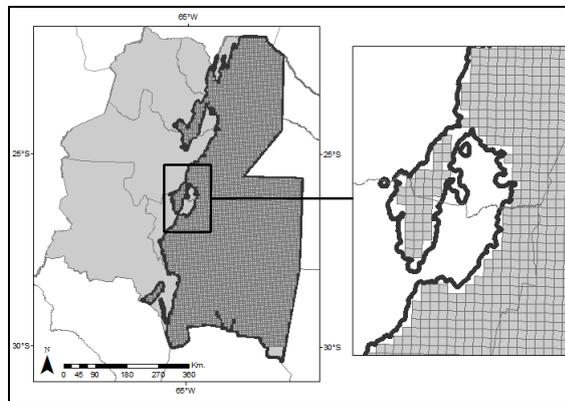
### 2.2. Base de datos y variables

El trabajo se focaliza en la campaña agrícola 2001/02 coincidente con el relevamiento realizado por el Censo Nacional Agropecuario 2002 (CNA 2002 – Instituto Nacional de Estadística y Censos, INDEC), abarcando el período que va desde el 01/07/2001 al

30/06/2002. La decisión de elegir la campaña relevada por el censo fue tomada a fin de permitir la incorporación de los datos censales al análisis realizado.

Se integró información sobre uso de la tierra, clima, suelo e información satelital (índices de vegetación) en una base de datos asociada con un sistema de información geográfica (GIS) desarrollado utilizando los productos del software ArcGIS 9.3 (<http://www.esri.com>).

A fin de referenciar espacialmente los datos y llevarlos a una unidad de análisis homogénea en cuanto a forma y tamaño, se impuso sobre el área con potencial agropecuario una grilla compuesta por celdas de 5.5 km. de lado (7407 celdas de 3025 ha de superficie cada una para un total de 224061.75 km<sup>2</sup>); (Fig. 3). El tamaño de celda y ubicación de la malla fue seleccionada en coincidencia con los píxeles de la serie temporal de NDVI denominada LTDR (Long Term Data Record disponible en [ltdr.nascom.nasa.gov/](http://ltdr.nascom.nasa.gov/)) para futuros trabajos de investigación.



**Fig. 3 - Área con potencial agropecuario y detalle de la grilla con unidades espaciales de análisis de 5.5 km de lado.**

### 2.2.1. *Uso de la tierra*

Se accedió a la información del uso de la tierra consultando la librería de mapas de cultivos y áreas desmontadas del NOA específicamente el mapa correspondiente a la campaña agrícola 2001/02 (cultivos de verano e invierno), del proyecto PRORENOA<sup>1</sup> de INTA Salta.

A partir de la superposición (*overlay*) entre el mapa de la campaña 2001/02 y la grilla se calculó, para cada celda, el porcentaje destinado a uso agropecuario (variable P\_DESMON), discriminando el porcentaje ocupado por diferentes tipos o combinaciones de cultivos (en orden de importancia según superficie ocupada: soja, trigo-soja, caña de azúcar, poroto, maíz, trigo-maíz, trigo, cártamo-soja, algodón, maní, trigo-algodón, trigo-poroto, cártamo-maíz y cártamo). Con ello se generó una base de datos georeferenciada a nivel de celda (7407 registros).

<sup>1</sup> PRORENOA: Proyecto de Relevamiento de Cultivos del NOA - INTA

### **2.2.2. Clima**

Se utilizaron los mapas climáticos del NOA procesados por INTA Salta y basados en Bianchi y Yañez, 1992. Comprenden datos promedios obtenidos de 300 estaciones meteorológicas entre los años 1935 y 1990. A través de procedimientos de SIG de superposición cartográfica se calculó la temperatura media anual promedio, precipitación media anual promedio y déficit hídrico potencial medio a cada una de las celdas de la grilla.

La elevada colinealidad entre déficit hídrico potencial, temperatura y precipitaciones inhibió el uso simultáneo de las tres variables.

### **2.2.3. Tipos de suelo**

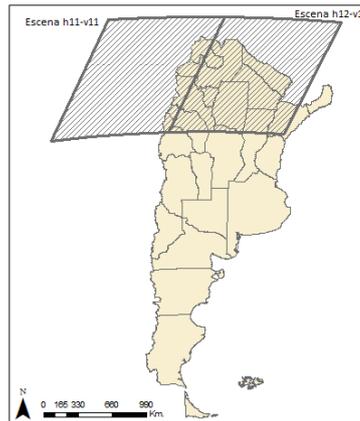
Se utilizó el Atlas de Suelos de la República Argentina (<http://geointa.inta.gov.ar/node/28/>), para disponer de la caracterización edáfica de cada celda. De forma similar que los mapas climáticos, se calculó el porcentaje de ocupación de los principales órdenes de suelo (alfisoles, aridisoles, entisoles, inceptisoles y molisoles) y de otros sustratos como rocas, salinas o agua (lagos, lagunas, etc.). Simultáneamente, se estimó en porcentaje la superficie ocupada por tipo de limitantes. Cada celda fue evaluada en términos de limitantes principales, tales como salinidad, erosión hídrica o pendiente.

### **2.2.4. Información satelital**

La información satelital utilizada para relevar el índice de vegetación proviene del sensor MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) y se utilizó como el indicador relevante para caracterizar el funcionamiento de los ecosistemas.

Se utilizó el NDVI del producto MOD13Q1 (<ftp://e4ftl01u.ecs.nasa.gov/MOLT/MOD13Q1.005>), que posee una resolución espacial de 250 m (6.25 ha de superficie por pixel). Las imágenes MOD13Q1 incluyen 12 bandas sintéticas de diferentes productos con correcciones geométricas y radiométricas, estando el índice de vegetación NDVI en la banda 1. Cada pixel de esta banda representa el máximo valor de NDVI registrado en el período de 16 días.

Para disponer de información satelital en toda el área de estudio, se utilizaron las escenas MODIS h11-v11 y h12-v11 (Fig. 4). En cuanto al período de tiempo, se utilizaron 23 imágenes MOD13Q1 correspondientes a la campaña agrícola 2001/02 relevada por el CNA02. Dado que la campaña de invierno en el NOA se inicia entre abril y mayo con la siembra de trigo, la información satelital que se utilizó está comprendida entre el 10/05/2001 y el 09/05/2002.



**Fig. 4 - Área de cobertura de las escenas MODIS utilizadas.**

A partir de los valores secuenciales de esas 23 imágenes de NDVI correspondientes a la campaña 2001/02, se derivaron tres atributos para caracterizar la heterogeneidad espacial de la vegetación para la región bajo estudio:

- NDVI-I: integral anual de NDVI
- RREL: rango relativo de NDVI
- DMAX: fecha de máximo NDVI

La integral anual de NDVI-I fue calculada como la sumatoria de 23 observaciones, donde cada una de ellas es el resultado del producto del NDVI de la imagen MOD13Q1 por 16 (siendo 16 el número de días que transcurre entre cada imagen MOD13Q1).

El rango relativo (RREL) se calculó dividiendo la amplitud observada entre los valores máximo y mínimo de NDVI registrados en el año por el valor de la integral NDVI-I.

Para el cálculo de la fecha de máximo valor de NDVI, se identificó, entre las 23 imágenes de la campaña, la imagen con el máximo NDVI. El número de imagen (1 a 23) se reemplazó por el día juliano correspondiente al primer día del período observado por la imagen. A su vez, el día juliano se reconvirtió al rango [-235 ; 130] correspondiendo -235 al 10/05/2001 y 130 al 09/05/2002 de manera que los valores obtenidos para la fecha máxima se correspondieran de menor a mayor con el rango de fechas que abarca la campaña considerada.

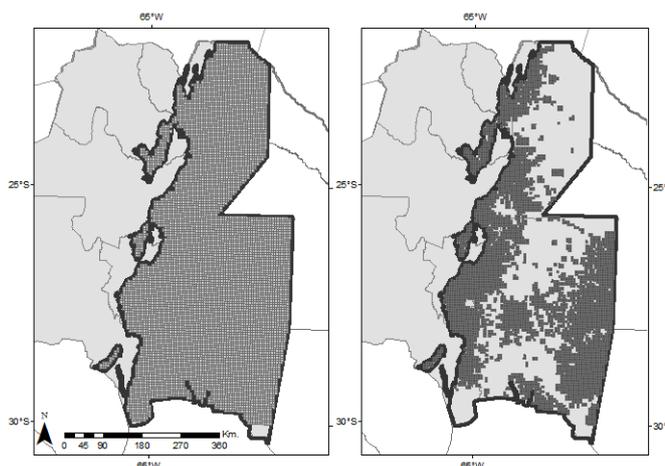
Los tres atributos fueron calculados a nivel de píxel y se asignó a cada celda de la grilla el promedio resultante de los píxeles incluidos en cada una de las celdas de 5.5 km de lado que componen la grilla de estudio (484 píxeles por celda).

El procesamiento de la información satelital se realizó utilizando el software ERDAS Imagine 9.1 de Leica GeoSystems Geospatial Imaging, LCC (<http://www.erdas.com>).

### 3. Selección de datos para el análisis

Con el objetivo de contar con un conjunto de celdas con condiciones ambientales comparables (principalmente en lo que se refiere a suelo y clima) y con distintas escalas de modificación del paisaje, se seleccionaron todas las celdas que tuvieran algún grado de transformación agropecuaria (desde un 1% hasta un 100% de superficie desmontada). En este conjunto se encuentran tanto las celdas que pertenecen a zonas agropecuarias consolidadas (celdas con alta agriculturización) como las que están siendo recientemente desmontadas (zonas de avance de frontera agropecuaria). Quedan excluidas de la base de datos todas las celdas de áreas naturales puras o sea sin desmontes para actividad agropecuaria.

Para ello de las 7407 celdas que componen la grilla de trabajo original (Fig. 5a), fueron seleccionadas aquellas que contienen áreas destinadas a uso agropecuario (3665 celdas). Se incluyeron dentro de esta categoría a celdas con un mínimo de 1% de su superficie "agropecuaria" (Fig. 5b).

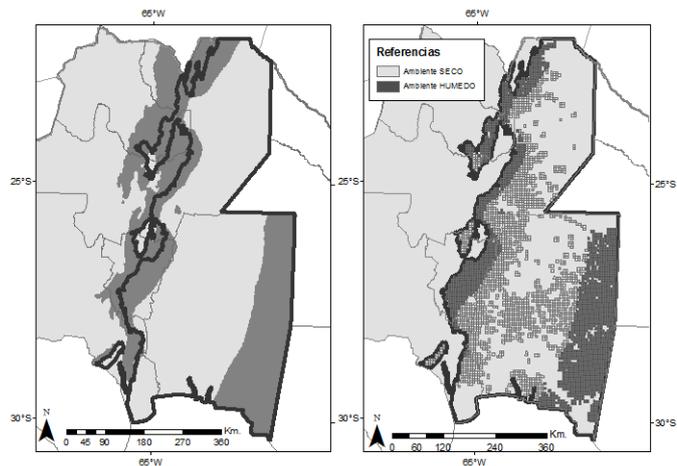


**Fig. 5 - (a) Grilla construida sobre el área de estudio. (b) Celdas de la grilla con superficie de actividad agropecuaria mayor o igual a 1% (en gris oscuro).**

#### 3.1. Definición de ambientes

Para identificar comportamientos o patrones diferenciales en relación al régimen de precipitaciones, se dividió el área de estudio en dos tipos de ambientes: "seco" y "húmedo" (Fig. 6a y 6b). Se tomó como criterio de división al valor de la mediana de la distribución de precipitaciones medias anuales (625 mm) de las 3665 celdas:

- ✓ Ambiente seco: precipitación media anual inferior a 625 mm (1828 celdas)
- ✓ Ambiente húmedo: precipitación media anual mayor a 625 mm (1837 celdas)

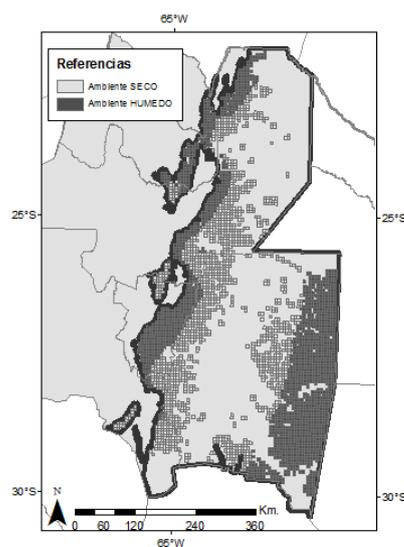


**Fig. 6 - (a) Precipitación media anual (PMA) del área de estudio (Bianchi y Yañez, 1993); en gris claro, zonas con PMA inferiores a 625 mm y en gris oscuro, zonas con PMA superiores a 625 mm. (b) Celdas con áreas destinadas a uso agropecuario categorizadas por ambiente (seco o húmedo).**

Para evitar incluir en los cálculos de los atributos de NDVI, valores extremos como los que presentan superficies cubiertas con agua, se excluyeron del universo de estudio las celdas que contienen lagunas (14 celdas en ambiente seco y 15 en ambiente húmedo).

Por otra parte se excluyeron 279 celdas correspondientes a zona bajo riego pertenecientes al Río Salí de Santiago del Estero para evitar distorsiones en el comportamiento del NDVI debido a la mayor disponibilidad de agua.

Considerando las distintas etapas de selección descritas más arriba, la base de datos para realizar el análisis quedó finalmente conformada por 3360 celdas con superficie agropecuaria superior a un 1%; 1538 de ellas de ambiente seco y 1822 de ambiente húmedo (Fig. 7).



**Fig. 7 - Distribución espacial de las 3360 celdas que componen el universo de estudio diferenciadas según el ambiente al cual pertenecen (seco en gris claro y húmedo en gris oscuro).**

### ***3.2. Referencia agroeconómica***

Considerando la localización espacial de las celdas previamente seleccionadas es posible identificar dos agrupamientos claramente diferenciados (ambos con desarrollo Norte-Sur y ocupando el Este y Oeste del área con potencial agropecuario). Estos dos agrupamientos de celdas, que denominaremos Este y Oeste, se corresponden con las zonas agroeconómicas homogéneas (ZAHs) “Chaco Subhúmedo” y “Umbral al Chaco” respectivamente, definidas por Bravo y colaboradores (1999). La primera de estas ZAHs presenta clima subtropical subhúmedo y es una vasta llanura con reciente expansión de la frontera agrícola. Los suelos son bien drenados y desarrollados y presentan en su totalidad aptitud agrícola-ganadera o ganadera-agrícola. En el “Umbral al Chaco”, en tanto, el clima se caracteriza por un régimen de lluvias estival influenciado por cuestiones orográficas y los suelos tienen aptitud para agricultura a secano con distintos grados de limitación.

Con el propósito de captar en el análisis los efectos sobre los atributos del NDVI que pudieran estar relacionados con las diferencias ambientales y productivas existentes entre ambos agrupamientos, se incorporaron al análisis variables de control (“dummies”) que categorizan las celdas de acuerdo al agrupamiento al cual pertenecen. Para un mayor detalle de las variables incorporadas, ver “Variables de control” en el Anexo A.

#### 4. Análisis estadístico

Para cada uno de los ambientes definidos (seco y húmedo) se dividieron las celdas en dos grupos separados de acuerdo al grado de transformación agropecuaria presente en cada una de ellas (variable P\_DESMON). En el primer grupo (NO\_MODIF o Q1) se incluyeron las celdas con los valores correspondientes al primer cuartil de la variable P\_DESMON (para ambiente seco, 388 celdas con valores menores a 3.97% y para ambiente húmedo, 455 celdas con valores menores a 17.60%).

El segundo grupo (MODIF o Q2-Q4) incluyó las celdas de los tres cuartiles superiores de P\_DESMON (n=1150 y n=1367 en cada uno de los ambientes).

Con los dos grupos definidos, se modelizaron los tres atributos del NDVI (NDVI-I, RREL y DMAX) en el grupo NO\_MODIF (Q1) por medio de regresiones individuales sobre variables ambientales del tipo climáticas (temperatura y precipitación), edáficas (porcentajes de órdenes de suelo y limitantes principales) y de control.

Luego, se estimaron los atributos del índice NDVI en el entorno MODIF (Q2-Q4) utilizando el modelo ajustado en el paso anterior y se analizaron las relaciones entre los valores observados y predichos para los tres atributos de NDVI. Por último, se estudió la magnitud de estas diferencias (en términos relativos) y su correlación con las variables de uso de la tierra

Las regresiones lineales múltiples realizadas para cada una de las variables independientes se efectuaron utilizando el software SPSS Statistics vs. 17.0.

Ver Anexo A para una descripción más detallada de los procedimientos llevados a cabo.

## 5. Resultados

### 5.1. Entornos no modificados: modelos estimados para los atributos del índice NDVI

En las Tablas 1 y 2 se presentan los modelos estimados en el grupo NO\_MODIF (Q1) para distintos ambientes y para los tres atributos del índice NDVI (NDVI-I, RREL y DMAX) empleando regresiones individuales sobre variables ambientales de tipo climáticas, edáficas y de control.

**Tabla 1 - Grupo NO\_MODIF (Q1). Ambiente seco. Modelos estimados.**

Atributo del índice NDVI	R <sup>2</sup>	Intercepto	Variable independiente	Coefficiente de pendiente	t-ratio	p-value
NDVI-I	0.444	6.941	PRECIP	0.168	8.556	2.94E-16
			TEMP	5.819	4.838	1.91E-06
			Molisoles	0.166	3.953	9.21E-05
			Entisoles	0.15	3.762	0.000195
			L2_S	-0.1	-2.985	0.003020
			L1_S	0.081	2.529	0.011844
			ZESTE	-3.57	-2.216	0.027285
			Alfisoles	-0.040	-0.919	0.358680
RREL	0.329	4.524	TEMP	-0.114	-7.026	9.92E-12
			PRECIP	-0.001	-4.191	3.46E-05
			ZESTE	-0.076	-3.53	0.000467
			L1_S_RREL	0.001	3.408	0.000725
			Entisoles	-0.001	-2.506	0.012629
			Molisoles	-0.001	-2.229	0.026400
			Alfisoles	-0.001	-1.868	0.062534
L2_S_RREL	0.000	-0.569	0.569693			
DMAX	0.233	14.363	ZESTE	-17.758	-7.454	6.38E-13
			L1_S_DMAX	0.111	2.619	0.009178
			L2_S_DMAX	-0.091	-1.734	0.083744
			Entisoles	0.066	1.069	0.285761
			Molisoles	0.055	0.910	0.363410
			PRECIP	0.020	0.764	0.445350
			Alfisoles	-0.027	-0.413	0.679844
TEMP	-0.116	-0.064	0.949005			

Siendo L1\_S = baja\_reten + drenaje + pend + susInund

L2\_S = erosHidrAc + No\_Agricol + pedreg + salin50cm + susErosHid

L1\_S\_RREL = baja\_reten + drenaje + erosHidrAc + No\_Agricol + pedreg + salin50cm + susErosHid

L2\_S\_RREL = pend + susInund

L1\_S\_DMAX = drenaje + erosHidrAc + pedreg + pend + salin50cm

L2\_S\_DMAX = baja\_reten + No\_Agricol + susErosHid + susInund

Nota: En el caso del atributo RREL, al generar el modelo, se consideraron solo aquellas celdas con valores del atributo RREL entre 0 y 2.25 (dejando fuera del análisis valores extremos). En ese caso, el grupo Q1 quedó conformado con 382 celdas.

En el ambiente seco, las variables climáticas y edáficas explican un 44% (Tabla 1) de la variabilidad espacial de la integral anual de NDVI (NDVI-I) para las celdas con menor proporción de desmonte (menos de 3.97%). El NDVI-I se incrementa con la temperatura, las precipitaciones, la existencia de molisoles y entisoles y presenta niveles más grandes en el agrupamiento espacial Oeste en relación con el Este. Las limitantes de suelo actúan significativamente sobre el NDVI-I (L1\_S incrementa y L2\_S disminuye el NDVI-I).

En el caso de RREL, el modelo explica el 33% de la variabilidad total (Tabla 1). La estacionalidad (RREL) disminuye con el incremento de los factores climáticos (temperatura y precipitaciones), los entisoles y molisoles y presenta niveles menores en el Este respecto del Oeste. En el caso de las limitantes, solo son significativas las que presentan contribuciones positivas.

Para DMAX, el porcentaje explicado por el modelo es aún más bajo: 23% (Tabla 1). DMAX tiene niveles más bajos en el agrupamiento Este comparado con el Oeste y aumenta con las limitantes de suelo (L1\_S\_DMAX). El resto de las variables no son significativas a los niveles usuales de probabilidad (5%).

**Tabla 2 - Grupo NO\_MODIF (Q1). Ambiente húmedo. Modelos estimados.**

Atributo del índice NDVI	R <sup>2</sup>	Intercepto	Variable independiente	Coefficiente de pendiente	t-ratio	p-value
NDVI-I	0.523	398.182	TEMP_ZESTE	35.499	8.413	5.52E-16
			ZESTE	-644.938	-6.834	2.74E-11
			Molisoles	0.24	5.735	1.81E-08
			PR_ZESTE	-0.146	-4.512	8.23E-06
			L1_H	0.122	3.582	0.000379
			TEMP	-7.661	-3.452	0.000610
			Alfisoles	-0.102	-2.36	0.018707
			L2_H	-0.077	-2.262	0.024180
			Entisoles	0.074	1.794	0.073493
			PRECIP	-0.020	-1.257	0.209414
RREL	0.285	-1.946	TEMP_ZESTE	-0.278	-4.34	1.77E-05
			ZESTE	6.124	4.307	2.04E-05
			PRECIP	0.001	4.286	2.23E-05
			TEMP	0.14	4.016	6.95E-05
			Entisoles	-0.002	-3.672	0.000270
			Molisoles	-0.002	-2.903	0.003880
			L1_H_RREL	0.001	1.886	0.059947
			PR_ZESTE	-0.001	-1.628	0.104234
			L2_H_RREL	-0.001	-1.598	0.110754
			Alfisoles	0.000	-0.437	0.662324
DMAX	0.243	127.329	ZESTE	-1077.225	-6.542	1.71E-10
			TEMP_ZESTE	45.125	6.121	2.08E-09
			Alfisoles	-0.343	-3.748	0.000202
			PR_ZESTE	0.185	3.28	0.001122
			L2_H_DMAX	-0.225	-3.241	0.001283
			Molisoles	-0.261	-3.053	0.002405

			Entisoles	-0.2	-2.744	0.006321
			L1_H_DMAX	0.126	2.626	0.008944
			PRECIP	-0.028	-1.033	0.302178
			TEMP	-2.449	-0.647	0.517973

Siendo  $L1\_H = \text{Alcalin50c} + \text{baja\_reten} + \text{drenaje} + \text{erosHidrAc} + \text{pedreg} + \text{pend} + \text{susInund} + \text{susErosHid}$

$L2\_H = \text{No\_Agricol} + \text{salin50cm}$

$L1\_H\_RREL = \text{Alcalin50c} + \text{baja\_reten} + \text{drenaje} + \text{erosHidrAc} + \text{No\_Agricol} + \text{pedreg} + \text{salin50cm} + \text{susInund} + \text{susErosHid}$

$L2\_H\_RREL = \text{pend}$

$L1\_H\_DMAX = \text{Alcalin50c} + \text{drenaje} + \text{erosHidrAc} + \text{salin50cm} + \text{susErosHid}$

$L2\_H\_DMAX = \text{baja\_reten} + \text{No\_Agricol} + \text{pedreg} + \text{pend} + \text{susInund}$

Nota: En el caso del atributo RREL, al generar el modelo, se consideraron solo aquellas celdas con valores del atributo RREL entre 0 y 2.25 (sin considerar valores extremos). En ese caso, el grupo Q1 quedó conformado con 446 celdas.

En el ambiente húmedo, las variables climáticas y edáficas explican un 52% (Tabla 2) de la variabilidad espacial de la integral anual de NDVI (NDVI-I) para las celdas poco agriculturizadas (menos de 17.60% de área desmontada). El NDVI-I se incrementa con los molisoles y disminuye con la presencia de alfisoles. Las limitantes de suelo actúan significativamente sobre el NDVI-I (L1\_H incrementa y L2\_H disminuye el NDVI-I). Las precipitaciones disminuyen levemente el NDVI-I (especialmente en el Oeste), mientras que la temperatura incrementa el NDVI-I en el Este, pero provoca una disminución del mismo en el Oeste.

En el caso de RREL, el modelo explica el 28% en tanto que para DMAX, el porcentaje explicado por el modelo es aún más bajo: 24% (Tabla 2). En el caso de RREL, disminuye con la temperatura en el Este mientras que se incrementa en el Oeste. Las precipitaciones no tienen influencia sobre este atributo en el Este, pero lo incrementan levemente en el Oeste. Además, el RREL disminuye con la presencia de entisoles y molisoles mientras que las limitantes de suelo y los alfisoles no son significativas.

Para DMAX, la temperatura y las precipitaciones aumentan la fecha máxima en el Este, pero no influyen significativamente en el Oeste. Los tres órdenes de suelo disminuyen el DMAX y las limitantes actúan significativamente (L1\_H\_DMAX en forma positiva y L2\_H\_DMAX en forma negativa). El resto de las variables no son significativas.

## 5.2. Extrapolación de los modelos estimados a los entornos modificados

Para cada uno de los ambientes se extrapolaron los modelos ajustados en Q1 para los atributos del índice NDVI a los datos del grupo MODIF (Q2-Q4), aplicando los coeficientes estimados (Tablas 1 y 2) a los valores de las variables independientes observados en Q2-Q4. Luego se analizaron los desvíos entre los valores efectivamente observados y aquellos extrapolados o estimados.

En la Figura 8 se muestra el ajuste entre los valores observados y estimados para cada uno de los atributos en los ambientes seco y húmedo para el entorno modificado Q2-Q4.

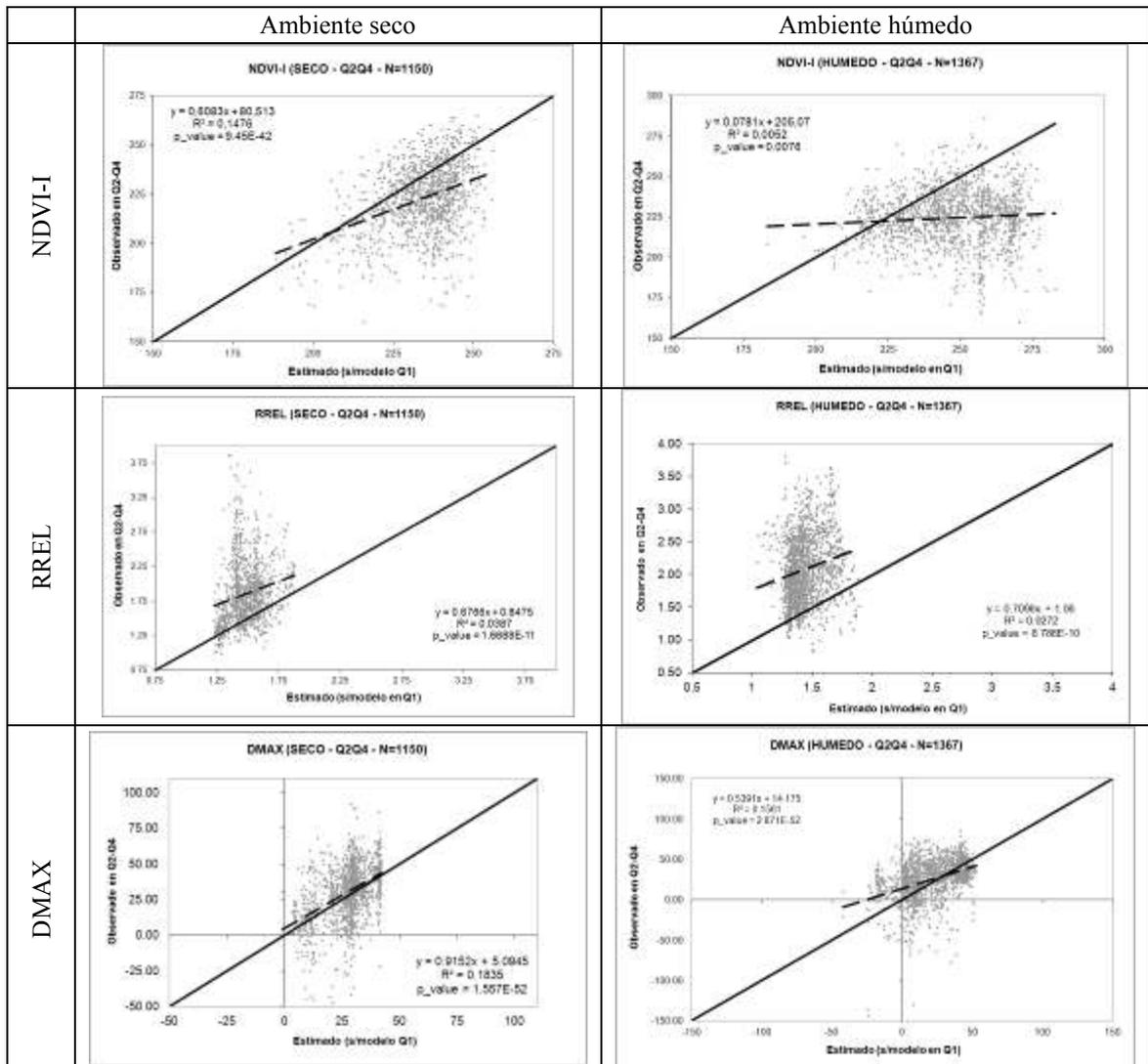


Fig. 8 - Valores estimados y observados de atributos de NDVI para celdas del grupo MODIF (Q2-Q4) en ambientes seco y húmedo.

La correlación entre los valores observados y estimados para todos los atributos es baja en términos de  $R^2$ . De acuerdo a esto se puede decir que ninguno de los modelos ajustados en Q1 (áreas no agriculturizadas) explican la mayor parte de la variabilidad observada del índice NDVI cuando se aplican a Q2-Q4 (entornos modificados). Esto queda ratificado al rechazar, a cualquier nivel de significación, la hipótesis nula (múltiple) que sostiene la igualdad del intercepto con 0 y de la pendiente con 1 en forma simultánea (los resultados se incluyen en el Anexo B).

De la inspección de las rectas de ajuste e identidad se puede evaluar el comportamiento de los modelos obtenidos en Q1 cuando son aplicados a los grupos Q2-Q4. Es así que para NDVI-I y para ambos ambientes, la mayoría de los puntos se encuentran debajo de la línea identidad, lo que indica que los valores observados son inferiores a los estimados con el modelo implicando ello una disminución de NDVI-I en ambientes agriculturizados.

En el caso de RREL, se presenta la situación inversa a lo observado en NDVI-I. Los valores estimados con el modelo son inferiores a los valores observados en Q2-Q4

siendo más marcada la situación para el ambiente húmedo. Esta situación indica que la agriculturización implica un aumento de la estacionalidad o del Rango Relativo.

Para DMAX la comparación entre valores estimados y observados no nos brinda elementos muy claros. En el ambiente húmedo se observa una subestimación por parte del modelo mientras que en el ambiente seco la nube de puntos está repartida de manera simétrica con respecto a la recta identidad y, por lo tanto, no tenemos evidencias claras del efecto del aumento de superficie agropecuaria sobre la fecha de máximo valor (DMAX).

### **5.3. Impacto del uso del suelo**

Interesa analizar el rol que juega el uso del suelo en las divergencias observadas en la Fig. 8. Para ello se considera información sobre superficie desmontada, tipo de cultivo y uso de suelo predominante para las celdas del grupo Q2-Q4 (con mayor modificación antropogénica). La misma se obtiene del mapa de cultivos y áreas desmontadas del NOA oportunamente citado.

#### **5.3.1. Superficie desmontada**

Para entender el impacto que tiene la superficie destinada a la actividad agropecuaria sobre la dinámica del NDVI, se exploró la relación entre los desvíos observados (residuos) y el porcentaje de superficie agropecuaria en las celdas del grupo MODIF (Q2-Q4). En la Figura 9 se muestra el ajuste para cada atributo del índice NDVI en los ambientes seco y húmedo.

Para la integral NDVI-I se observa que los desvíos relativos se incrementan, en valor absoluto, a medida que participan celdas con mayor porcentaje de superficie agropecuaria. Es decir, a mayor área transformada, mayor es la diferencia entre valores observados y estimados. El valor negativo de los residuos implica una pérdida de NDVI-I la que podría ser del orden de un 20% (Figura 9).

Con el rango relativo RREL ocurre lo contrario. Al incrementar la superficie desmontada o transformada para actividad agropecuaria, los desvíos relativos aumentan. Esto implica que la agriculturización incrementa la estacionalidad. La mayor pendiente en ambientes secos nos indicaría que este efecto es más notable que en ambientes húmedos.

En el caso de la fecha máxima DMAX, la relación entre los desvíos nominales y el porcentaje de desmonte no es significativa en ninguno de los dos ambientes.

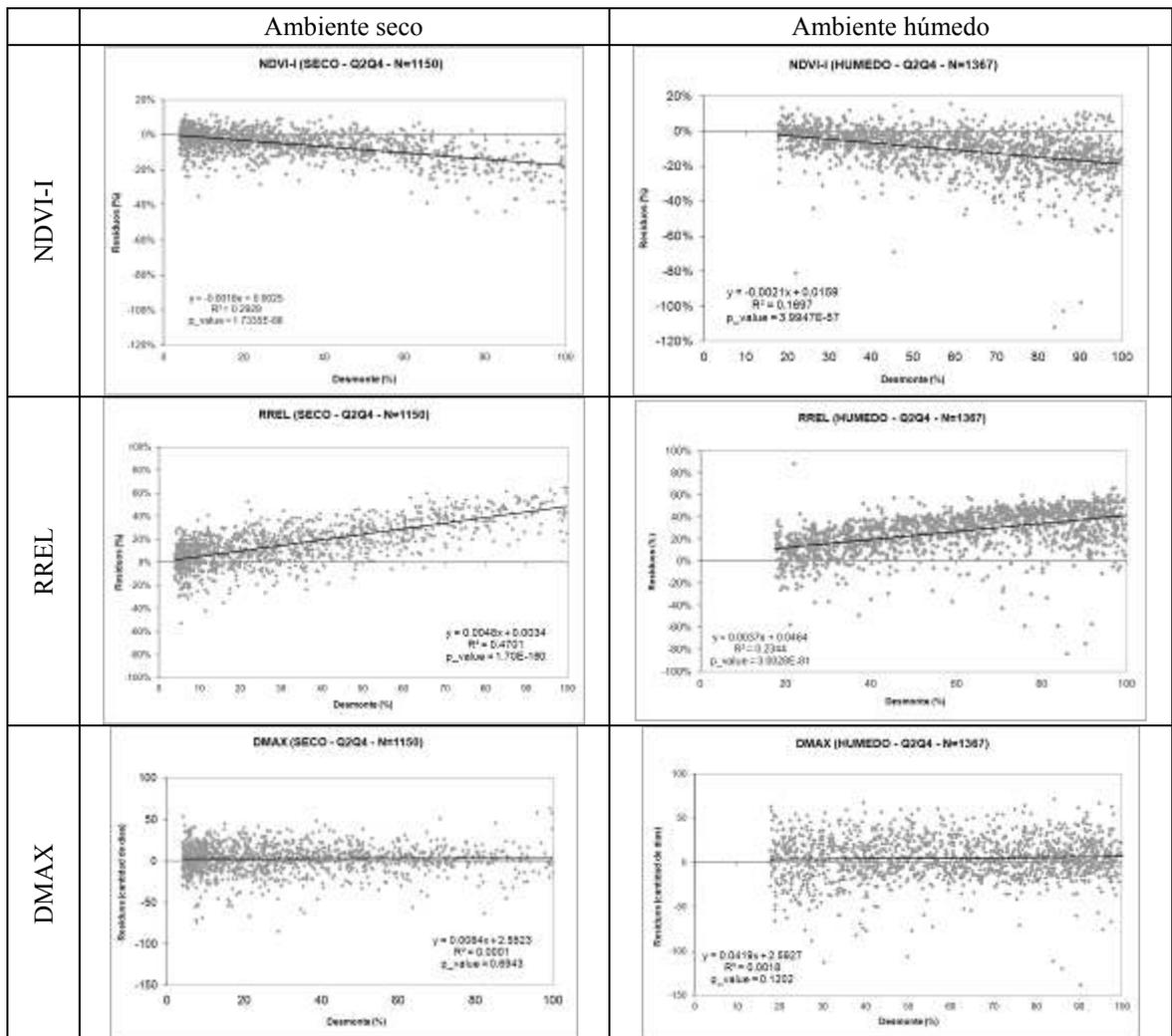


Fig. 9 - Relación entre las diferencias de valores observados y estimados, y la superficie destinada a la actividad agropecuaria (porcentaje de desmonte).

### 5.3.2. Tipos de cultivos

Se investiga la relación entre los desvíos absolutos y la proporción de los diferentes tipos de cultivo que se realizaron dentro de las celdas del grupo MODIF (Q2-Q4). Tal como se observa en la Tabla 3, los cultivos o combinaciones predominantes son: soja, trigo-soja, caña, poroto, maíz, trigo-maíz y trigo, representando el 97.25% de la superficie bajo cultivo.

**Tabla 3 - Superficies ocupadas según combinación de cultivos o secuencia de uso del suelo. Campaña 2001-02. Fuente: elaboración propia en base a mapa de cultivos y áreas desmontadas del NOA (PRORENOA, INTA Salta)**

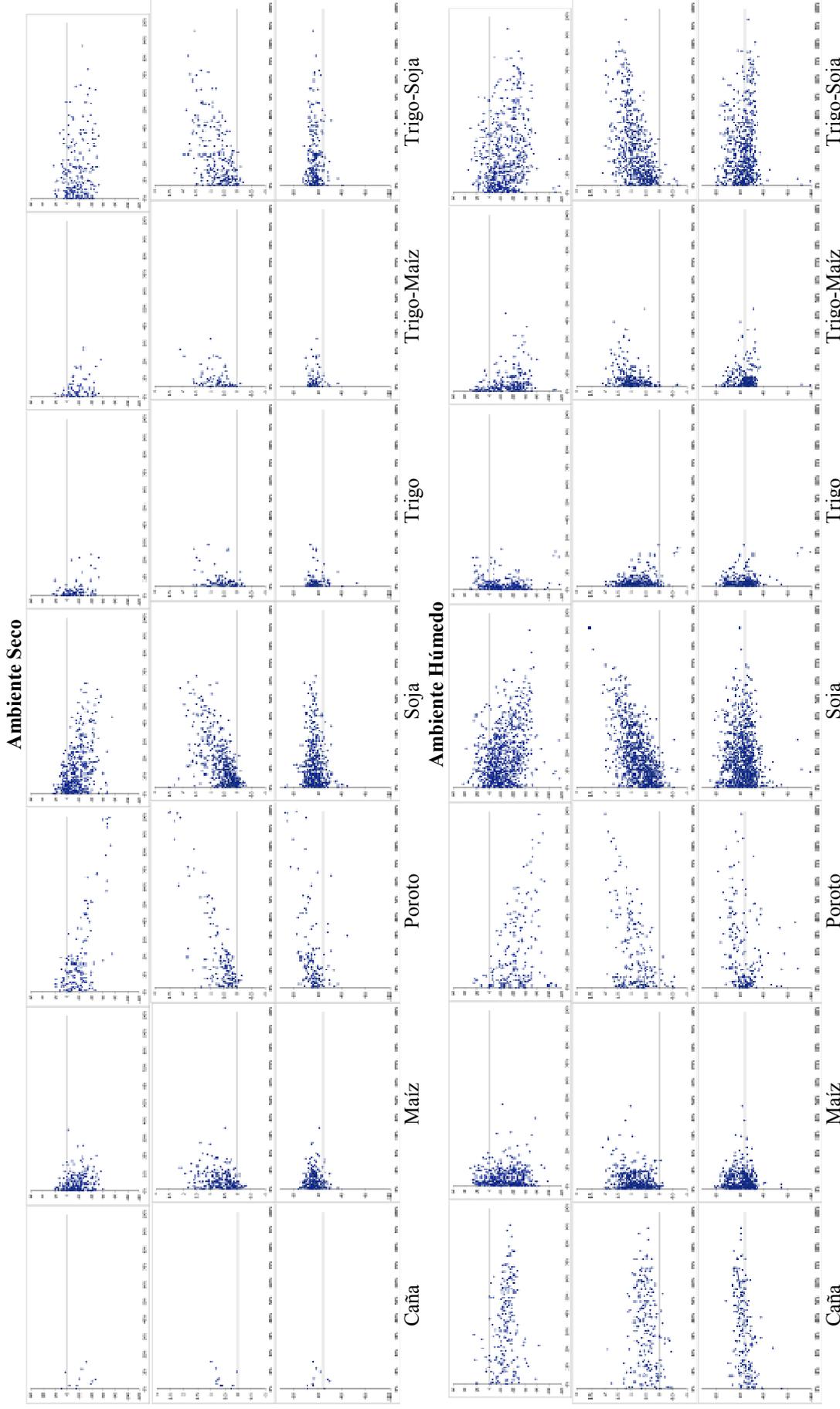
Tipo de cultivo			Hectáreas	%
Cosecha Fina 2001	Cosecha Gruesa 2002	Industriales		
	Soja		690,601	37.95%
Trigo	Soja		474,697	26.09%
		Caña	214,383	11.78%
	Poroto		204,706	11.25%
	Maíz		99,214	5.45%
Trigo	Maíz		46,596	2.56%
Trigo			39,461	2.17%
Cártamo	Soja		21,854	1.20%
	Algodón		15,498	0.85%
	Maní		5,822	0.32%
Trigo	Algodón		2,119	0.12%
Trigo	Poroto		2,048	0.11%
Cártamo	Maíz		1,293	0.07%
Cártamo			1,075	0.06%
Otros			289	0.02%
Total superficie por tipo de cultivo			1,819,655	100%
Superficie total desmontada sin cultivo al 2002			2,198,147	
Total superficie desmontada al 2002			4,017,802	

Las Figuras 10.a y 10.b muestran para ambientes seco y húmedo, las relaciones entre los desvíos observados y el porcentaje de ocupación de cada uno de los cultivos o de las combinaciones más relevantes.

Se puede notar que los patrones observados para los desvíos no difieren según sea el ambiente considerado cuando se los compara en relación a un cultivo o combinación en particular.

Con respecto a la comparación entre cultivos, se puede destacar la estabilidad que exhiben – en términos de desvíos de NDVI-I - el cultivo de caña y la combinación trigo-soja en ambientes húmedos, contrastando con las pendientes negativas que muestra el resto de los cultivos.

La misma observación es válida para RREL en el cultivo de caña en ambientes húmedos, con la salvedad que el contraste se da ahora en comparación a las pendientes positivas que presentan el resto de los cultivos.



**Fig. 10 - (a) Ambiente seco: ajuste entre desvíos y porcentajes de tipo de cultivo por celda para NDVI-I (arriba), RREL (centro) y DMAX (abajo) (b) Ambiente húmedo: ajuste entre desvíos y porcentajes de tipo de cultivo por celda para NDVI-I (arriba), RREL (centro) y DMAX (abajo)**

### 5.3.3. *Uso de suelo predominante*

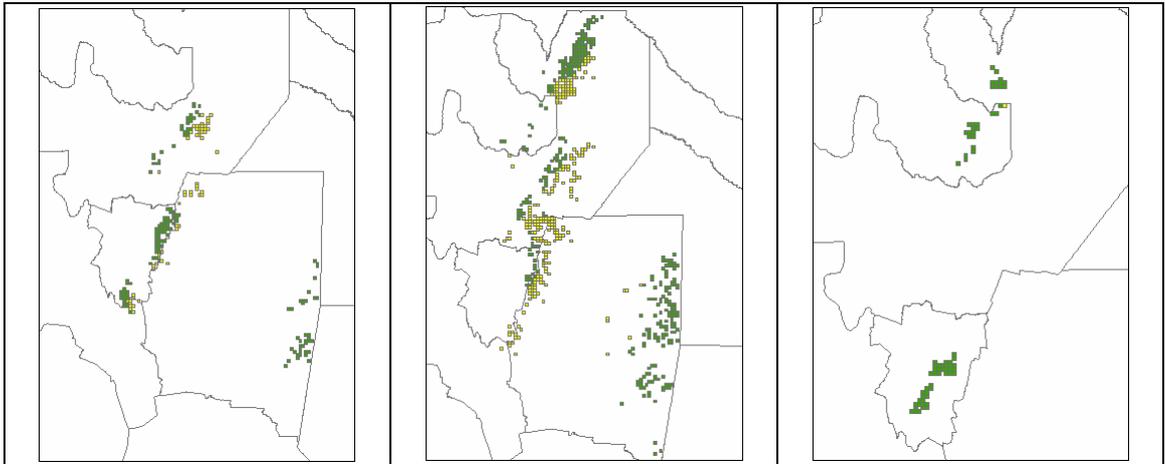
Se analizaron celdas que presentan usos agrícolas predominantes, entendiéndose como tales aquellas situaciones donde al menos el 50% del área agropecuaria de la celda está dedicada a usos agropecuarios más frecuentes: a) doble cultivo (trigo-soja principalmente), b) cultivo único de cosecha gruesa (soja, maíz o poroto) o c) caña de azúcar.

En base a estos tres usos de suelo se conformaron -para cada ambiente- tres conjuntos de celdas para ser analizadas por separado (Tabla 4).

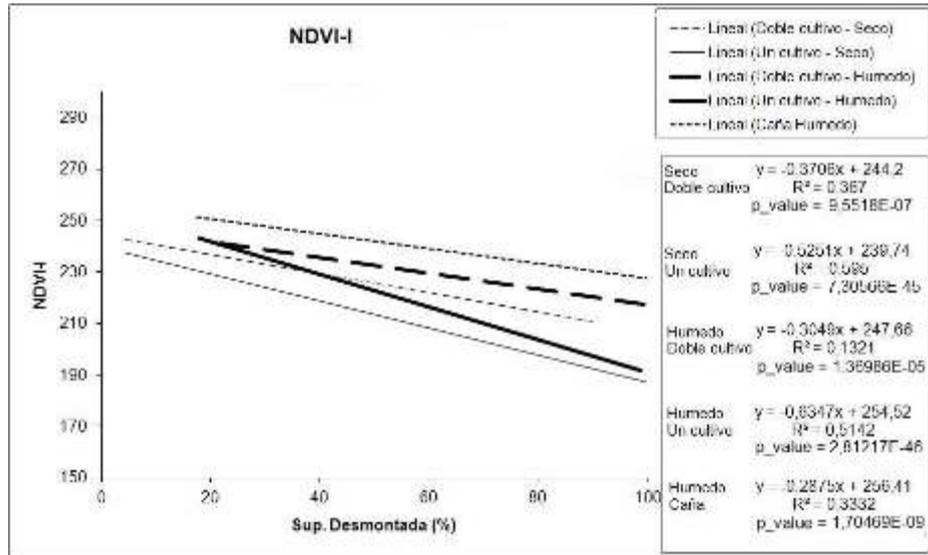
**Tabla 4 - Cantidad de celdas seleccionadas por uso de suelo predominante y ambiente (seco o húmedo)**

Uso predominante de suelo	Total	Ambiente	
		Seco	Húmedo
Doble cultivo	191	55	136
Cultivos cosecha gruesa	506	221	285
Caña de azúcar	92	-	92

La disposición geográfica se muestra en las Figuras 11.a, 11.b y 11.c, en tanto que las Figuras 12, 13 y 14 muestran los ajustes obtenidos para los atributos del índice NDVI según su relación con la superficie desmontada en cada celda.

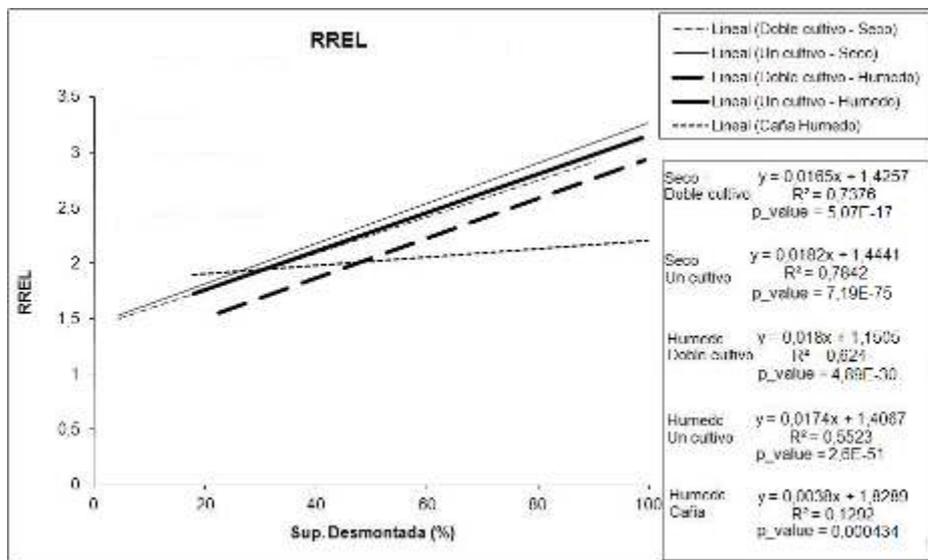


**Fig. 11 - (a) celdas con predominancia de doble cultivo. (b) celdas con predominancia de un solo cultivo (cosecha gruesa). (c) celdas con predominancia de cultivo de caña de azúcar. (Las celdas en ambiente seco en color claro y en ambiente húmedo en color más oscuro).**



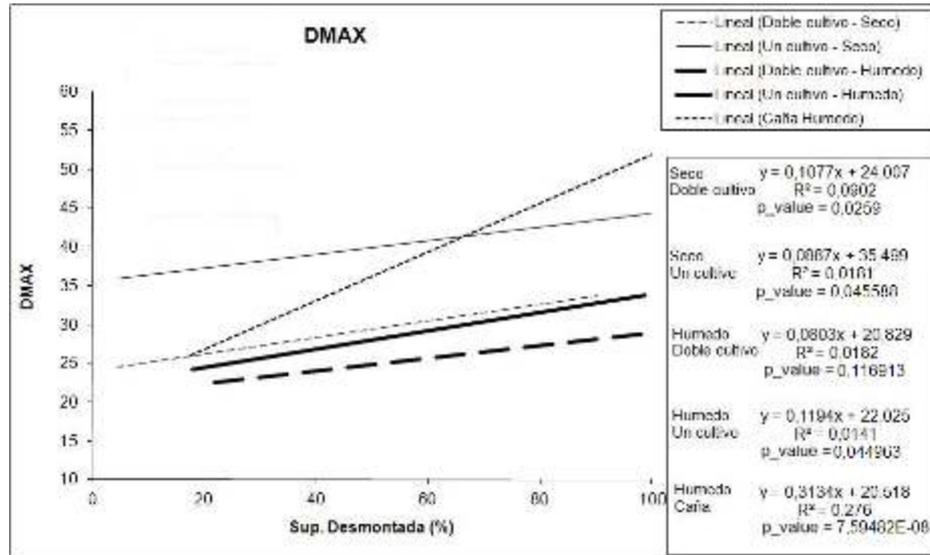
**Fig. 12 - Relación entre atributo NDVI-I y superficie desmontada. Subconjuntos de celdas de acuerdo a la predominancia de uso de suelo y al ambiente.**

De acuerdo a lo que se observa en la Figura 12, para los 3 usos de suelo se percibe una disminución del NDVI-I a medida que aumenta el porcentaje de superficie desmontada. La disminución es más pronunciada para el caso de un único cultivo (trazo continuo) y, en especial, cuando ese único cultivo se da en ambiente húmedo (trazo continuo oscuro).



**Fig. 13 - Relación entre atributo RREL y superficie desmontada. Subconjuntos de celdas de acuerdo a la predominancia de uso de suelo y al ambiente.**

En la Figura 13 se observa un aumento de la estacionalidad (atributo RREL) siendo más marcado en los casos de un cultivo y de doble cultivo en relación a la caña de azúcar. No se observan gráficamente diferencias evidentes que puedan atribuirse al ambiente en el cual se desarrollan los cultivos.



**Fig. 14 - Relación entre atributo DMAX y superficie desmontada. Subconjuntos de celdas de acuerdo a la predominancia de uso de suelo y al ambiente.**

El reemplazo de cobertura natural por cultivo ocasiona en todos los casos una demora en el momento en que se presenta el valor máximo del NDVI. Este atraso es mucho más marcado en el caso de la caña de azúcar. No se observan diferencias evidentes que puedan atribuirse a los diferentes ambientes.

## 6. Conclusiones

Para las áreas donde la vegetación natural no ha sido modificada o lo ha sido ligeramente (áreas no agriculturizadas), se demostró la existencia de un conjunto estable de variables, básicamente vinculadas con la dimensión climática y edáfica, que controlan los cambios observados en los atributos derivados del índice NDVI. Más allá de esto, para los tres atributos de NDVI y en ambos ambientes (seco y húmedo), persiste en la variabilidad observada un porcentaje importante que no es explicado por las variables consideradas. Esto contrasta fuertemente con los resultados encontrados por Guerschman y colaboradores. Estas diferencias podrían atribuirse a la alta densidad de vegetación leñosa (bosques y arbustales) en la región de estudio.

En ambiente seco, la temperatura, precipitación y la presencia de molisoles son las variables ambientales con mayor influencia sobre la integral de NDVI. En ambiente húmedo, las variables más influyentes son la temperatura, la presencia de molisoles y alfisoles y las limitantes de suelos. Con respecto a la temperatura, su influencia es diferente según el agrupamiento que sea considerado: aumenta los valores de la integral en el Este, pero los disminuye en el Oeste.

Con respecto a RREL, en ambiente seco las variables ambientales con mayor peso son la temperatura, precipitación y el agrupamiento considerado (Este u Oeste), mientras que en el ambiente húmedo son la temperatura, las precipitaciones y la presencia de entisoles y molisoles. El cambio de sentido en la influencia en función al agrupamiento se da en este caso para las precipitaciones.

Por su parte, en ambiente seco influyen sobre DMAX el agrupamiento y las limitantes de suelo mientras que en ambiente húmedo las variables más relevantes son la temperatura, la presencia de alfisoles y las precipitaciones. Aquí el agrupamiento invierte la influencia tanto para las precipitaciones como para la temperatura.

La magnitud de los cambios observados en la absorción de radiación y la estacionalidad están vinculados a la proporción del paisaje agriculturizado y no presentan diferencias entre los ambientes analizados. Por un lado, se observa una disminución de la absorción de radiación. Por el otro, y coincidentemente con los datos obtenidos por Guerschman et al. (2004) para la región pampeana y con Volante et al. (2011) para la región chaqueña, el efecto más relevante de la agriculturización del paisaje sobre la dinámica del carbono es el aumento significativo de la estacionalidad evidenciado por un aumento del RREL. Por último, con respecto a la fecha de máximo NDVI no surgen evidencias claras acerca de la influencia de la agriculturización sobre la misma.

La proporción en el paisaje de diferentes estrategias de secuencias y tipos de cultivos tienen impactos diferenciales sobre la absorción de radiación y la dinámica estacional del NDVI.

El cultivo único de verano (soja, maíz o poroto) es el de mayor impacto sobre el NDVI-I comparado con otras estrategias de manejo como el doble cultivo o los cultivos de ciclo plurianual (caña de azúcar).

En cuanto a los cambios sobre la estacionalidad, el cultivo de la caña de azúcar es el que menos impacto tiene en el rango relativo, pero es el que más influye en el cambio de fecha de los picos de absorción.

## 7. Bibliografía

Asrar, G., R. Myneni, and B.J. Choudhury. 1992. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: A modeling study. *Remote Sens. Environ.* 41:85-103.

Bianchi, A.R., y C.E. Yáñez. 1992. Las precipitaciones en el Noroeste Argentino. INTA, EEA SALTA, 2ª ed. Publicación que contiene la información pluviométrica mensual para 450 localidades del Noroeste Argentino.

Bravo, G. Regiones AgroEconómicas del Noroeste Argentino. INTA.

Di Bella, C.M., J.M. Paruelo, J.E. Becerra, C. Bacour, and F. Baret. 2004. Experimental and simulated evidences of the effect of senescent biomass on the estimation of fPAR from NDVI measurements on grass canopies. *International Journal of Remote Sensing* 25:5415–5427.

Boyd, J., and S. Banzhaf. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63(2-3):616-626.

FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations], 2009. State of the World's Forests 2009. FAO, Rome, Italy, 168 pp.

Fisher, B., R.K. Turner, and P. Morling. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics* 68:643-653.

Guerschman, J.P., J.M. Paruelo, and I.C. Burke. 2003. Land Use Impacts on the Normalized Difference Vegetation in Temperate Argentina. *Ecological Applications*, 13(3), 2003, pp. 616-628.

Holben B. 1986. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. *Int J Remote Sens* 7:1417-34.

INDEC [Instituto Nacional de Estadística y Censos]. 2002. Censo Nacional Agropecuario 2002. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Buenos Aires, Argentina.

INTA. 2002. Proyecto de Relevamiento de Cultivos del NOA. PRO.RE.NOA: Monitoreo de cultivos del Noroeste Argentino a partir de sensores remotos. Campaña Agrícola 2001-2002. Cultivos Extensivos de Verano.

INTA. 2002. Proyecto de Relevamiento de Cultivos del NOA. PRO.RE.NOA: Monitoreo de cultivos del Noroeste Argentino a partir de sensores remotos. Campaña Agrícola 2002. Cultivos Extensivos de Invierno.

INTA. Suelos de la República Argentina. SAGyP - INTA - Proyecto PNUD ARG/85/019. Con la participación del Instituto de Suelos y EEAs del INTA. Versión Digital Corregida, Revisada y Aumentada (Versión 1.0): G. Cruzate, L. Gomez, M. J. Pizarro, P. Mercuri, S. Banchemo.

- Jobbágy, E.G., O.E. Sala, and J.M. Paruelo. 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology* 83:307–319.
- Kicklighter, D.W., et al. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): comparison of NPP to climate and the normalized difference vegetation index. *Global Change Biology* 5:16–24.
- Monteith, J.L.. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9:747-766.
- Monteith, J.L.. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosoph. Trans. R Soc. Lond.* 281:277-294.
- Myneni, R.B., R.R. Nemani, S.W. Running. 1997b. Estimation of global LAI and FPAR from radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35:1380-1393.
- Paruelo, J.M., H.E. Epstein, W.K. Lauenroth, and I.C. Burke. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* 78:953–958.
- Paruelo, J.M., and W.K. Lauenroth. 1998. Interannual variability of the NDVI curves and their climatic controls in North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography* 25:721–733.
- Paruelo, J.M., E.G. Jobbágy, and O.E. Sala. 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems* 4:683–698.
- Paruelo, J.M., M.F. Garbulsky, J.P. Guerschman, and E.G. Jobbágy. 2004a. Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. *Int. J. Remote Sensing* 14:2793-2806.
- Paruelo, J.M., J.P. Guerschman, G. Piñeiro, E.G. Jobbágy, S.R. Verón, G. Baldi, y S. Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*. Vol. X N° 2 pág. 47 - 61
- Paruelo, J.M., S.R. Verón, J.N. Volante, L. Seghezzo, M. Vallejos, S. Aguiar, L. Amdan, P. Baldassini, L. Ciuffoli, N. Huykman, B. Davanzo, E. González, J. Landesmann, and D. Picardi. 2011. Elementos conceptuales y metodológicos para la Evaluación de Impactos Ambientales Acumulativos (EIAAc) en bosques subtropicales. El caso del este de Salta, Argentina. *Ecología Austral* 21:163-178.
- Prince, S.D.. 1991. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 12:1313–1330.
- Ruimy, A., et al. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. *Global Change Biology* 5:56–64.

Sellers, P.J.. 1987. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sens. Environ.* 21: 143-183.

Sellers, P.J., J.A. Berry, G.J. Collatz, C.B. Field, and F.G. Hall. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment* 42:187–216.

Tucker, C.J., C.L. Vanpraet, M.J. Sharman, and G. Van Ittersum. 1985b. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980–1984. *Remote Sensing of the Environment* 17:233–249.

Volante, J.N., D. Alcaraz-Segura, M.J. Mosciaro, E.F. Viglizzo, J.M. Paruelo. 2011. Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agriculture, Ecosystem & Environment.*, doi:10.1016/j.agee.

## 8. Anexo A - Metodología para el análisis

### 8.1. Descripción general

Para cada uno de los ambientes (seco y húmedo) se clasificaron las celdas de manera tal de reflejar la intensidad del uso agrícola a la que están sometidas. El objetivo es poder diferenciar y comparar los procesos que se desarrollan en áreas “desmontadas” y áreas “no desmontadas” en relación al nivel y dinámica de la absorción de energía de los ecosistemas existentes en esas áreas.

Para ello, se conformaron dos grupos de celdas según la proporción de superficie bajo uso agrícola presente en cada celda. La distribución de P\_DESMON (variable que refleja la proporción de área desmontada) guió tal clasificación.

El primer grupo (NO\_MODIF o Q1) incluyó las celdas, contiguas o no, del primer cuartil de P\_DESMON y lo integran las celdas menos modificadas por la actividad agrícola. Este grupo trata de representar los ambientes naturales o poco intervenidos, en donde interesa modelizar el funcionamiento ecosistémico relacionado con la captura de energía.

El segundo grupo (MODIF o Q2-Q4) incluyó las celdas de los tres cuartiles superiores de P\_DESMON, representando áreas con mayor modificación antropogénica.

**Ambiente seco:** para distinguir entre los grupos que representan los ambientes naturales y modificados respectivamente, se utilizó como valor de corte el nivel 3.97% de desmonte (percentil 25 de P\_DESMON). Consecuentemente, Q1 está integrado por 388 celdas y Q2-Q4 por 1150 celdas (Figura 15).

Estadísticos (P\_DESMON)

N	Válidos	1538
	Perdidos	0
	Media	24.5267
	Mínimo	.03
	Máximo	99.93
Percentiles	25	3.9700
	50	14.6400
	75	38.7500

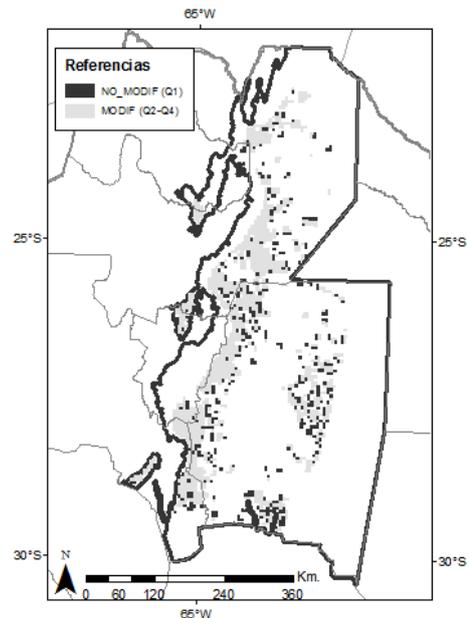
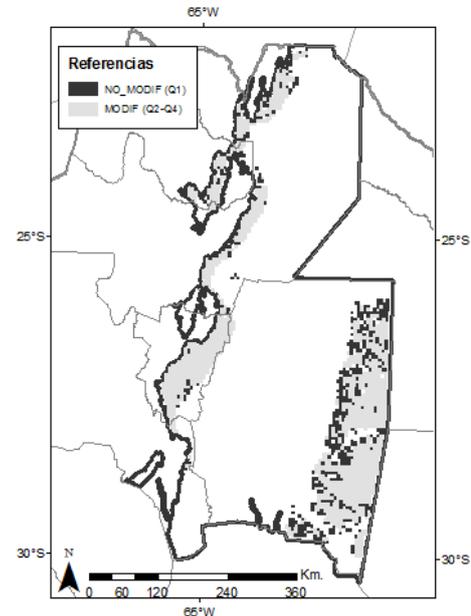


Fig. 15 - Distribución espacial de los grupos NO\_MODIF (Q1) y MODIF (Q2-Q4). Ambiente seco

**Ambiente húmedo:** el valor de corte en este caso fue 17.60% de desmonte (percentil 25 de P\_DESMON). De acuerdo a esto, Q1 contiene 455 celdas y Q2-Q4, 1367 celdas (Figura 16).

Estadísticos (P\_DESMON)

N	Válidos	1822
	Perdidos	0
Media		46.6118
Mínimo		.03
Máximo		99.83
Percentiles	<b>25</b>	<b>17.6025</b>
	50	45.4350
	75	75.4800



**Fig. 16 - Distribución espacial de los grupos NO\_MODIF (Q1) y MODIF (Q2-Q4). Ambiente húmedo**

La comparación de los procesos que se desarrollan en los dos grupos se llevó a cabo en forma secuencial:

1. Primero se modelizaron los tres atributos del NDVI (NDVI-I, RREL y DMAX) en el grupo NO\_MODIF (Q1) por medio de regresiones individuales sobre variables ambientales del tipo climáticas (temperatura y precipitación), edáficas (porcentajes de órdenes de suelo y limitantes principales) y de control.
2. La segunda etapa consistió en estimar los atributos del índice NDVI en el entorno MODIF (Q2-Q4) utilizando el modelo ajustado en el paso 1 para NO\_MODIF (Q1) y calculando los desvíos que surgen de la comparación entre valores observados y estimados. ( $DESVIO = 100 * (\text{observado} - \text{estimado}) / \text{observado}$ ).
3. Finalmente, se regresionaron los valores observados en MODIF contra los estimados en la segunda etapa para comparar el ajuste lineal obtenido con la recta de 45° (recta IDENTIDAD). La comparación formal se realizó por medio de una prueba de hipótesis múltiple para una hipótesis nula que sostiene la igualdad del intercepto con 0 y de la pendiente con 1 en forma simultánea.
4. Adicionalmente, se evaluó la relación entre los atributos de NDVI y los diferentes usos de suelo presentes en el grupo con mayor modificación antropogénica.

## **8.2. Modelización de los atributos de NDVI en ambientes naturales o poco intervenidos**

La modelización individual de cada uno de los atributos del índice NDVI en el grupo NO\_MODIF (Q1) se llevó a cabo –en cada uno de los ambientes- en 2 pasos:

A. El primer paso consistió en realizar las regresiones individuales con las siguientes variables independientes:

Ambiente seco

- ✓ climáticas: temperatura promedio (TEMP) y precipitación media (PRECIP)
- ✓ edáficas:
  - órdenes principales de suelo: Alfisoles, Entisoles y Molisoles (Aridisoles e Inceptisoles no se consideraron porque presentan mayoría de valores cero (0) en Q1)
  - las particularidades (roca, salinas, misceláneas, etc.) no se consideraron porque presentan mayoría de valores cero (0) en Q1.
  - de las limitantes se consideraron todas con excepción de “climáticas” por ser complemento de las demás y alcalinidad (“Alcalin”) y baja permeabilidad (“baja\_perm”) por contener todos valores cero (0).
- ✓ variable de control ZESTE.

Ambiente húmedo

- ✓ climáticas: temperatura promedio (TEMP) y precipitaciones medias (PRECIP)
- ✓ edáficas:
  - órdenes principales de suelo: Alfisoles, Entisoles y Molisoles (Aridisoles e Inceptisoles no se consideraron porque presentan mayoría de valores cero (0) en Q1)
  - las particularidades (roca, salinas, misceláneas, etc.) no se consideraron porque presentan mayoría de valores cero (0) en Q1.
  - de las limitantes se consideraron todas con excepción de “climáticas” por ser complemento de las demás y baja permeabilidad (“baja\_perm”) por contener todos valores cero (0).
- ✓ variables de control ZESTE, PR\_ZESTE y TEMP\_ZESTE

B. En base al resultado del primer paso, se generaron dos nuevas variables a partir de las limitantes del suelo:

L1: suma de limitantes con coeficientes positivos en el modelo original

L2: suma de limitantes con coeficientes negativos en el modelo original

Luego, se volvieron a realizar las regresiones individuales incluyendo estas variables en reemplazo de las limitantes consideradas en el punto A.

Los modelos finalmente estimados contienen entonces un número menor de variables independientes sin que se observe pérdida significativa de información.

### 8.3. *Variables de control*

Considerando la localización espacial de las celdas seleccionadas es posible identificar dos agrupamientos de celdas claramente diferenciados (ambos con desarrollo Norte-Sur

y ocupando el este y el oeste del área con potencial agropecuario). Estos dos agrupamientos de celdas, que denominamos Este y Oeste, se corresponden respectivamente con las zonas agroeconómicas homogéneas (ZAHs) “Chaco Subhúmedo” y “Umbral al Chaco” definidas por Bravo y colaboradores (1999).

A efectos de captar en el análisis llevado a cabo los efectos sobre los atributos del NDVI que pudieran estar relacionados con las diferencias ambientales y productivas existentes entre ambas ZAHs, se incorporaron al análisis las siguientes variables de control (“dummies”) relacionadas con el agrupamiento espacial al cual pertenece cada celda.

**Variable ZESTE**

Identifica el agrupamiento espacial al cual pertenece la celda. Asume valor “1” en las celdas del Este (correspondiendo aproximadamente a la ZAH “Chaco Subhúmedo”) y valor “0” (categoría base) en las celdas del Oeste (ZAH “Umbral al Chaco”).

**Variables PR\_ZESTE y TEMP\_ZESTE**

Dada las diferencias climáticas existentes entre las ZAHs antes descriptas, se construyeron dos variables de control adicionales a efectos de captar los comportamientos vinculados a factores climáticos que pudieran presentarse de manera diferenciada en cada uno de los agrupamientos espaciales:

PR\_ZESTE: producto entre las precipitaciones medias anuales (PRECIP) y ZESTE

TEMP\_ZESTE: producto entre las temperaturas promedio (TEMP) y ZESTE

**8.4. Interpretación de los modelos estimados**

Para comprender cómo se comportan los modelos estimados, especialmente respecto a las variables de control incorporadas, se utilizarán como ejemplo los modelos para NDVI-I en los ambientes seco y húmedo.

El modelo estimado para cada uno de los ambientes se puede interpretar como dos modelos distintos: el primero para las celdas del agrupamiento espacial Este (asumiendo el valor de ZESTE en 1) y el segundo para las del Oeste (ZESTE = 0). (Tabla 5 para ambiente Húmedo y Tabla 6 para ambiente Seco)

**Tabla 5 - Modelo estimado para NDVI-I. Ambiente Húmedo**

Variable independiente	Coefficiente de pendiente	Coefficiente de pendiente - ESTE	Coefficiente de pendiente - OESTE
(Constante)	398.1822	-246.7560	398.1822
PRECIP	-0.0197	-0.1661	-0.0197
TEMP	-7.6615	27.8377	-7.6615
Alfisoles	-0.1018	-0.1018	-0.1018
Entisoles	0.0743	0.0743	0.0743
Molisoles	0.2397	0.2397	0.2397
L1_H	0.1221	0.1221	0.1221
L2_H	-0.0774	-0.0774	-0.0774
ZESTE	-644.9382		
PR_ZESTE	-0.1464		
TEMP_ZESTE	35.4992		

En este caso, las variables referidas a los órdenes de suelo se comportan de manera similar en el Este y el Oeste. Los coeficientes de pendiente son iguales para ambos casos.

Por el contrario, al presentar coeficientes de pendientes distintos, las variables climáticas actúan de manera diferenciada según la zona. Así, las precipitaciones (PRECIP) se relacionan negativamente con el NDVI-I en ambos casos, pero tienen mayor impacto en el Este que en el Oeste (coeficiente -0.1661 contra -0.0197). La temperatura promedio (TEMP) actúa de manera positiva en el Este (coeficiente 27.8377) y negativamente en el Oeste (-7.6615).

**Tabla 6 - Modelo estimado para NDVI-I. Ambiente Seco**

Variable independiente	Coefficiente de pendiente	Coefficiente de pendiente - ESTE	Coefficiente de pendiente - OESTE
(Constante)	6.9411	3.3707	6.9411
PRECIP	0.1684	0.1684	0.1684
TEMP	5.8194	5.8194	5.8194
Alfisoles	-0.0400	-0.0400	-0.0400
Entisoles	0.1497	0.1497	0.1497
Molisoles	0.1656	0.1656	0.1656
L1_S	0.0809	0.0809	0.0809
L2_S	-0.0997	-0.0997	-0.0997
ZESTE	-3.5704		

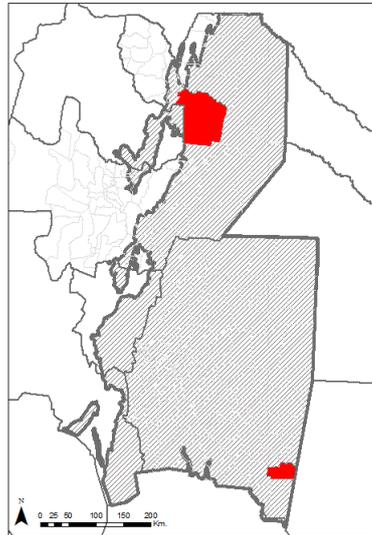
En el caso del ambiente Seco, todas las variables se comportan de manera similar en el Este y el Oeste. Los coeficientes de pendiente son iguales para ambos casos.

Para visualizar el grado de influencia de las variables independientes en cada una de las zonas (Este y Oeste), y tomando como ejemplo el modelo estimado para el ambiente húmedo

- se estimó el valor del NDVI-I asignando a las variables independientes valores próximos a sus promedios.
- se reestimó el valor del NDVI-I suponiendo, cada vez, el aumento de una variable independiente y manteniendo el resto de los valores constantes.
- Se calculó la diferencia entre el valor de NDVI-I promedio y el valor modificado.

Se muestran los resultados obtenidos en las tablas 7 y 8.

Los promedios de las variables independientes utilizados corresponden a los promedios de las celdas “no modificadas” en las fracciones 86-007-03 en el Este y 66-126-06 en el Oeste (Figura 17).



**Fig. 17 - Ubicación de las fracciones consideradas para el cálculo de los valores promedios**

**Tabla 7 - Estimaciones NDVI-I – Ambiente Húmedo – Agrupamiento ESTE**

	Aumentos aplicados	PRECIP 10 mm	TEMP 0.2 °C	Alfisoles 6%	Entisoles 5%	Molisoles 30%	L1_H 35%	L2_H 8%
Variables independientes	Valores promedios	Valores modificados sobre los promedios						
PRECIP	660	670	660	660	660	660	660	660
TEMP	20.6	20.6	20.8	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
Alfisoles	17	17	17	23	17	17	17	17
Entisoles	15	15	15	15	20	15	15	15
Molisoles	60	60	60	60	60	90	60	60
L1_H	42	42	42	42	42	42	77	42
L2_H	0	0	0	0	0	0	0	8
ZESTE	1	1	1	1	1	1	1	1
PR_ZESTE	660	670	660	660	660	660	660	660
TEMP_ZESTE	20.6	20.6	20.8	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
NDVI-I Estimado	235.98	234.31	241.54	235.36	236.35	243.17	240.25	235.36
	Diferencias	-1.661	5.568	-0.611	0.371	7.192	4.274	-0.619

**Tabla 8 - Estimaciones NDVI-I – Ambiente Húmedo – Agrupamiento OESTE**

	Aumentos aplicados	PRECIP 10 mm	TEMP 0.2 °C	Alfisoles 6%	Entisoles 5%	Molisoles 30%	L1_H 35%	L2_H 8%
Variables independientes	Valores promedios	Valores modificados sobre los promedios						
PRECIP	738	748	738	738	738	738	738	738
TEMP	20.4	20.4	20.6	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4
Alfisoles	0	0	0	6	0	0	0	0
Entisoles	23	23	23	23	28	23	23	23
Molisoles	58	58	58	58	58	88	58	58
L1_H	100	100	100	100	100	100	135	100
L2_H	0	0	0	0	0	0	0	8
ZESTE	0	0	0	0	0	0	0	0
NDVI-I Estimado	255.17	254.97	253.64	254.56	255.54	262.36	259.44	254.55
	Diferencias	-0.197	-1.532	-0.611	0.371	7.192	4.274	-0.619

En ambos casos, las variables edáficas (órdenes y limitantes) impactan de la misma manera en el atributo NDVI-I. Las diferencias obtenidas en las estimaciones son idénticas.

Con respecto a las variables climáticas (precipitaciones y temperatura), el comportamiento es diferente según la zona. Si suponemos que aumentan 10 mm las precipitaciones, en el Este el NDVI-I disminuye 1.66 mientras que en el Oeste la caída será menor (0.19).

La temperatura, en el Este se relaciona positivamente con el NDVI-I mientras que la relación es negativa en el Oeste. Por ejemplo, suponiendo que la temperatura varíe 0.2 °C, en el Este el NDVI-I aumentaría 5.56 mientras que en el Oeste disminuiría 1.53.

## 9. Anexo B - Prueba de Hipótesis Múltiple

En este anexo se incluyen los resultados obtenidos al realizar la prueba de hipótesis múltiple entre los valores observados y estimados de cada uno de los atributos de NDVI en el grupo MODIF (Q2-Q4). Los valores estimados fueron calculados utilizando los modelos obtenidos en el grupo NO\_MODIF (Q1).

La prueba fue realizada con una hipótesis nula que sostiene la igualdad del intercepto con 0 y de la pendiente con 1 en forma simultánea.

### NDVI-I - Ambiente Húmedo

Dependent Variable: NDVI\_I

Method: Least Squares

Sample: 1 1367

Included observations: 1367

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	205.0661	7.225709	28.38006	0.0000
NDVI_I_EST	0.078050	0.029208	2.672203	0.0076
R-squared	0.005204	Mean dependent var		224.3321
Adjusted R-squared	0.004475	S.D. dependent var		17.75701
S.E. of regression	17.71723	Akaike info criterion		8.588414
Sum squared resid	428473.8	Schwarz criterion		8.596052
Log likelihood	-5868.181	Hannan-Quinn criter.		8.591273
F-statistic	7.140668	Durbin-Watson stat		1.468706
Prob(F-statistic)	0.007625			

Wald Test:

Equation: LS\_HUMEDO\_NDVI

Test Statistic	Value	df	Probability
F-statistic	1601.459	(2, 1365)	0.0000
Chi-square	3202.918	2	0.0000

Null Hypothesis Summary:

Normalized Restriction (= 0)	Value	Std. Err.
C(1)	205.0661	7.225709
-1 + C(2)	-0.921950	0.029208

Restrictions are linear in coefficients.

### RREL - Ambiente Húmedo

Dependent Variable: RREL

Method: Least Squares

Sample: 1 1367

Included observations: 1367

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1.060020	0.165657	6.398874	0.0000
RREL_EST	0.709550	0.114933	6.173608	0.0000
R-squared	0.027163	Mean dependent var		2.078238
Adjusted R-squared	0.026451	S.D. dependent var		0.580684
S.E. of regression	0.572953	Akaike info criterion		1.725436
Sum squared resid	448.0957	Schwarz criterion		1.733074
Log likelihood	-1177.336	Hannan-Quinn criter.		1.728295
F-statistic	38.11343	Durbin-Watson stat		1.432875
Prob(F-statistic)	0.000000			

Wald Test:

Equation: LS\_HUMEDO\_RREL

Test Statistic	Value	df	Probability
F-statistic	864.6182	(2, 1365)	0.0000
Chi-square	1729.236	2	0.0000

Null Hypothesis Summary:

Normalized Restriction (= 0)	Value	Std. Err.
C(1)	1.060020	0.165657
-1 + C(2)	-0.290450	0.114933

Restrictions are linear in coefficients.

### **DMAX - Ambiente Húmedo**

Dependent Variable: DMAX

Method: Least Squares

Sample: 1 1367

Included observations: 1367

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	14.17465	0.909630	15.58288	0.0000
DMAX_EST	0.539144	0.033929	15.89042	0.0000
R-squared	0.156108	Mean dependent var		24.79931
Adjusted R-squared	0.155490	S.D. dependent var		24.81342
S.E. of regression	22.80285	Akaike info criterion		9.093110
Sum squared resid	709758.9	Schwarz criterion		9.100748
Log likelihood	-6213.141	Hannan-Quinn criter.		9.095968
F-statistic	252.5055	Durbin-Watson stat		1.399836
Prob(F-statistic)	0.000000			

Wald Test:

Equation: LS\_HUMEDO\_DMAX

Test Statistic	Value	df	Probability
----------------	-------	----	-------------

F-statistic	126.3424	(2, 1365)	0.0000
Chi-square	252.6848	2	0.0000

Null Hypothesis Summary:

Normalized Restriction (= 0)	Value	Std. Err.
C(1)	14.17465	0.909630
-1 + C(2)	-0.460856	0.033929

Restrictions are linear in coefficients.

### **NDVI-I – Ambiente Seco**

Dependent Variable: NDVI\_I

Method: Least Squares

Sample: 1 1150

Included observations: 1150

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	80.51320	10.10321	7.969070	0.0000
NDVI_I_EST	0.608282	0.043144	14.09896	0.0000
R-squared	0.147597	Mean dependent var		222.8043
Adjusted R-squared	0.146854	S.D. dependent var		17.22156
S.E. of regression	15.90685	Akaike info criterion		8.373114
Sum squared resid	290476.0	Schwarz criterion		8.381892
Log likelihood	-4812.541	Hannan-Quinn criter.		8.376428
F-statistic	198.7806	Durbin-Watson stat		1.537036
Prob(F-statistic)	0.000000			

Wald Test:

Equation: TEST\_SECO\_NDVI

Test Statistic	Value	df	Probability
F-statistic	322.1482	(2, 1148)	0.0000
Chi-square	644.2964	2	0.0000

Null Hypothesis Summary:

Normalized Restriction (= 0)	Value	Std. Err.
C(1)	80.51320	10.10321
-1 + C(2)	-0.391718	0.043144

Restrictions are linear in coefficients.

### **RREL – Ambiente Seco**

Dependent Variable: RREL

Method: Least Squares

Sample: 1 1150  
Included observations: 1150

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.847466	0.148730	5.698023	0.0000
RREL_EST	0.676642	0.099493	6.800913	0.0000
R-squared	0.038729	Mean dependent var		1.855093
Adjusted R-squared	0.037892	S.D. dependent var		0.449422
S.E. of regression	0.440825	Akaike info criterion		1.201401
Sum squared resid	223.0873	Schwarz criterion		1.210180
Log likelihood	-688.8057	Hannan-Quinn criter.		1.204715
F-statistic	46.25242	Durbin-Watson stat		1.235078
Prob(F-statistic)	0.000000			

Wald Test:  
Equation: LS\_SECO\_RREL

Test Statistic	Value	df	Probability
F-statistic	401.5078	(2, 1148)	0.0000
Chi-square	803.0156	2	0.0000

Null Hypothesis Summary:

Normalized Restriction (= 0)	Value	Std. Err.
C(1)	0.847466	0.148730
-1 + C(2)	-0.323358	0.099493

Restrictions are linear in coefficients.

### DMAX – Ambiente Seco

Dependent Variable: DMAX  
Method: Least Squares  
Sample: 1 1150  
Included observations: 1150

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	5.094485	1.614732	3.155004	0.0016
DMAX_EST	0.915198	0.056972	16.06398	0.0000
R-squared	0.183529	Mean dependent var		29.59921
Adjusted R-squared	0.182818	S.D. dependent var		19.86366
S.E. of regression	17.95638	Akaike info criterion		8.615505
Sum squared resid	370151.4	Schwarz criterion		8.624284
Log likelihood	-4951.916	Hannan-Quinn criter.		8.618819
F-statistic	258.0515	Durbin-Watson stat		1.744317
Prob(F-statistic)	0.000000			

Wald Test:  
Equation: LS\_SECO\_DMAX

Test Statistic	Value	df	Probability
F-statistic	15.32856	(2, 1148)	0.0000
Chi-square	30.65711	2	0.0000

Null Hypothesis Summary:

Normalized Restriction (= 0)	Value	Std. Err.
C(1)	5.094485	1.614732
-1 + C(2)	-0.084802	0.056972

Restrictions are linear in coefficients.