# Efectos del cambio en el uso del suelo sobre el NDVI, el albedo y la evapotranspiración en Santiago del Estero, Argentina

Trabajo Final presentado para optar al título de Especialista de la Universidad de Buenos Aires en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria

## Sofía E. Corina

Ingeniera Agrónoma - Universidad Nacional de Rosario - Año de egreso 2013





#### **TUTOR**

## María Eugenia Beget

Ingeniera Agrónoma - Universidad de Buenos Aires

Magister en Recursos Naturales— Universidad de Buenos Aires

#### JURADO DEL TRABAJO FINAL

#### Gervasio Piñeiro

Ingeniero Agrónomo - Universidad de la República Oriental del Uruguay

Doctor en Ciencias Agropecuarias - Universidad de Buenos Aires

#### **Marcos Texeira**

Licenciado en Ciencias Biológicas – Universidad de Montevideo, Uruguay

Magister en Ciencias Biológicas – Universidad de Montevideo, Uruguay

Doctor en Ciencias Agropecuarias - Universidad de Buenos Aires

Fecha de defensa del trabajo final

2 de marzo de 2021

#### **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutora, María Eugenia Beget, por su aporte y dedicación en el proceso de elaboración del trabajo. A Julieta Straschnoy por la predisposición en resolver inquietudes. A Emilce, Patricia, Cristian y Julio, mis jefes de la Bolsa de Comercio de Rosario, por brindarme la oportunidad de capacitarme y desarrollarme en el área de teledetección. A Josefina Uribe Echevarria del INTA Quimilí por su colaboración con información relevante de la zona de estudio. A mis padres, por su apoyo incondicional en todos mis proyectos. A mi hermano Luciano, mi ángel que me cuida.

"Declaro que el material incluido en este trabajo final 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 ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución."

## INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	
2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1.Área de estudio	
2.2.Base de datos	
3. RESULTADOS	
3.1.NDVI	
3.1.1. Patrones de variación mensual del NDVI	
3.1.2. Patrones de variación anual del NDVI	
3.2.ALBEDO	11
3.2.1. Patrones de variación mensual del Albedo	
3.2.2. Patrones de variación anual del Albedo	
3.3.EVAPOTRANSPIRACIÓN	13
3.3.1. Patrones de variación mensual de Evapotranspiración	
3.3.2. Patrones de variación anual de Evapotranspiración	
3.4. RELACIÓN ENTRE VARIABLES	15
3.4.1. NDVI y albedo	
3.4.1.1.Análisis de correlación mensual	
3.4.1.2.Análisis de correlación anual	
3.4.2. NDVI y evapotranspiración	
3.4.2.1.Análisis de correlación mensual	
3.4.2.2.Análisis de correlación anual	
4. DISCUSIÓN	
5. CONCLUSIÓN	2

#### INDICE DE FIGURAS

- **Figura 1:** A- Ubicación del área de estudio dentro de las diferentes ecorregiones de Argentina. B- Zoom de área de estudio subdividido por los departamentos correspondientes a la provincia de Santiago del Estero (pág. 4).
- **Figura 2:** Evolución de la cantidad de hectáreas deforestadas en los departamentos Alberdi, Moreno, Juan F. Ibarra, General Taboada y Belgrano, Santiago del Estero 2001-2017. Fuente: LART, FAUBA (pág. 5).
- **Figura 3:** Sitios de muestreo: 20 de bosques y 20 de cultivos en el área de estudio (pág. 6).
- **Figura 4:** Media NDVI mensual 2001-2017 (punto dentro de la caja), mediana (línea dentro de la caja), distribución de valores, amplitud de valores mínimos y máximos (líneas externas) y cuartiles 25 y 75 (pág. 8).
- **Figura 5:** Variaciones de NDVI promedio mensual (línea continua), desvío estándar (sombra), valores mínimos y máximos (líneas punteadas) para: A-Bosques, B-Cultivos en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 9).
- **Figura 6:** Variaciones de NDVI-I promedio (línea continua), desvío (líneas punteadas) para Bosques (verde) y Cultivos (amarillo) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 10).
- **Figura 7:** Variaciones de RREL anual para: Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) y acumulado anual de precipitaciones (barras) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 11).
- **Figura 8:** Media Albedo mensual 2001-2017 (punto dentro de la caja), mediana (línea dentro de la caja), distribución de valores, amplitud de valores mínimos y máximos (líneas externas) y cuartiles 25 y 75 (pág. 11).
- **Figura 9:** Variaciones de albedo promedio mensual (línea continua), valores mínimos y máximos (líneas punteadas) para Bosques (verde) y Cultivos (amarillo) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 12).
- **Figura 10:** Variaciones de albedo promedio anual (línea continua), desvío (líneas punteadas) para Bosques (verde) y Cultivos (amarillo) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 12).
- **Figura 11:** Variaciones de evapotranspiración promedio mensual (línea continua), valores mínimos y máximos (líneas punteadas) para Bosques (verde) y Cultivos (amarillo) en el periodo de estudio 2001-2017. Precipitaciones acumuladas en milímetros mensuales (barras celestes) del promedio de estaciones dos meteorológicas en Banderas y Quimilí (Santiago del Estero) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 13).
- **Figura 12:** Evolución del promedio anual de evapotranspiración de Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) expresado en milímetros por año y precipitaciones en milímetros anuales del promedio de estaciones meteorológicas en Banderas y Quimilí (Santiago del Estero) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 14).
- **Figura 13:** Evapotranspiración anual promedio 2001-2017 (punto dentro de la caja), mediana (línea dentro de la caja), distribución de valores, amplitud de valores mínimos y máximos (líneas externas) y cuartiles 25 y 75 (pág. 15).

- **Figura 14:** Correlación de NDVI promedio mensual (eje X) y Albedo promedio mensual (eje Y) para Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 15).
- **Figura 15:** Correlación de NDVI promedio anual (eje X) y Albedo promedio anual (eje Y) para: Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 16).
- **Figura 16:** Correlación de NDVI promedio mensual (eje X) y Evapotranspiración promedio mensual (eje Y) para: Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 17).
- **Figura 17** Correlación de NDVI promedio anual (eje X) y Evapotranspiración promedio anual (eje Y) para: Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) en el periodo de estudio 2001-2017 (pág. 17).

#### RESUMEN

El índice de vegetación normalizado (NDVI), el albedo, la evapotranspiración son indicadores claves del funcionamiento de los ecosistemas y como tal, se busca estimarlos cada vez con mayor precisión y frecuencia para estudios de cambio de uso de suelo a nivel local, regional y global. En este contexto, la observación satelital surge como una manera favorable de mapear y monitorear el cambio de estas variables. El objetivo de este trabajo fue evaluar el funcionamiento estacional y anual de sitios de bosques nativos y compararlos con sitios con cultivos agrícolas en la provincia de Santiago del Estero. Para ello se utilizaron imágenes satelitales MODIS y se compararon 20 sitios de cada uso del suelo a lo largo de 17 años. El remplazo de los bosques nativos de la provincia de Santiago del Estero por cultivos agrícolas se evidencia en el cambio de los valores promedios de NDVI, albedo y evapotranspiración y su dinámica intra e interanual. El remplazo de bosques nativos por cultivos anuales provocó una disminución del NDVI promedio de 32% y de la evapotranspiración de 10% y un aumento de los valores de albedo de 55%. El patrón estacional y anual de las variables en estudios presentó desvíos estándar más marcados en los sitios de cultivos respecto a los de bosques. El desvío estándar del NDVI en cultivos aumentó en promedio 181%, el de albedo un 153% y el de evapotranspiración un 28%. Los resultados obtenidos proporcionan herramientas para anticipar los posibles impactos de la deforestación en la porción este de Santiago del Estero a fines de minimizar la incertidumbre y sentar una base para la planificación sostenible del uso del suelo.

Palabras claves: uso del suelo, deforestación, cultivos anuales, bosques nativos, MODIS.

#### **ABSTRACT**

The normalized difference vegetation index (NDVI), albedo, evapotranspiration are key indicators in ecosystem processes and as such, it is sought to estimate them with more precision and frequency for studies of land use change use at local, regional and global level. In this context, satellite observation emerges as a favourable way to map and monitor changes in these variables. The objective of this research was to estimate the evolution of ecosystem processes with remote MODIS sensor in 20 dry forest sites and 20 cultivation sites in the province of Santiago del Estero over 17 years and also to evaluate the seasonal performance. The transfer of the native forests of the province of Santiago del Estero to crops is evidenced by the change of the average values of NDVI, albedo and evapotranspiration and their intra and inter-annual dynamics. The replacement of native forests by annual crops caused a decrease in NDVI average of 32% and in evapotranspiration of 10% and an increase in albedo values of 55%. The seasonal and annual performance of the variables under study presented more marked standard deviations in the crop sites tan in the forest sites. The NDVI standard deviation in crops increased by 181%, the albedo standard deviation by 153% and the evapotranspiration by 28%. The results obtained provide tools to anticipate the potential impacts of deforestation in the eastern of Santiago del Estero in order to minimize uncertainty and lay a foundation for sustainable planning of land use.

**Keywords:** land-use, deforestation, NDVI, crops, native forests, MODIS.

## INTRODUCCIÓN

La vegetación juega un papel esencial en el balance de agua y de energía. Las plantas, a través de su capacidad para acceder, transportar y evaporar el agua, ejercen un fuerte control sobre el proceso de evapotranspiración (Calder, 1998). La evapotranspiración es un componente clave en el ciclo hidrológico de la Tierra que explica el 60% de la precipitación continental (Brutsaert, 1986). En consecuencia, los cambios de vegetación, en particular los que involucran transiciones entre coberturas dominadas por pastizales y bosques, a menudo modifican la evapotranspiración de manera considerable (Horton, 1919; Bosch & Hewlett, 1982; Zhang et al., 2001).

En el balance energético, la vegetación refleja la radiación solar (albedo) interviniendo en la energía disponible y en la temperatura de la superficie terrestre. El albedo de la superficie terrestre es uno de los principales impulsores del cambio climático (Bonan 2008; Wielicki et al. 2005). El cambio de la cubierta terrestre en paisajes más áridos también puede llevar a grandes aumentos de albedo (Otterman y Tucker 1985). Los bosques usualmente presentan albedos inferiores a los cultivos (Ni & Woodcock, 2000; Gao et al., 2005; Loarie et al., 2010). Como consecuencia, la sustitución de bosques secos por cultivos reduciría la cantidad de radiación solar de onda corta (SW) captada por el ecosistema y daría lugar a un efecto de enfriamiento del planeta (Betts, 2000). Sin embargo, el remplazo de bosques por cultivos produce una liberación del carbono secuestrado en los bosques, produciendo un efecto contrario al descripto anteriormente, es decir un calentamiento del planeta (Jackson y Jobbagy, 2000). Según el estudio de Bala et al (2006), la deforestación afecta el clima global al liberar el carbono almacenado en las plantas, en el suelo y al alterar las propiedades físicas de la superficie planetaria. La deforestación ejerce una influencia de calentamiento al: (i) agregar CO2 a la atmósfera, (ii) eliminar el posible aumento del almacenamiento de carbono en los árboles como resultado de la futura fertilización con CO2, y (iii) disminuyendo la evapotranspiración.

El importante crecimiento demográfico de los últimos siglos y la consecuente búsqueda de nuevas tierras para la producción de alimentos promovió una rápida transformación de la cobertura y uso del suelo en los ecosistemas terrestres (Volante, et al. 2015). Así mismo, los avances tecnológicos en la agricultura en combinación con los precios internacionales de los *commodities* han incentivado a los productores a transformar los bosques o arbustales en cultivos anuales. Durante el período 2002-2006, la tasa de deforestación aumentó 123% en Salta, 83% en Santiago del Estero, 56% en Formosa y 14% en Chaco, en comparación con las tasas observadas durante el periodo 1987-1998 (Volante et al. 2006, 2012; UMSEF 2007).

Los bosques secos son uno de los biomas más importantes en los cuales está ocurriendo la expansión agrícola (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2003; Grau et al., 2005) y el centro de Argentina es un claro ejemplo de ello, donde los ecosistemas leñosos semiáridos conocidos como "Chaco" y "Espinal" son reemplazados cada vez más por cultivos anuales de secano (Solbrig, 1999; Zak et al., 2004; Paruelo et al., 2005; Grau et al., 2008). La expansión agropecuaria promovió la deforestación en la ecorregión Chaco semiárido a una tasa que, desde el año 2000, alcanza los mayores valores en todo el mundo. Santiago del Estero fue una de las provincias más afectadas por este proceso (Camba, 2015). Según Grau et al. (2005) en las áreas más cultivadas, la región ha perdido aproximadamente el 20% de su cubierta forestal en los últimos 30 años. La expansión agrícola en el centro de Argentina ha acompañado (y es probable que haya respondido) a un período de aumento de los niveles de precipitación

que alcanzó el 30% durante el último siglo, particularmente entre los años setenta y finales de los noventa (Barros et al., 2008). A nivel nacional, el área cubierta por cultivos anuales aumentó a una tasa de 0,27% por año entre 1988 y 2002 (Paruelo et al., 2006), con 25 millones de hectáreas ahora dedicadas a la producción de soja, trigo, maíz y otros granos donde los bosques secos solían ser la vegetación dominante.

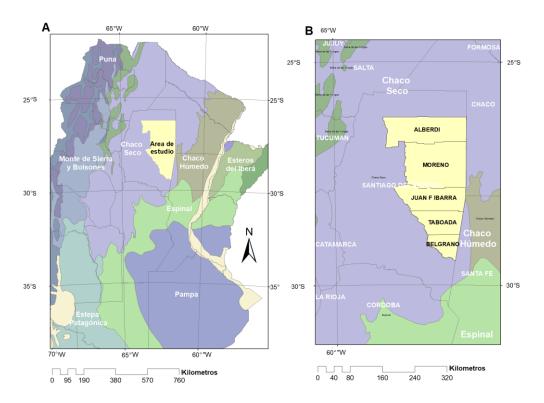
Para estudiar el cambio del uso del suelo, las imágenes satelitales proveen datos cuantitativos de variables ecológicas claves en el espacio y el tiempo. Este uso de la información provista por los sensores remotos tiene un enorme impacto ya que brinda la posibilidad de, por un lado, describir la heterogeneidad estructural del territorio y, por otro, describir patrones temporales de las categorías estructurales. La identificación de patrones espaciales es un paso crucial en la elaboración de hipótesis acerca de los controles de procesos ecológicos (Paruelo, 2008). De esta manera, los satélites proporcionan información sin precedentes sobre la dinámica de la vegetación y las variaciones de la energía de la superficie. El patrón de reflexión de la energía solar por parte de las coberturas terrestres permite la cuantificación de índices espectrales y la estimación de variables funcionales como el albedo y la evapotranspiración a escala regional y global.

El objetivo de este trabajo es caracterizar los patrones estacionales y anuales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, un estimador de la captura de radiación solar por parte de la vegetación), del albedo superficial y de la evapotranspiración en bosques nativos secos, que son remplazados por cultivos agrícolas en Santiago del Estero, Argentina. Se eligieron 20 sitios que presentaban áreas de bosques nativos secos y 20 sitios con cultivos agrícolas en la porción este de Santiago del Estero, Argentina. En cada sitio se caracterizó el patrón del NDVI, del albedo y de la evapotranspiración para un período de 17 años (2001-2017), basado en información remota obtenida por los sensores MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua.

## 1. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1.1.Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la región este de la provincia de Santiago del Estero, República Argentina, específicamente en cinco unidades administrativas llamadas departamentos: Alberdi, Moreno, Juan F. Ibarra, Taboada y Belgrano (Figura 1.B). Los departamentos mencionados se encuentran en la ecorregión del Chaco Seco aunque en el departamento de Moreno y Juan Ibarra existe una estrecha franja correspondiente al Chaco Húmedo (Figura 1.A).



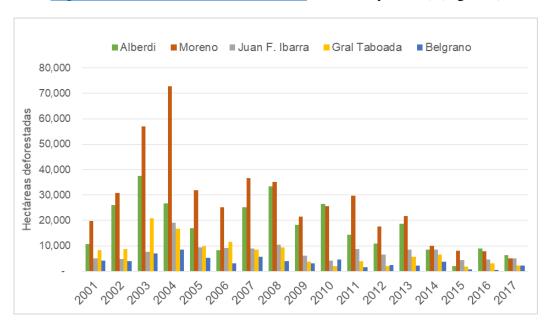
**Figura 1:** A- Ubicación del área de estudio dentro de las diferentes ecorregiones de Argentina. B- Zoom de área de estudio subdividido por los departamentos correspondientes a la provincia de Santiago del Estero.

El clima de la región es subtropical con una estación seca en invierno. La precipitación anual promedio presenta un gradiente espacial donde se registran valores más bajos en la porción central (500 mm), y aumentan hacia el este (650 mm en el noreste y 900 mm en el sureste) (Morello et al., 2009). La temperatura media mensual es de 28  $^{\circ}$  C en enero y de 16  $^{\circ}$  C en julio (Morello y Rodríguez, 2009).

Desde el punto de vista geomorfológico el área de estudio se caracteriza por ser una amplia llanura con baja o nula pendiente bordeada por el Río Saldado al oeste y sur de la región de estudio, donde presenta terrazas y llanuras aluviales. Los suelos son predominantemente del orden de Molisoles, seguido de Entisoles y en menor medida Alfisoles. Esta amplia planicie sedimentaria está cubierta por bosques secos semideciduos dominados por especies de Quebracho (*Schinopsis lorentzii, Schinopsis Balansae y Aspidosperma* quebracho-blanco) y también por especies de *Prosopis nigra, Prosopis ruscifolia, Prosopis alba* y *Zizyphus mistol* (Morello et al., 2012).

El área de estudio se definió de acuerdo con la pérdida de cobertura forestal en tierras con potencial agronómico a fines de comparar los efectos en el NDVI, el albedo y la evapotranspiración en el periodo 2001-2017. Según el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART, 2010), las tasas de deforestación en el Chaco Seco Argentino se encuentran entre las más altas del mundo y están promovidas principalmente por el avance de la frontera agropecuaria. Durante el periodo 2002-2009 la tasa de deforestación varió entre 1,5% y 2%, superando las medias de deforestaciones latinoamericanas y globales.

La cantidad de hectáreas deforestadas en los departamentos del área bajo estudio (Alberdi, Moreno, Juan F. Ibarra, General Taboada y Belgrano) durante el periodo analizado (2001-2017) totalizan 1.074.776 ha. En el año 2004 fue el pico de deforestación con 144.004 hectáreas ubicadas mayormente en el departamento Moreno (LART, FAUBA http://www.monitoreodesmonte.com.ar/ acceso mayo 2020) (Figura 2).



**Figura 2:** Evolución de la cantidad de hectáreas deforestadas en los departamentos Alberdi, Moreno, Juan F. Ibarra, General Taboada y Belgrano, Santiago del Estero 2001-2017. Fuente: LART, FAUBA

#### 2.2 Base de datos

Para evaluar el impacto del cambio en el uso del suelo, se procedió a analizar las variaciones del NDVI (NDVI = (IR-R)/(IR+R), en donde IR: reflectancia en el espectro infrarrojo y R: reflectancia en el espectro rojo visible), el albedo y la evapotranspiración durante el periodo 2001-2017 para dos tipos de coberturas: bosque y cultivos. Se tomaron 20 sitios de cada cobertura (cada punto es un conjunto de píxeles homogéneos) distribuidos regularmente en el área de estudio previamente descripta. La elección de los 40 sitios de estudio se realizó mediante interpretación visual en Google Earth (Figura 3).

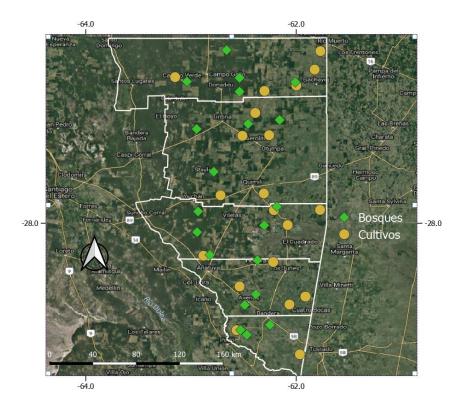


Figura 3: Sitios de muestreo: 20 de bosques y 20 de cultivos en el área de estudio.

Las series temporales de NDVI, albedo y evapotranspiración se extrajeron mediante el uso de la plataforma Google Earth Engine.

Se analizó la dinámica temporal del NDVI con los sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) ubicado a bordo de las misiones satelitales de la NASA Aqua y Terra. El producto MOD13Q1 posee una resolución espacial de 250 m (6,25 ha de superficie por pixel) registrada en el período de 16 días. Los valores de este índice pueden fluctuar de -1 a 1 según la naturaleza de la superficie observada.

A partir de los datos de NDVI, y para caracterizar la estación de crecimiento y la fenología de cada cobertura, se calcularon los siguientes atributos:

- ♣ NDVI Integral (NDVI-I)
- Desvío estándar
- ♦ NDVI máximo (NDVImax) y mínimo (NDVImin)
- ♣ Rango Relativo (RREL= (NDVImax-NDVImin)/NDVI-I)

A su vez se recopiló una serie temporal de 17 años de datos de albedo de MODIS Terra + Aqua (MCD43A BRDF). El producto es de 500 m de resolución espacial y frecuencia diaria. Proporciona la reflectancia hemisférica direccional (albedo de cielo

negro) y la reflectancia bihemisférica (albedo de cielo blanco) para cada una de las bandas de reflectancia de superficie (banda 1 a banda 7), así como las tres bandas de amplio espectro (visible, infrarrojo cercano y de onda corta). Cada imagen diaria de 25 ha/píxel se genera utilizando 16 días de datos, centrados en el día dado. El albedo no presenta unidades porque es la proporción de energía reflejada respecto a la energía incidente en la superficie. Para este análisis, se tomaron los valores de albedo en las bandas de onda corta (shortwave) y se promediaron mensualmente para su estudio.

Para ese mismo periodo de análisis, se recolectaron datos de evapotranspiración de MODIS Terra (MOD16A2) de 500 m de resolución espacial y compuesto cada 8 días. Según la descripción de la plataforma Google Earth Engine, el algoritmo utilizado para la recopilación de productos de datos MOD16 se basa en la lógica de la ecuación de Penman-Monteith, que incluye entradas de datos de re-análisis meteorológico diarios junto con productos de datos espectrales, como la dinámica de las propiedades de la vegetación, el albedo y la cobertura del suelo. Los datos se miden en kg.m-² cada 8 días y fueron llevados a sumatoria de compuestos mensuales para realizar el análisis.

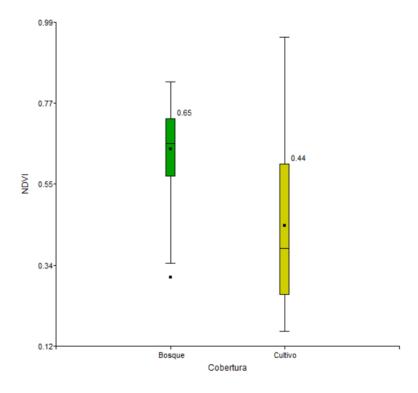
Finalmente, para estudiar si existe una correlación entre el NDVI y el albedo o la evapotranspiración se consideraron el promedio mensual y anual de las tres variables para los 40 sitios de ambas coberturas (bosques y cultivos) en el periodo 2001-2017. Se calculó el R cuadrado y la tendencia lineal para evaluar la correlación de las variables intra e interanual.

Para detectar si existen diferencias significativas entre coberturas de las variables analizadas se usó la plataforma InfoStat. El análisis estadístico usado fue el análisis de la variancia (ANOVA), LSD Fisher con un nivel de significación de p = 0.01.

Para complementar el análisis, el INTA Quimilí brindó datos de lluvias acumuladas mensuales en el periodo 2001-2017 de dos estaciones meteorológicas ubicadas en la localidad de Bandera y Quimilí, Santiago del Estero. Se promediaron los datos de ambas estaciones para obtener en acumulado mensual y el acumulado de cada año del periodo de análisis.

## 2. RESULTADOS 3.1. NDVI

La media de NDVI mensual en el periodo 2001-2017 de los sitios de bosques fue de 0,65 y difirió significativamente de la media de los sitios con cultivos de 0,44 (p < 0,0001). En términos porcentuales los sitios con bosques presentaron en promedio un 32% más de NDVI que los sitios con cultivos (Figura 4).



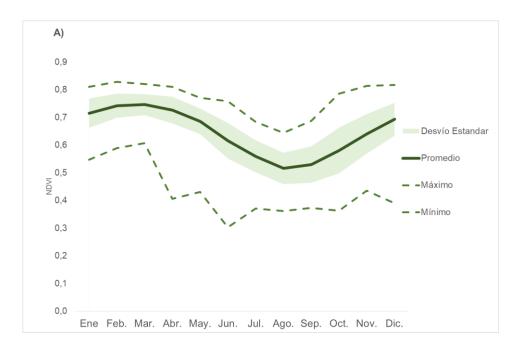
**Figura 4:** Media NDVI mensual 2001-2017 (punto dentro de la caja), mediana (línea dentro de la caja), distribución de valores, amplitud de valores mínimos y máximos (líneas externas) y cuartiles 25 y 75.

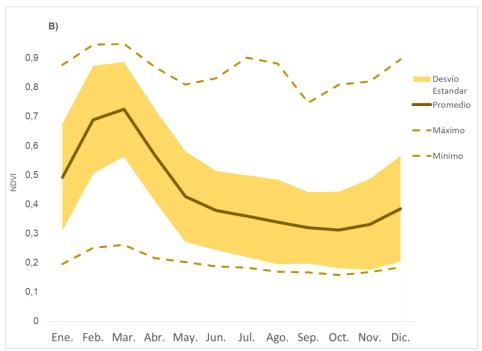
#### 3.1.1 Patrones de variación mensual del NDVI

Las coberturas con cultivos presentaron sus máximos valores promedios de NDVI (0,71) en el mes de marzo mientras que los valores promedio mínimos descendieron en el mes de octubre a 0,31 (Figura 5). La cobertura de bosques presentó sus máximos valores promedios (0,75) en el mes de marzo y los mínimos valores promedios en el mes de agosto (0,52).

El patrón de estacionalidad del NDVI difirió entre coberturas más fuertemente en zonas que fueron deforestadas y actualmente presentan cultivos, en su mayoría de crecimiento anual. El desvío estándar mensual presentó valores en promedio 181% más altos para las coberturas dominadas por cultivos en comparación con los píxeles de bosques. En los meses de verano (enero y febrero) el desvió estándar alcanzó los valores más altos en los cultivos (0,19), mientras que en los bosques, el mes de octubre presentó el mayor desvío con 0,08.

La amplitud de los valores mínimos y máximos de NDVI mensual fue muy marcada para la vegetación herbácea en el periodo analizado. Los valores extremos fluctuaron de 0,16 en el mes de octubre a 0,95 en marzo. Los bosques, en cambio, presentaron menor amplitud entre los valores máximos y mínimos de NDVI, de 0,3 en el mes de junio a 0,82 en el mes de febrero. Los valores mínimos de NDVI de los bosques fueron en promedio un 64% mayor que los valores mínimos de las coberturas herbáceas.





**Figura 5:** Variaciones de NDVI promedio mensual (línea continua), desvío estándar (sombra), valores mínimos y máximos (líneas punteadas) para: A-Bosques, B-Cultivos en el periodo de estudio 2001-2017.

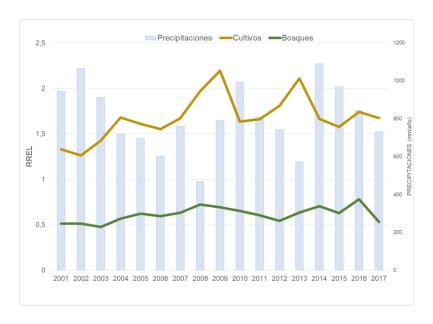
#### 3.1.2 Patrones de variación anual del NDVI-I

Las fluctuaciones de los valores de NDVI-I en los 17 años de estudio fueron más pronunciadas en los sitios con cultivos anuales respecto a los sitios con bosques. La magnitud de la variabilidad se agudizó con el cambio en el régimen hídrico. El año con mayor valor de NDVI-I en cultivos fue 2002 con un valor de 0,56 mientras que el menor valor se ubicó en el año 2009 con 0,35. El desvío estándar de los cultivos en promedio se situó en 0,2, muy superior al valor de los bosques de 0,09. Los bosques mantuvieron el NDVI-I en promedio un 32% superior a los cultivos en todo el periodo analizado y con bajas fluctuaciones interanuales.



**Figura 6:** Variaciones de NDVI-I promedio (línea continua), desvío (líneas punteadas) para Bosques (verde) y Cultivos (amarillo) en el periodo de estudio 2001-2017.

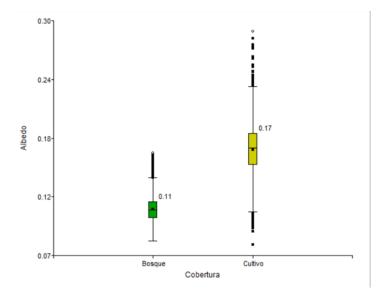
La cobertura de cultivos expuso dos picos de RREL en las campañas con precipitaciones escasas (2008/2009 y 2012/2013) con valores cercanos a 2 debido a una caída del promedio de NDVI, mientras que los menores RREL su ubicaron al inicio del periodo de estudio. En el caso de los bosques, el RREL fue mucho menor y más estable con el transcurrir de los años, sin presentar altas fluctuaciones en los periodos de bajas precipitaciones (Figura 7).



**Figura 7:** Variaciones de RREL anual para: Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) y acumulado anual de precipitaciones (barras) en el periodo de estudio 2001-2017.

#### 3.2 ALBEDO

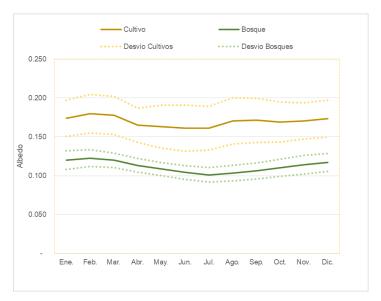
El promedio de los valores de albedo del periodo 2001-2017 de sitios de cultivos y bosques divergieron significativamente (p < 0.0001), arrojando valores de 0.17 y 0.11 respectivamente. Los sitios con cultivos evidenciaron una amplia distribución de valores desde 0.077 a 0.286, mientras que los sitios de bosques sostuvieron valores entre 0.081 y 0.167 (Figura 8).



**Figura 8:** Media Albedo mensual 2001-2017 (punto dentro de la caja), mediana (línea dentro de la caja), distribución de valores, amplitud de valores mínimos y máximos (líneas externas) y cuartiles 25 y 75.

#### 3.2.1. Patrones de variación mensual del Albedo

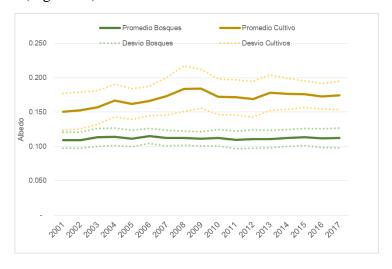
Ambas coberturas mostraron incrementos en los valores de albedo en los meses cálidos de diciembre a marzo y una reducción de los valores de los mismos en los meses más frescos y de menores precipitaciones (mayo-septiembre). Los bosques sostuvieron un patrón más estable de albedo a lo largo del año, en cambio, los sitios con cultivos exhibieron diferencias significativas entre los valores de febrero y de julio (p < 0,0001) (Figura 9).



**Figura 9:** Variaciones de albedo promedio mensual (línea continua), valores mínimos y máximos (líneas punteadas) para Bosques (verde) y Cultivos (amarillo) en el periodo de estudio 2001-2017.

#### 3.2.2 Patrones de variación anual del Albedo

El albedo de los cultivos fue en promedio un 55% más alto que el de los bosques en todo el periodo analizado (p < 0,0001). El albedo en los sitios con bosques nativos exhibieron estabilidad a los largo de los años que se manifestó en un desvío estándar promedio de 0,012, mientras que en los sitios con cobertura de cultivos el desvío estándar ascendió a 0,025 (Figura 10).



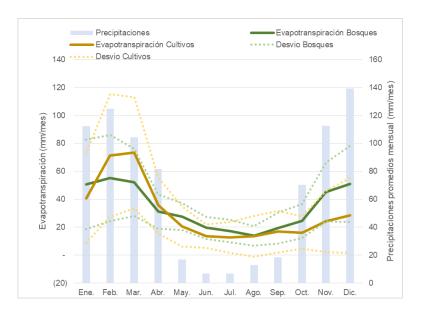
**Figura 10:** Variaciones de albedo promedio anual (línea continua), desvío (líneas punteadas) para Bosques (verde) y Cultivos (amarillo) en el periodo de estudio 2001-2017.

## 3.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN

#### 3.3.1 Patrones de variación mensual de Evapotranspiración

Los bosques evapotranspiraron en promedio un 10% más que los cultivos a lo largo del año, a excepción de los meses de febrero, marzo y abril. El patrón estacional de la evapotranspiración de los cultivos fue más marcado que el de los bosques, arrojando niveles máximos de 73,3 mm/mes en el mes de marzo y mínimos de 12,7 mm/mes en julio. El desvío estándar de los cultivos promedió 21,6 mm/mes, mientras que los bosques presentaron un patrón estacional más estable con un desvío de 16,9 mm/mes.

El patrón estacional de evapotranspiración tanto de los cultivos como el de los bosques copió la demanda atmosférica y el régimen hídrico de la región. Ambas coberturas presentaron mayores niveles de evapotranspiración mensual en verano (de diciembre a marzo) y menores valores de evapotranspiración en las estaciones más frescas (de mayo a septiembre) en coincidencia con los meses de menor demanda atmosférica y precipitaciones más escasas (Figura 11)

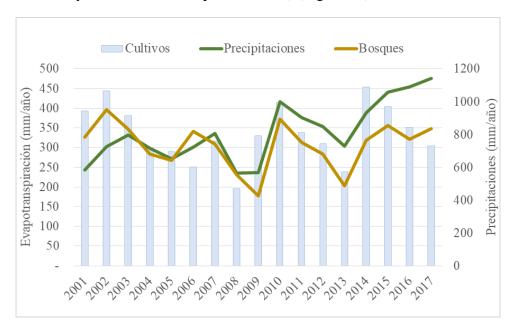


**Figura 11:** Variaciones de evapotranspiración promedio mensual (línea continua), valores mínimos y máximos (líneas punteadas) para Bosques (verde) y Cultivos (amarillo) en el periodo de estudio 2001-2017. Precipitaciones acumuladas en milímetros mensuales (barras celestes) del promedio de estaciones dos meteorológicas en Banderas y Quimilí (Santiago del Estero) en el periodo de estudio 2001-2017.

#### 3.3.2 Patrones de variación anual de Evapotranspiración

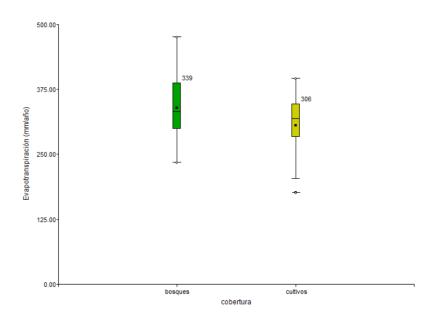
Los valores de evapotranspiración de cultivos y bosques mostraron un patrón similar a través de los años pero con diferencias significativas entre coberturas (p < 0,0001) en años con precipitaciones por encima del promedio histórico (2010, 2014 y 2015) donde los bosques incrementaron su evapotranspiración por encima de los 400 mm/año actuando como regulador de los excesos hídricos. Las diferencias significativas también se observaron en años secos (2008-2009 y 2012-2013) cuando la cobertura de cultivos exhibió una caída más abrupta de evapotranspiración que la de bosques con valores mínimos de 176,9 mm/año en 2009 y 203,3 mm/año en 2013. Los bosques

mostraron valores mínimos de evapotranspiración menos mercados en estos años secos (234,9 mm/año y 304,2 mm/año respectivamente) (Figura 12).



**Figura 12:** Evolución del promedio anual de evapotranspiración de Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) expresado en milímetros por año. Precipitaciones en milímetros anuales (barras celestes) del promedio de dos estaciones meteorológicas en Banderas y Quimilí (Santiago del Estero) en el periodo de estudio 2001-2017.

El acumulado anual promedio de evapotranspiración de sitios de cultivos y bosques no difirió significativamente (p > 0,01) cuando se analizó todo el periodo 2001-2017, arrojando valores de 305,74 mm/año y 339,31 mm/año respectivamente. Los sitios con bosques evapotranspiraron en promedio un 10% más que los sitios con cultivos. Los sitios con cultivos presentan una mayor amplitud de valores y elevaron el desvío estándar a 310,76 mm/año, siendo este un 36% mayor que el desvío estándar de los bosques. (Figura 13).



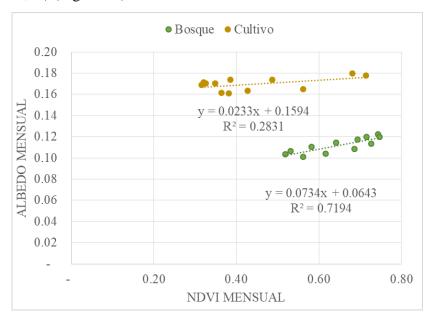
**Figura 13:** Evapotranspiración anual promedio 2001-2017 (punto dentro de la caja), mediana (línea dentro de la caja), distribución de valores, amplitud de valores mínimos y máximos (líneas externas) y cuartiles 25 y 75.

## 3.4. RELACIÓN ENTRE VARIABLES

## 3.4.1. NDVI y albedo

#### 3.4.1.1. Análisis de correlación mensual

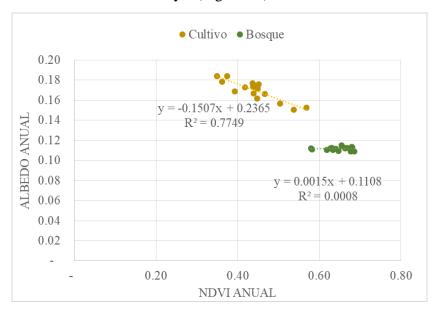
La correlación entre el albedo y el NDVI fue disímil entre ambas coberturas a través de los meses. Los valores de albedo de los bosques exhibieron una correlación levemente positiva con NDVI de 0.5 a 0.75 ( $R^2$ =0.71). En contraste, la cobertura de cultivos evidenció mayores valores de albedo, incluso en el rango de valores de NDVI similares a los bosques, pero una baja proporción de la variabilidad fue explicada por el NDVI ( $R^2$  = 0.28) (Figura 14).



**Figura 14:** Correlación de NDVI promedio mensual (eje X) y Albedo promedio mensual (eje Y) para Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) en el periodo de estudio 2001-2017.

#### 3.4.1.2. Análisis de correlación anual

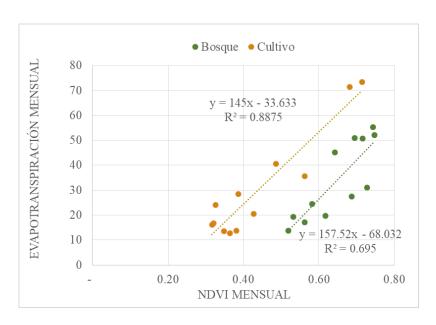
En esta línea, se analizó cómo se comportan los promedios anuales de NDVI y albedo para ambas coberturas en el periodo 2001-2017. La estabilidad del NDVI y del albedo a través de los años de los bosques se evidenció en una baja correlación entre ambas variables ( $R^2 = 0,0008$ ). En contraste, los cultivos mostraron una alta correlación negativa ( $R^2 = 0,77$ ). Años secos con caídas de NDVI presentaron albedos superiores (encima de 0,18) mientras que años más productivos con aumentos de NDVI provocaron que el albedo de los cultivos disminuya. (Figura 15).



**Figura 15:** Correlación de NDVI promedio anual (eje X) y Albedo promedio anual (eje Y) para: Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) en el periodo de estudio 2001-2017.

## 3.4.2. NDVI y evapotranspiración 3.4.2.1. Análisis de correlación mensual

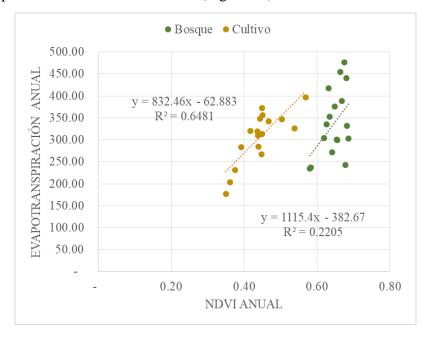
La correlación entre NDVI y evapotranspiración mensual fue alta en ambas coberturas: R<sup>2</sup>=0,7 en bosques y 0,9 en cultivos. Los mayores valores de evapotranspiración coincidieron con la época del año que presenta mayor demanda atmosférica y altas tasas de crecimiento (Figura 16)



**Figura 16:** Correlación de NDVI promedio mensual (eje X) y Evapotranspiración promedio mensual (eje Y) para: Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) en el periodo de estudio 2001-2017.

#### 3.4.2.2. Análisis de correlación anual

El ajuste de la correlación entre el NDVI y la evapotranspiración anual difirió en ambas coberturas. Los bosques mostraron un R<sup>2</sup>=0,2 y el rango de variación del NDVI fue de 0,6 a 0,7, mientras que la evapotranspiración fluctuó entre 240 a 480 mm/año. En contraste, la evapotranspiración de los cultivos sostuvo una alta correlación positiva (R<sup>2</sup>=0,6) con el NDVI. Para los cultivos, el NDVI osciló entre 0,35 y 0,6 y la evapotranspiración de 270 a 380 mm/año (Figura 17).



**Figura 17** Correlación de NDVI promedio anual (eje X) y Evapotranspiración promedio anual (eje Y) para: Bosques (línea verde), Cultivos (línea amarilla) en el periodo de estudio 2001-2017.

## 4. DISCUSIÓN

Los patrones de variación de NDVI intra-anual de los sitios de bosques y cultivos en el presente trabajo final fueron similares a las reportadas por Houspanossian et al (2012) que muestra que las tierras cultivadas tuvieron valores de NDVI en invierno más bajos y picos más agudos en verano. En dicho análisis, el NDVI anual varió en los sitios de bosques secos entre 0,50 y 0,64 y en tierras de cultivo entre 0,35 y 0,49. En el presente trabajo, el cambio de la cobertura de bosques a cultivos tuvo un impacto significativo en la dinámica estacional de NDVI y sus desvíos estándar. Mientras los bosques sostuvieron valores de NDVI entre 0,52 y 0,75 con acotado desvío estándar, los cultivos evidenciaron un pico pronunciado de 0,72 en el mes de marzo y una caída pronunciada a valores menores a 0,4 en los meses de junio a diciembre, coincidente con los periodos barbecho y previo a la siembra. Los desvíos estándar de NDVI mensual de los cultivos se situaron en promedio 181% por encima que el desvío de los bosques.

En el análisis interanual de NDVI, los valores de rango relativo (RREL) de los de cultivos en todos los años del periodo analizado fue similar a los observado por Guerschman et al, (2003), que reportó aumentos de RREL hasta de un 80% en cultivos anuales. Dicha diferencia de RREL se acentuó en años con precipitaciones anuales por debajo del promedio histórico. Esto puede ser explicado por la caída más abrupta de los valores mínimos de NDVI en cultivos en comparación con los bosques en años que no cubren sus necesidades hídricas. En el presente trabajo, la cobertura de cultivos exhibió dos picos de RREL en las campañas con precipitaciones escasas (2008/2009 y 2012/2013) con valores cercanos a 2 debido a una caída del promedio de NDVI, mientras que los menores RREL se ubicaron en 1,3 al inicio del periodo de estudio coincidente con años de mayores precipitaciones (2001/2002). Parte de esta variabilidad interanual no pudo explicarse porque se desconoce el tipo de cultivo implantado en cada campaña. En el caso de los bosques, el RREL fue mucho menor (0,6 en promedio) y más estable con el transcurrir de los años, sin presentar altas fluctuaciones en los periodos de bajas precipitaciones.

Con el cambio del uso del suelo, el albedo se comportó en línea con Houspanossian et al (2012) donde expone que la sustitución de bosques secos por cultivos aumentó el albedo en un 50% (0,160 y 0,108 para cultivos y bosques secos, respectivamente, P <0,05). En coincidencia con dichos resultados, en el presente trabajo, el albedo de los cultivos fue en promedio un 55% más alto en que el de los bosques en todo el periodo analizado (2001-2017). Esto podría deberse a que los bosques presentan mayor rugosidad por sus ramas y hojas permitiendo que la luz solar penetre a través del follaje y se absorba en mayor proporción que en cultivos. Además, exhibien mayor área foliar que los cultivos y están mayor parte del periodo de tiempo con las hojas absorbiendo radiación y fotosintetizando.

Tal como expuso Nosetto, (2011), el remplazo de bosque por cultivos afectó el balance de agua. En su investigación detalla que en promedio las plantaciones de árboles utilizan un 81% más de agua que los pastos con diferencias absolutas de evapotranspiración que varían entre 1,87 mm/día (26/12/2002) y 0,97 mm/día (19/07/2002). En años con precipitaciones por encima de los promedios históricos (2010, 2014 y 2015), los bosques presentaron picos de evapotranspiración actuando como reguladores del balance de agua del ecosistema. Estos resultados son similares a los presentados en este trabajo. En promedio los sitios de bosques evapotranspiraron un 10% más que los sitios de cultivos en el periodo analizado (2001-2017). En años con precipitaciones por encima de los valores históricos (2010, 2014 y 2015) los bosques

incrementaron su evapotranspiración por encima de los 400 mm/año actuando como regulador de los excesos hídricos. Los mayores valores de evapotranspiración de los árboles respecto a los cultivos herbáceos podría ser explicado por la profundidad y porte de sus raíces para extraer agua de las capas más profundas del suelo y poder liberar ese calor latente a la atmosfera a través de su estructura más frondosa.

Por otro lado, los cambios en el uso del suelo podrían tener otras implicancias no alcanzadas por este trabajo final. Por ejemplo, un trabajo de Giménez et al. (2014) mostró que el cambio de bosques nativos por cultivos en Banderas (localizado en el departamento Belgrano de la zona de estudio, Santiago del Estero) conducirían a un mayor riesgo de salinidad de los suelos. Si los niveles freáticos permanecen bajos, la capacidad del suelo para amortiguar el exceso de agua adicional se vería disminuida, y la evaporación y el aumento capilar conducirían a la concentración de sal en la superficie del suelo.

La correlación entre albedo y NDVI intra-anual en bosques fue alta (R<sup>2</sup>=0,71) y podría deberse a que ambos valores presentaron una variabilidad estacional baja. En el caso de los cultivos, la correlación de albedo y NDVI intra-anual fue menor (R<sup>2</sup>=0,2). En el análisis interanual, los bosques mostraron una correlación prácticamente nula entre el NDVI y el albedo ya que ambas variables presentaron un rango de variación acodado. Los cultivos en cambio, exhibieron una correlación negativa donde la variabilidad del albedo fue explicada en un 71% por el cambio del NDVI. A medida que aumentó su NDVI, el cultivo absorbió más radiación y bajó su albedo.

En el análisis mensual de correlación entre NDVI y evapotranspiración se evidenció circularidad debido a que el producto MOD16A2 considera, entre otras variables, el NDVI para la estimación de la evapotranspiración. La evapotranspiración se comportó de manera similar en función del cambio del NDVI de las coberturas boscosas y de cultivos mostrando en ambos casos una correlación alta entre las variables. Las altas tasas de evapotranspiración se observaron en los meses de verano donde la demanda atmosférica es mayor y los cultivos están realizando una alta fotosíntesis, mostrando altos niveles de NDVI. Varios estudios han analizado la relación entre evapotranspiración y el NDVI a partir de sensores remotos (e.g. Di Bella et al. 2000). Los datos de NDVI proporcionaron una estimación fiable de la porción de la radiación interceptada (PAR), una variable estrechamente relacionada con las tasas biofísicas, como la producción primaria y la evapotranspiración (Tucker y Sellers 1986, Box et al. 1989, Paruelo et al. 1997).

Los resultados de la correlación entre NDVI y evapotranspiración interanual dejaron en evidencia la capacidad de los bosques como reguladores del balance de agua y apoyan la investigación realizada por Nosetto et al. (2011). Los cultivos mantuvieron la relación positiva entre el NDVI y la evapotranspiración (R²=0,65). En el caso de los bosques, esta correlación cayó abruptamente (R²=0,23) debido a su aumento de los niveles de evapotranspiración en años de altas precipitaciones manteniendo los mismos valores de NDVI.

## 5. CONCLUSIÓN

Este trabajo destacó los efectos del cambio de la cubierta vegetal sobre algunos componentes del balance de energía y del agua. El remplazo de los bosques nativos de la provincia de Santiago del Estero por áreas de cultivos afectó fuertemente la dinámica de la intercepción de radiación por la vegetación, lo cual es evidenciado por los valores promedios de NDVI y su dinámica intra e interanual. El remplazo de bosques nativos por cultivos anuales provocó una disminución del NDVI promedio de 32%, mientras que el desvío estándar de este índice en cultivos aumentó en promedio 181%.

Así mismo, el albedo y la evapotranspiración, indicadores claves del balance de energía y agua, fueron variables afectadas por el cambio de la cobertura boscosa. El remplazo de bosques nativos por cultivos anuales disminuyó la evapotranspiración en promedio un 10% en el periodo analizado. También generó un aumento de los valores de albedo de 55%. De esta manera, resulta importante monitorear los cambios de estas variables ya que ejercerían una fuerte influencia en el cambio climático.

En este trabajo, los datos satelitales proporcionaron información sobre la dinámica de la vegetación y las variaciones de la energía de la superficie. El patrón de reflexión de la energía solar por parte de las coberturas terrestres permitió la cuantificación de índices espectrales y la estimación de variables funcionales como el albedo y la evapotranspiración a escala regional.

Particularmente, este análisis proporcionó herramientas para anticipar los posibles impactos de la deforestación en la porción este de Santiago del Estero a fin de minimizar la incertidumbre y proporcionar una base para la planificación sostenible del uso del suelo.

#### REFERENCIAS

Bala G., Caldeira K., Wickett M., Phillips TJ., Lobell DB., Delire C., Mirin A. (2006) Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. PNAS.104, n.16, 6550–6555.

Barros, VR., Doyle ME., and Camilloni IA. (2008) Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation. Theoretical and Applied Climatology, vol. 93,19–33

Betts, RA., (2000) Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. Nature, n.408, 187–190.

Bonan, GB., Caldeira K., Diffenbaugh, NS., Field, C.B., Hungate BA., Jobbágy EG., Kueppers LM., Nosetto MD., Pataki DE., (2008) Protecting climate with forests. Environmental Research Letters, vol.3, n.4

Box EO., Holben BN., and Kalb V., (1989) Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO2. Vegetation, n.80, 71–89.

Brutsaert W., (1986) Catchment-scale evaporation and atmospheric boundary layer. Water Resources Research, n.22, 39–46.

Calder, I.R., (1998). Water use by forests, limits and controls. Tree Physiol, n.8, 625–631.

Camba S., Gonzalo H., (2015) ¿En qué medida fue efectiva la Ley de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos? El caso de Santiago del Estero. Facultad de Agronomía Universidad Nacional de Buenos Aires, n. 3.

Di Bella C,. Rebella CM., Paruelo JM., (2000) Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, n.4, 791–797

Di Bella C., Beget ME., (2013) Ecosystem Services Related to Energy Balance: A Case Study of Wetlands Reflected Energy. Earth Observation of Ecosystem Services, 379 – 398.

Gao F., Schaaf CB., Strahler AH., Roesch A., Lucht W., Dickinson R., (2005) MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo Climate Modeling Grid products and the variability of albedo for major global vegetation types. Journal of Geophysical Research, n.110, D01104.

Giménez R., Mercau J., Nosetto M., Páez R., Jobbágy E., (2016) The ecohydrological imprint of deforestation in the semiarid Chaco: insights from the last forest remnants of a highly cultivated landscape. Hydrological Processes, n.30, 2603–2616.

Grau, R., N. Gasparini y M. Aide, (2005) Cambios ambientales y responsabilidad de los científicos. Ciencia Hoy, vol.15, n.87, 15-16.

Guerschman, JP., Paruelo JM., Burke I., (2003) Land use impacts on the normalized difference vegetation index in temperate Argentina. Ecological Applications, vol.13, n.3, 616–628.

Horton RE., (1919) Rainfall interception. Monthly Weather Review, n.47, 603-623.

Houspanossian, J., (2012) Radiation budget changes with dry forest clearing in temperate Argentina, Global Change Biology (2013), n.19, 1211–1222

Jobbágy EG., Jackson RB., (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, vol.10, n.2, 423–436

Loarie SR., Lobell DB., Asner GP., Field CB., (2010) Land-cover and surface water change drive large albedo increases in South America. Earth Interactions, n.15, 1–16.

Morello, J.; Rodríguez, A.; Silva, M. (2009). El Chaco sin bosques: la Pampa o el desierto del futuro. Clasificación de Ambientes en Áreas Protegidas de las Ecorregiones del Chaco Húmedo y Chaco Seco. ISBN 978-987-9260, n.432; 74-6.

Ni W., Woodcock CE., (2000) Effect of canopy structure and the presence of snow on the albedo of boreal conifer forests. Journal of Geophysical Research, n.105, 11.

Nosetto M., Jobbágy EG., Brizuela AB, Jackson RB., (2011) The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. Agriculture, Ecosystems and Environment, n.154, 2–11.

Otterman, J., (1977) Anthropogenic impact on the albedo of the Earth. Climatic Change, n.1, 137–155

Otterman, J., Tucker, C.J., (1985). Satellite measurements of surface albedo and temperatures in semi-desert. Journal of Climate and Applied Meteorology, n.24, 228–234.

Paruelo, JM et all, (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, n.387, 253–260.

Paruelo, JM., Guerschman J P., Verón SR., (2005) Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. Ciencia Hoy, n.15, 14–23.

Paruelo JM., Guerschman JP., Pineiro G., Jobbágy EG., Veron SR., Baldi G., Baeza S., (2006), Cambios en el uso de la tierra en la Argentina y Uruguay: Marcos conceptuales para su análisis. Agrociencia, n.10, 47–61.

Paruelo JM., (2008) La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. Ecosistemas 17, n.3, 4-22.

Pielke RA., Avissar R., (1990) Influence of landscape structure on local and regional climate. Landscape Ecology, n.4, 133–155.

Solbrig, OT., (1999), Observaciones sobre biodiversidad y desarrollo agrícola en Biodiversidad y Uso de la Tierra. Conceptos y Ejemplos de Latinoamérica, editado por S. D. Mateucci et al., Centro de Estudios Avanzados, Universidad de Buenos Aires, 29–40.

Tucker CJ., Sellers PJ., (1986), Satellite remote sensing of primary production. International Journal of Remote Sensing, n.7, 1395–1416.

Volante JL., Mosciaro JL., Morales ML., Castrillo S., Sawchik, J.; Tiscornia G., Maldonado I., Vega A., Trujillo R., Cortéz L., Paruelo J., (2015) Expansión agrícola en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile entre 2000-2010. Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación, RIA, vol. 41. n.2, 2

Wielicki, BA., Wong T., Loeb N., Minnis P., Priestley K., and Kandel R., (2005), Changes in Earth's albedo measured by satellite. Science, n.308, 825.

Zak, MR., Cabido M., and Hodgson JG. (2004) Do subtropical seasonal forests in the Gran Chaco, Argentina, have a future?. Biological Conservation, n.120, 589–598.