



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA



Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica

Máster Oficial en Teledetección

Trabajo Fin de Máster

**“EVALUACIÓN DEL PRODUCTO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN
GLOBAL MOD16 CON MEDIDAS *IN SITU* EN LA REGIÓN DE LA
PAMPA HÚMEDA, ARGENTINA”**

Autora: María Florencia Degano.

maflode@alumni.uv.es

Director: Dr. Juan Manuel Sánchez Tomás

Co-Directora: Dra. Raquel Niclòs Corts

Burjassot, 2017

Los Dres. **Juan Manuel Sánchez Tomás** y **Raquel Niclòs Corts**, Profesores del Máster de Teledetección de la Universitat de València

DECLARAN: Que la presente Memoria **“EVALUACIÓN DEL PRODUCTO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN GLOBAL MOD16 CON MEDIDAS IN SITU EN LA REGIÓN DE LA PAMPA HÚMEDA, ARGENTINA”**, ha sido realizada bajo su dirección por D./D^a. **María Florencia Degano**, y constituye su Trabajo de Fin de Máster, dando el visto bueno para su presentación ante el Tribunal de Trabajo de Fin de Máster que corresponda.

Y para que así conste, firmamos la presente en

Burjassot, ... de de 2017

VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Fdo.: **Juan Manuel Sánchez Tomás**

Fdo.: **Raquel Niclòs Corts**

*A mi sobrino, Gio,
que aún me espera en Argentina
para nuestro primer encuentro.*

Quisiera expresar mi agradecimiento a las personas e instituciones que hicieron posible con su ayuda y apoyo la realización de éste trabajo.

A mi director, el Dr. Juan Manuel Sánchez Tomás, por aceptar guiarme en éste camino final del máster y estar dispuesto a responder todas mis dudas.

A mi co-directora, Dra. Raquel Niclòs Corts, por su paciencia y tiempo dedicado a mis dudas en éste y otros trabajos del máster.

A los Dres. Raúl Rivas y Facundo Carmona, por no bajar los brazos ante las dificultades previas a mi viaje a Valencia, por darme la oportunidad de estudiar en la UV (que me ha enriquecido tanto académica como humanamente), por el entusiasmo contagioso, por el apoyo y las ideas.

A toda la gente perteneciente al Instituto de Hidrología de Llanuras, en especial a mis compañeros de oficina, que han seguido mis pasos previos hasta llegar a Valencia, con sus consejos y anécdotas del “viejo continente”, Christian Mancino y Martín-Bayala, a éste último y a Matías Silicani por su aporte con figuras y material fotográfico.

A las personas que integran el grupo de Teledetección Térmica de la UV, por recibirme, por el espacio, por cada “coffee” y comida aprendiendo palabras en Valenciano, especialmente a mis compañeros de oficina, Xusa, Lluís y Jesús.

A mis compañeros del máster, por aceptarme desde el principio, especialmente a Ana, por mantenerme al día en el primer mes de cursado.

A mi sostén más importante, mi familia.

A mi gran amor, por el apoyo incondicional de acompañarme en cada decisión, bajo cualquier circunstancia.

A mis amigos y colegas Geólogos, Nati y Gastón, por su opinión y buen gusto y a toda mi gente hermosa (de Bigand, Córdoba y Tandil), que se alegran con mis logros, apoyan mis decisiones y están firmes a mi lado.

La realización de la presente memoria ha sido posible gracias a los fondos otorgados por el proyecto FONARSEC FITS MAYCC Id 19/13 - “DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE ALERTA DE INUNDACIONES Y SEQUÍAS EN EL ÁREA SUR DE LA CUENCA DEL RÍO SALADO, PROVINCIA DE BUENOS AIRES”, iniciado en el año 2015, cuya

fuerite de financiación es el Programa de Innovación Tecnológica II; Préstamo BID 2437 OC/AR - PIT II - Diciembre 2010- Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANCyPT) FONARSEC FITS Medio Ambiente y Cambio Climático, a la Comisión de Investigaciones Científicas y al Instituto de Hidrología de Llanuras.

Burjassot, 2017

Índice

Dedicatoria.....	IV
Agradecimientos.....	VI
Índice de Figuras.....	X
Índice de Tablas.....	X
Abreviaturas.....	XI
Resumen	1
Capítulo I: Introducción.....	2
I.I. Evapotranspiración: Concepto	2
I.II. Datos de teledetección	3
I.III. Datos <i>in situ</i>	3
I.III.I. Lisímetro (ETr)	3
I.III.II. Datos de la Oficina de Riesgo Agropecuario de Argentina (ETp).....	4
Capítulo II. Zona de Estudio y Mediciones	5
II.I. Zona de estudio.....	5
II.I.I. Ubicación.....	5
II.I.II. Clima.....	5
II.I.III. Suelo	6
II.II. Mediciones	6
II.II.I. Medidas de superficie	6
II.II.I.I. <i>Evapotranspiración real – Lisímetro</i>	6
II.II.I.II. <i>Evapotranspiración potencial</i>	7
II.II.II. Productos de satélite.....	8
Capítulo III. Metodología	11
III.I. Preparación de los datos del lisímetro.....	11
III.II. Procesado de las imágenes MODIS	13
III.III. Comprobación de la representatividad de las medidas <i>in situ</i> a escala MODIS	14
III. IV. Comparación de datos de teledetección con medidas <i>in situ</i>	14
Capítulo IV. Resultados y Discusión.....	16
IV.I. Representatividad de las medidas <i>in situ</i> a escala MODIS	16
IV. II. Comparación entre MOD16_A2 y las medidas <i>in situ</i>	19
IV.II.I. Lisímetro vs MOD16_A2.....	19
IV.II. ORA vs MOD16_A2	22
Capítulo V. Conclusiones	28
Capítulo VI. Bibliografía.....	29

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución espacial de las estaciones (modificado de Rivas et al., 2016).	6
Figura 2. Diseño del lisímetro de pesada (Silicani, 2015).	7
Figura 3. Corte de lisímetro luego de la incorporación de los horizontes y sensores de humedad (Silicani, 2015).	7
Figura 4. Mosaico global para MOD16. En rojo, sección descargada de WWW1 para este estudio.	10
Figura 5. Balanza acoplada a la pluma hidráulica	12
Figura 6. Pluma hidráulica acoplada a la balanza que sostiene las cadenas del Lisímetro... ..	12
Figura 7. Lisímetro de pesada suspendido mediante una pluma hidráulica.....	13
Figura 8. Comparación NDVI para el año 2013 en Lisímetro (A); Azul (B); Pigüé (C), Bolívar (D), Junín (E) y General Pico (F)	16
Figura 9. SD para los datos de ρ para las distintas estaciones en A. Verano, B. Otoño, C. Invierno; D. Primavera.....	18
Figura 10. Comparación temporal de los valores de ETr medidos y los observados en el producto MOD16_A2 para los años 2012 (A) y 2013 (B).....	19
Figura 11. Comparación entre datos de Lisímetro vs MOD16_A2 de ETr.	21
Figura 12. Variación estacional de los valores promedio de ETr para Lisímetro y MOD16_A2 en los años 2012 y 2013	21
Figura 13. Comparación temporal de los valores de ETp medidos y los observados en el producto MOD16_A2 para 2012 y 2013 en Azul (A,) Pigüé (B), Bolívar (C), Junín (D), General Pico (E).....	22
Figura 14. Continuación- Comparación temporal de los valores de ETp medidos y los observados en el producto MOD16_A2 para 2012 y 2013 en Azul (A,) Pigüé (B), Bolívar (C), Junín (D), General Pico (E).....	23
Figura 15. Comparación entre datos ORA vs MOD16_A2 para ETp del año 2012.....	25
Figura 16. Comparación entre datos ORA vs MOD16 para ETp del año 2013.	25

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores válidos para las distintas zonas.....	9
Tabla 2. Me (mm/día), RSD (mm/día) y RMSE (mm/día) estacional para los datos de ETr para la relación Lisímetro-MOD16_A2.....	21
Tabla 3. Me (mm/día), coeficientes de determinación y RSD (mm/día) de ETp entre ORA y MOD16_A2 para los años 2012 y 2013.....	24

Abreviaturas

CD: Cuentas Digitales

DOY: “*Day Of Year*” Día del Año

ENVI: “*ENvironment for Visualizing Images*”

ET: Evapotranspiración

ET₀: Evapotranspiración del cultivo de referencia

ET_p: Evapotranspiración potencial

ET_r: Evapotranspiración real

FPAR: “*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*” Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida

HDFEOS: “*Hierarchical Data Format - Earth Observing System*” Formato de Datos Jerárquico - Sistema de Observación de la Tierra.

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

LAI: “*Leaf Area Index*” Índice de Área Foliar

LE: Flujo de Calor Latente

LE_p: Flujo de Calor Latente Potencial

LST: “*Land Surface Temperature*” Temperatura de la Superficie Terrestre

Me: Mediana de las diferencias entre datos MODIS y datos *in situ*

MODIS: “*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*”

NDVI: “*Normalized Difference Vegetation Index*” Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

ORA: Oficina de Riesgo Agropecuario

PM: Penman Monteith

ρ : Reflectividad

R²: Coeficiente de Determinación

R-RMSE: “*Robust Root Mean Square Error*” Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio Robusto.

RSD: “*Robust Standard Deviation*” Desviación Estándar Robusta

SD: “*Standard Deviation*” Desviación Estándar

UNCPBA: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Resumen

En Argentina, la evapotranspiración (ET) es la variable hidrológica de mayor relevancia en la Pampa Subhúmeda-Húmeda donde cerca del 85% del agua que precipita se pierde a través de dicho proceso, y en un sentido más amplio, este término hidrológico cobra mayor relevancia si se tiene en cuenta que la productividad primaria de la región es función del agua disponible para evaporar, por lo que se torna totalmente necesario determinar la ET en esta zona. Con el propósito de evaluar el producto MOD16_A2 de ET logrado a partir de datos captados por el sensor MODIS Terra, se lo compara con datos de ET medidos *in situ*, tanto la evapotranspiración real (ETr), con un lisímetro de pesada ubicado en la ciudad de Tandil (provincia de Buenos Aires), como la evapotranspiración potencial (ETp), con datos obtenidos por la Oficina de Riesgo Agropecuario, en estaciones ubicadas en Azul, Pigüé, Bolívar, Junín (provincia de Buenos Aires) y General Pico (provincia de La Pampa). La importancia de evaluar este producto en la zona de la Pampa Húmeda (Argentina) radica en que mediante el proceso de ET se pierde la mayor parte del agua que precipita. En un primer paso se determinó la representatividad de la escala de las imágenes del producto MOD16_A2, calculando el NDVI mediante el uso del producto de reflectividad proveniente de Landsat 7, lo que indicó que para las zonas de Azul y Bolívar, la escala es más representativa que para las demás zonas utilizadas, debido a que se obtuvo una desviación estándar menor. Una vez comprobado esto, se relacionaron los valores de ETr entre los estimados por MODIS y los medidos con el Lisímetro, cuyo coeficiente de determinación (R^2) toma el valor de 0,69, la mediana de las diferencias entre MODIS y los datos *in situ* (Me), es de -0,7 mm/día y el R-RMSE (error cuadrático medio robusto) para el año 2012 es de $\pm 0,7$ mm/día, para el 2013, la Me es de -0,36 mm/día y el R-RMSE es $\pm 0,4$ mm/día. La desviación estándar robusta (RSD) varía en el orden de $\pm 0,3$ mm/día en 2012 y $\pm 0,2$ mm/día en 2013. En general, se observó que el producto MOD16_A2 subestima los valores de ETr. En lo que respecta a la ETp, se tomaron datos del año 2012 y 2013 para todas las estaciones, las medidas tomadas *in situ* muestran valores significativamente menores que los que presenta el producto de MODIS, lo que implica que éste sobreestima la ETp. Los valores de R^2 obtenidos para Azul son cercanos a 0,80 para ambos años, para Pigüé es de 0,93 en 2012 y 0,87 en 2013, en el caso de Bolívar, aumenta considerablemente en el 2013, pasando de 0,58 a 0,92, en Junín es de alrededor de 0,70 en ambos años y en General Pico toma el valor de 0,60. Los valores de Me son positivos, indicando sobreestimación del producto MOD16_A2, y los valores de RSD son mayores para el año 2012 que para el 2013. Tanto la distribución de los datos para ORA como para los de MOD16_A2, determinan que la ETp aumenta hacia los meses de primavera/verano, sucediendo lo contrario en otoño/invierno. Los resultados de este trabajo refuerzan las conclusiones obtenidas por Mu *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012, Ruhoffet *et al.*, 2013, Nadzri y Hashim, 2014; Ramoelo *et al.*, 2014, Barraza Bernardas, 2015, Hu *et al.*, 2015, Autovino *et al.*, 2016, quienes han mostrado que el producto MOD16_A2 presenta problemas de subestimación y sobreestimación de ETr y ETp, respectivamente, en diversas zonas, y remarcan que deben realizarse mejoras del modelo. Por tanto, hay que tener mucha cautela a la hora de utilizar datos de ET del producto MOD16_A2 en la zona de la Pampa Húmeda Argentina.

Capítulo I: Introducción

I.1. Evapotranspiración: Concepto

La evaporación (Ev) representa la cantidad de agua que, en forma de calor latente, se transfiere a la atmósfera, proveniente del suelo y las masas de agua. En un suelo con cubierta vegetal, existe además otra aportación de agua a la atmósfera: la transpiración (T) de las plantas. En ellas se dan tres caminos para perder vapor de agua, en base a lo cual se distinguen tres tipos de T: estomática, cuticular y lenticular. Dado que la cutícula presenta un fuerte carácter hidrófobo, y que las lenticelas son mucho menos abundantes que los estomas, la T estomática es la responsable de la mayor parte del agua transpirada (Botella y Campos, 1993).

La Ev y la T, son dos procesos físicos muy similares que consisten en el paso de agua desde un estado líquido a un estado de vapor, forma en la cual escapa hacia la atmósfera, diferenciándose únicamente uno del otro en el tipo de superficie evaporante (Brasa, 1997). En la naturaleza, ambos ocurren simultáneamente, sin que sea fácil distinguirlos. Por ello, se engloban bajo el término de evapotranspiración (ET).

La ET desde una superficie con vegetación es función de las condiciones meteorológicas del área, así como de las características anatómicas y fisiológicas de la vegetación (Allen *et al.*, 1998). En la Pampa Subhúmeda-Húmeda, la ET es la variable hidrológica de mayor relevancia (Rivas *et al.*, 2002), debido a que mediante este fenómeno se pierde el 85% del agua que precipita (Weinzettel y Usunoff, 2001). El proceso es consecuencia del aporte de energía, principalmente por la radiación solar directa, y en menor medida, por la temperatura ambiente del aire. La fuerza impulsora de este proceso es la diferencia de presión entre el vapor de agua en la superficie evaporante y del vapor de agua de la atmósfera circundante (Allen *et al.*, 1998).

Existen tres tipos diferentes de ET, la potencial (ETp), la del cultivo de referencia (ET₀) y la Real (ETr). En lo que respecta a la primera, como indica Thornthwaite (1948), es la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, con desarrollo óptimo y sin limitaciones de agua, según ésta definición, la ETp está controlada por factores meteorológicos, por las características del cultivo y del suelo, sin depender de las condiciones de humedad del suelo. La definición ET₀ es muy similar a la ETp, (en éste trabajo se utilizan como sinónimos) pero con la diferencia de que la ET₀ se calcula con datos aplicados a un cultivo específico (gramínea o alfalfa), basada en la ecuación de PM determinada por Monteith y Unsworth, 1990, donde la ET₀ se define como la tasa de ET desde un cultivo hipotético sano, con una altura de 12 cm, crecimiento activo que da una cobertura sombreada al suelo, cubre un área extensa y que está bien provisto de agua, asumiéndose una resistencia del cultivo de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen *et al.*, 1998). La Ecuación 1 muestra la ecuación general de PM.

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

donde λET es el flujo de calor latente (MJ/m²/día), R_N es la radiación neta (MJ/m²/día), G es el flujo de calor del suelo (MJ/m²/día), ρ es la densidad del aire (kg/m³), c_p es el calor específico

del aire húmedo a presión constante ($\text{MJ/kg}^\circ\text{C}$), e_a es la presión de vapor del aire (kPa), e_d es la presión de saturación de vapor (kPa), r_c es la resistencia del cultivo (día/m), r_a es la resistencia aerodinámica (día/m), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa°C) y γ es la constante psicrométrica (kPa°C).

Éstas dos definiciones son teóricas, ya que el proceso de ET se produce en una superficie natural y no siempre se encuentra en las condiciones hipotéticas planteadas (Rivas, 2004). Por lo que se define el concepto de ETr, como la cantidad de agua verdaderamente perdida por la superficie, que depende de las condiciones atmosféricas, el contenido de agua en el suelo y las características de la vegetación (Inoue y Moran, 1997; Entraigas *et al.*, 2001).

La ET tiene un importante impacto económico en diferentes regiones, ya que su estimación precisa permite reducir el costo de los proyectos de riego. Por lo tanto, es un tema de investigación activa en áreas tales como la hidrología, la agricultura y la meteorología, lo que ha llevado al desarrollo de variados modelos empíricos que se pueden aplicar con datos de satélite (Ocampo, *et al.*, 2012, Rivas *et al.*, 2016, Silicani, 2015, Teuling *et al.*, 2009).

I.II. Datos de teledetección

A través de teledetección se pueden estimar distintos parámetros del planeta Tierra de manera indirecta, como es el caso de la ET. Así pues, este trabajo se centra en determinar la ET mediante teledetección. Para ello se empleará el producto MOD16_A2 del sensor MODIS a bordo del satélite EOS-Terra, que posee una resolución espacial de 1 km, una resolución temporal de 8 días y se encuentra a escala global. El producto MOD16_A2 está compuesto por cinco bandas, de las cuales dos son de ET (real y potencial ($\text{mm}/8\text{días}$), con factor de corrección de 0,1), otras dos de calor latente (real y potencial ($\text{J/m}^2/8\text{días}$)) y por último la banda de calidad. Para la realización de este trabajo solo se tuvieron en cuenta las bandas de ETr y ETp (Mu *et al.*, 2013).

Debido a que el producto MOD16_A2 posee una resolución espacial de 1km, también se trabajó con el el producto “*Landsat Surface Reflectance Higher-Level Data Products*” del satélite Landsat 7, que posee una resolución espacial de 30 metros, y una resolución temporal de 16 días, con el objeto de estudiar la heterogeneidad de cada zona de estudio, y determinar así la representatividad de las medidas *in situ* a escala del producto de MODIS.

Diversos trabajos han mostrado que el producto MOD16_A2 presenta problemas de subestimación y sobreestimación de ETr y ETp, respectivamente, y remarcan que deben realizarse mejoras del modelo (Mu *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012, Ruhoffet *et al.*, 2013, Nadzri y Hashim, 2014; Ramoelo *et al.*, 2014, Barraza Bernardas, 2015, Hu *et al.*, 2015, Autovino *et al.*, 2016).

I.III. Datos *in situ*

I.III.I. Lisímetro (ETr)

Dado que la teledetección proporciona datos tomados de medidas indirectas, el objetivo principal de este trabajo es comprobar la fiabilidad de éstas mediante su validación con datos *in situ*. De esta forma se determina si se trata de un método de utilización factible. Para ello, se utilizan datos medidos con un lisímetro de pesada, instalado en una parcela con pasto corto ubicada en el Campus Universitario de la Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) de la ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina.

I.III.II. Datos de la Oficina de Riesgo Agropecuario de Argentina (ETp)

El producto de ETp MOD16_A2 se relacionó con estimaciones de ET_0 (en éste trabajo se toman como sinónimos) realizadas por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) perteneciente al Ministerio de Agroindustria de la Nación Argentina que utiliza el método de PM (Ecuación 1), en cuatro estaciones pertenecientes a la Provincia de Buenos Aires: Azul, Pigüé, Bolívar y Junín y una perteneciente a la provincia de La Pampa: General Pico (Rivas *et al.*, 2016).

Capítulo II. Zona de Estudio y Mediciones

II.1. Zona de estudio

II.1.1. Ubicación

En la Figura 1 se muestra la ubicación de las distintas estaciones. El lisímetro de pesada se encuentra instalado en una parcela del Campus de la UNCPBA, en la ciudad de Tandil, ($37^{\circ} 19' 7.67''$ S – $59^{\circ} 4' 42,45''$ O). La estación de Azul, Buenos Aires, se encuentra a los $36^{\circ} 29' 60''$ S y $59^{\circ} 31' 48''$ O, a 147 msnm; la de Pigüé, Buenos Aires, a $37^{\circ} 21' 36''$ S y $62^{\circ} 13' 48''$ O, a 304 msnm; la perteneciente a Bolívar, Buenos Aires, a los $36^{\circ} 7' 15''$ S y $61^{\circ} 2' 24''$ O, con 94 msnm; Junín, Buenos Aires, se sitúa en las coordenadas geográficas $34^{\circ} 19' 48''$ S - $60^{\circ} 33'$ O, y a 81 msnm, y General Pico, La Pampa, $35^{\circ} 25' 14''$ S - $63^{\circ} 27' 2''$ O, 145 msnm (Rivas *et al.*, 2016). Las diferentes estaciones se encuentran dentro de distintos ambientes de la región pampeana, las localidades de Tandil y Azul están dentro de la subregión de las Sierras Septentrionales, Junín, Bolívar y General Pico, integran la subregión de la Pampa Arenosa y Pigüé se encuentra dentro de la subregión Interserrana.

II.1.1.1. Clima

El clima del Complejo de las Sierras Septentrionales (Tandil y Azul) es templado-frío y seco según algunos autores y subhúmedo seco, según otros. La temperatura media anual disminuye de NE a SO. El sur de la provincia de Buenos Aires es barrido durante todo el año por masas de aire de dirección SO-NE, ya que está influenciado por los anticiclones del Atlántico y del Pacífico austral. En el invierno llegan los vientos fríos y secos del SO (Quattrocchio *et al.*, 2008). Las temperaturas anuales media, máxima media y mínima media 15,4; 22,9 y 9,1 °C, respectivamente. La precipitación media anual es de 700 mm y la velocidad media anual de viento es de 6,19 m/s. Las variaciones interanuales de precipitación son grandes, desde 479 a 1057 mm. El relieve irregular del sistema serrano origina microclimas locales (Morello, *et al.*, 2012). En lo referente al partido de Tandil, al norte se extiende una llanura verde, de suave declive y montes cubiertos con diversas especies arbóreas, con excelentes suelos para cultivos propios de la región como avena, cebada, maíz, trigo, girasol, lino, alfalfa, papa y frutales. La precipitación promedio anual es de 912 mm (Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, período 2000-2010) y una evapotranspiración real de entre 730 y 820 mm/año (registros del Intituto de Hidrología de Llanuras 1994-2014) (Silicani, 2015).

Según Morello *et al.*, (2012), en la Pampa Arenosa (Junín, Bolívar y General Pico), el clima es templado húmedo, con temperaturas medias anuales entre 15 y 18 °C. Los veranos son cálidos y los inviernos suaves, las temperatura medias de enero y julio son 23-24 y 7-8 °C, respectivamente. La precipitaciones medias anuales varían entre 1000 y 800 mm decreciendo hacia el oeste; la variación interanual es grande. Las precipitaciones estivales son escasas y frecuentemente se producen sequías severas. La evapotranspiración potencial es de 800 mm anuales, por lo cual hay exceso hídrico muy leve o ausente. Hacia el oeste aumentan las condiciones de aridez, la estacionalidad y la continentalidad climática. La subregión Interserrana (Pigüé), forma parte de una gran planicie, rodeada de serranías. Posee un clima templado, donde se registran precipitaciones frecuentes.

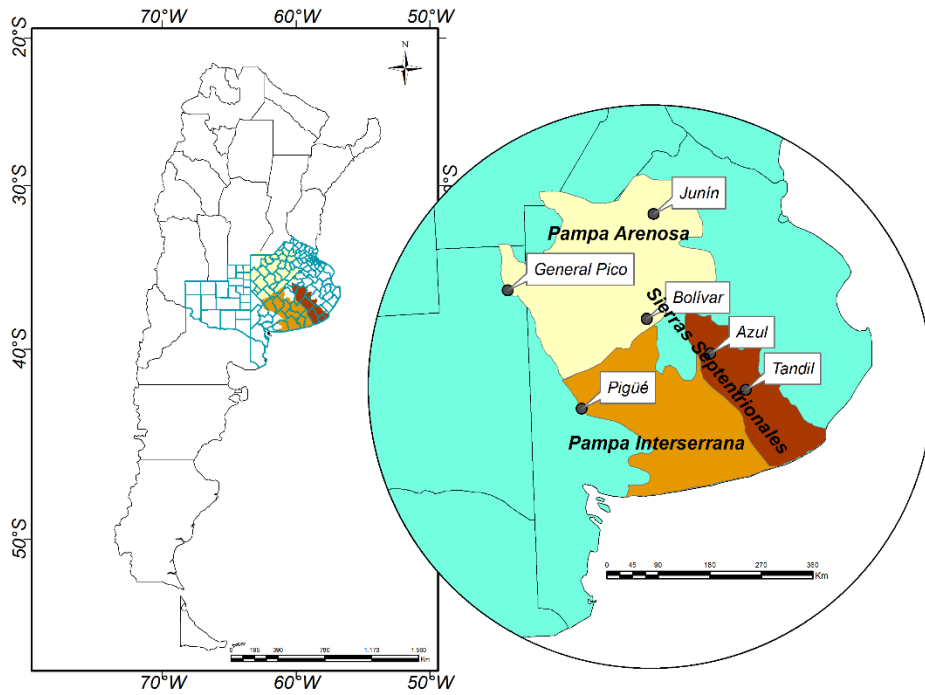


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones (modificado de Rivas et al., 2016).

II.I.III. Suelo

El suelo adquiere importancia en el marco de este trabajo en el caso del lisímetro y no así en el resto de estaciones consideradas y por lo tanto solo se hace referencia a este para la parcela ubicada en el campus de la UNCPBA. Según Rivas y Ocampo (2009), el tipo de suelo de la región corresponde a un Argiudol Típico, lo que significa que se trata de un Molisol (que contiene un horizonte superficial (A) y enriquecido con materia orgánica que esta humificada, la partícula Argi implica que en el subsuelo se acumuló arcilla como resultado de un proceso de migración (por suspensión y movimiento en agua) desde horizontes suprayacentes (horizontes Bt1 y Bt2) (Silicani, 2015). Según mapa de suelos 1:50000 del INTA pertenece a la Unidad Cartográfica SP (Sierra de los Padres) 6, una asociación que incluye los suelos serie Mar del Plata, serie Tandil y serie Cinco Cerros. La parcela del lisímetro contiene una cubierta vegetal mixta (*Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea* y *Lolium Multiflorum*) que se mantiene a una altura de 12 cm en condiciones de secano.

II.II. Mediciones

II.II.I. Medidas de superficie

II.II.I.I. Evapotranspiración real – Lisímetro.

Los lisímetros son grandes “contenedores” llenos de suelo, ubicados en el campo, para representar el medio ambiente local, con superficie con vegetación o en suelo desnudo, para la determinación de ET de un cultivo en crecimiento, o de una cobertura vegetal de referencia, o de un suelo sin vegetación (Aboukhaled et al., 1982).

Con respecto al lisímetro de pesada ubicado en el campus de Tandil (Figura 1), según Silicani (2015), el montaje se realizó de acuerdo a Aboukhaled et al. (1982), la superficie del lisímetro es de 0,27 m² y tiene una profundidad de 0,88 m (cuya profundidad útil de suelo de 0,60 m) y un diámetro de 0,59 m. La profundidad seleccionada es debido a que la exploración de raíces no supera los 0,50 m. En la Figura 2 se muestra el diseño del lisímetro (Silicani, 2015),

que está compuesto por un contenedor cilíndrico con el fondo ranurado, este fondo consta de una chapa soldada en ángulo para facilitar el drenaje del excedente de agua. En primera instancia se instala la estructura soporte dentro del pozo, por encima el contenedor cilíndrico, dentro se coloca grava, y por encima de ella, el suelo (Figura 3), en éste caso se pusieron también tres sensores de humedad. Adicionalmente se añadieron tres cadenas de 1 m de longitud en el borde superior del lisímetro, separadas entre sí por ángulos de 120°, que permiten colgar la estructura de una pluma hidráulica para su posterior toma del peso.

En Tandil, desde el año 2011 se obtiene la ETr local con la utilización del lisímetro de pesada. Se realizan mediciones periódicas del peso del lisímetro y mediante conversiones matemáticas (que se verán en el capítulo III), se obtiene la ETr en unidades de mm/día.

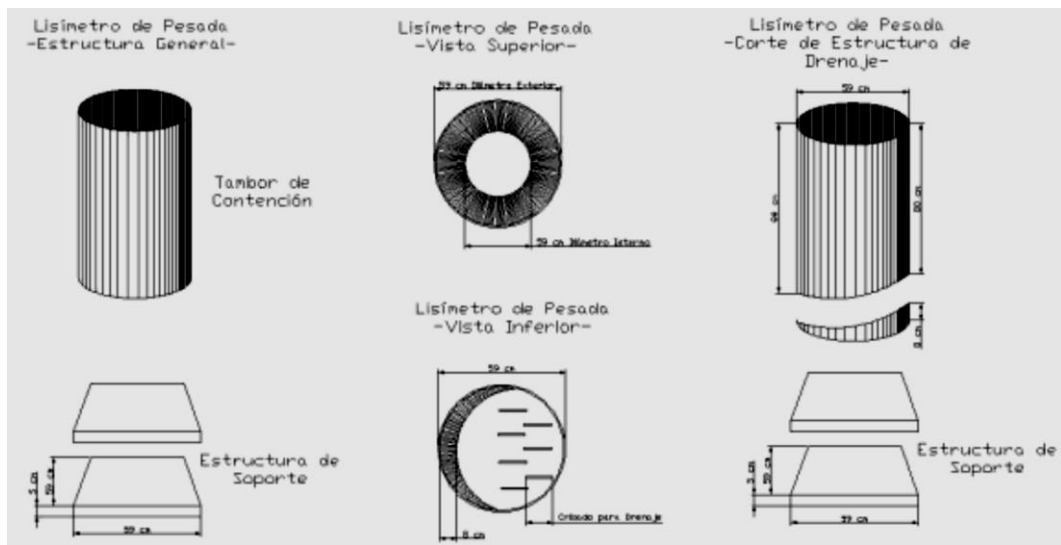


Figura 2. Diseño del lisímetro de pesada (Silicani, 2015).

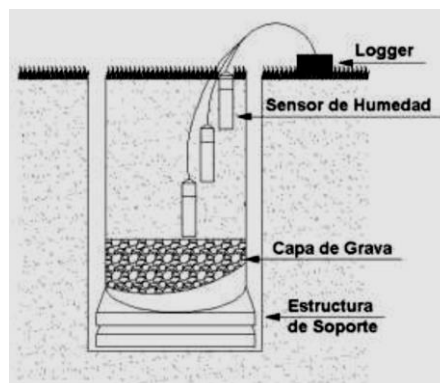


Figura 3. Corte de lisímetro luego de la incorporación de los horizontes y sensores de humedad (Silicani, 2015).

II.II.I.II. Evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración potencial se obtiene de Rivas *et al.* (2016), quienes utilizaron los datos provenientes de la ORA, perteneciente al Ministerio de Agroindustria de la Nación Argentina para las estaciones de Azul, Pigüé, Bolívar, Junín y General Pico. En la ORA calculan los datos de ET_0 utilizando información que les brinda el Servicio Meteorológico

Nacional de Argentina. La ET_0 para cada sitio experimental se estimó a partir del método PM (Ecuación 1) utilizando datos de variables biofísicas censadas *in situ*. Las estaciones se eligieron a partir de la disponibilidad y calidad de una extensa serie de datos. Las variables de interés colectadas en las estaciones fueron temperatura máxima y mínima (T_{min} y T_{max}), humedad relativa (HR %), velocidad de viento (m/s) y radiación solar (W/m^2) abarcando un rango temporal desde el año 2002 hasta el 2013. Para la realización del presente trabajo se tomaron los datos de los años 2012 y 2013.

II.II.II. Productos de satélite.

El producto MOD16 está compuesto por dos subproductos, el MOD16_A2, cuyos datos son la sumatoria de ET de 8 días y sumatoria de ET mensual, y el MOD16_A3, que posee información de la sumatoria de ET anual.

El producto MOD16_A2 posee una resolución espacial de 1 km a través de los 109,03 millones de km^2 a escala global, de áreas con vegetación. El algoritmo MOD16 se basa en la lógica de la ecuación de PM (Ecuación 1), que utiliza productos provistos por el sensor MODIS combinando con información meteorológica diaria obtenidos a partir de datos de re-análisis como variables de entrada. La ET es la suma de los flujos de vapor de agua de la evaporación del suelo, la evaporación del dosel húmedo, la evaporación del agua de lluvia interceptada por el dosel de las plantas antes de que alcance el suelo, y la transpiración a través de estomas en las hojas y tallos de las plantas (Mu *et al.*, 2013). La temperatura diaria del aire, datos sobre el déficit de presión de vapor, humedad relativa, y el producto LAI de MODIS se utilizan para estimar la conductancia superficial, la resistencia aerodinámica, la capa húmeda, el flujo de calor del suelo en conjunto con otras variables ambientales claves. Los productos MOD16_A2/A3 ET se generan a intervalos de 8 días, mensuales y anuales.

Como exponen Mu *et al.* (2013), el MOD16 utiliza datos meteorológicos diarios y conjuntos de datos de MODIS de 8 días como entradas para el cálculo diario de ET. Para el producto MOD16, los conjuntos de datos de entrada MODIS incluyen: 1) Colección 4 de MODIS global de 1 km^2 , con cobertura terrestre de tipo 2 (MOD12Q1) (Friedl *et al.*, 2002); 2) Colección 5 MODIS global 1 km^2 FPAR/LAI (MOD15A2) (Myneni *et al.*, 2002); y 3) Colección 5 global 1 km^2 de control de calidad de albedo (la banda 10 de MCD43B2/MCD43B3) (Schaaf *et al.*, 2002; Jin *et al.*, 2003; Salomon *et al.*, 2006).

Mu *et al.* (2011) han mejorado el algoritmo de Mu *et al.* (2007) 1) simplificando el cálculo de la fracción de cobertura vegetal; 2) calculando ET como la suma de componentes diurnos y nocturnos; 3) calculando el flujo de calor del suelo; 4) mejorando los métodos para estimar la conductancia estomática, la resistencia aerodinámica y la resistencia de la capa límite; 5) la separación de la superficie seca del dosel de la húmeda; y 6) dividiendo la superficie del suelo en superficie húmeda saturada y superficie de humedad, y por lo tanto la evaporación del suelo incluye la evaporación potencial de la superficie húmeda saturada y la evaporación real de la superficie de humedad.

A continuación se detallarán las variables MOD16, el formato de archivo de datos, la proyección de mapa, el nombre de los archivos y el tamaño.

El producto de ET, MOD16 se puede encontrar en diferentes versiones: 1) 8 días (mm/8días, desde el DOY 1 al 361 y mm/5días para los últimos 5 días de un año regular,

multiplicando por el factor de corrección de 0,1) es la sumatoria de ET durante periodos de 8 días (5 días para el DOY 361 a 365 en años regulares y 6 días para un año bisiesto); 2) La ET mensual (0,1 mm/mes) es la sumatoria de ET mensual; y 3) La ET anual (0,1 mm/año) es la sumatoria de la ET durante cada año. El flujo de calor latente de 8 días, mensual y anual (LE)/LE potencial (LEp) (10^{-4} J/m²*día) es el LE/LEp diario promedio durante el período de tiempo correspondiente.

Para obtener los valores en magnitud física hidrológica (agronómica u otra disciplina afin) es necesario aplicar el factor de corrección de 0,1 para obtener los valores de ETr/ETp en mm/8 días o mm/mes, o mm/año, y de 10^{-4} para obtener LE/PLE en unidades de energía (J/m²*día). El rango válido de valores para el producto de 8 días y mensual de ETr/LE/ETp/LEp y anual LE/LEp es de -32767 - 32700 y se encuentra detallado en la Tabla 1, mientras que el rango de valores válidos para ETr/ETp anual, es de 0-65500, determinado en la Tabla 1 para las diferentes zonas.

Tabla 1. Valores válidos para las distintas zonas.

Zona	8 días y mensual de ETr/LE/ETp/LEp y anual LE/LEp	ETr/ETp anual
Valor de relleno fuera de la Tierra	32767	65535
Cuerpo de agua	32766	65534
Suelo estéril o escasamente vegetado	32765	65533
Nieve y hielos permanentes	32764	65532
Humedales permanentes	32763	65531
Zonas urbanas	32762	65530
Zonas sin clasificar	32761	65529

Las variables de salida incluyen control de calidad anual (ET_QC) de 8 días, mensuales y anuales, LE, ETp, LEp y ETr. El campo QC de MOD16_A2 de 8 días se hereda de MOD15A2 en el mismo período. Sin embargo, el FPAR/LAI contaminado con nubes ha sido temporalmente llenado con aquellos que tienen un buen QC.

Los datos se guardan en formato de archivo HDFEOS con proyección de mapa Sinusoidal. Como se muestra en la Figura 4, el globo se divide en 36 (dirección horizontal) por 18 (vertical) cuadrantes, formando un mosaico MODIS “10-grados”. Para los productos de tierra MODIS, hay 317 cuadrantes con píxeles de tierra de los cuales 286 contienen píxeles con vegetación. Para MOD16 ETr, se excluyen además 31 cuadrantes sin píxeles de vegetación, que están situados en altas latitudes más allá de 80° N y 60° S. En la Figura 4 se muestra remarcado en rojo los cuadrantes h12v12 y h13v13, que fueron los que se descargaron de WWW1 para utilizar en este trabajo.

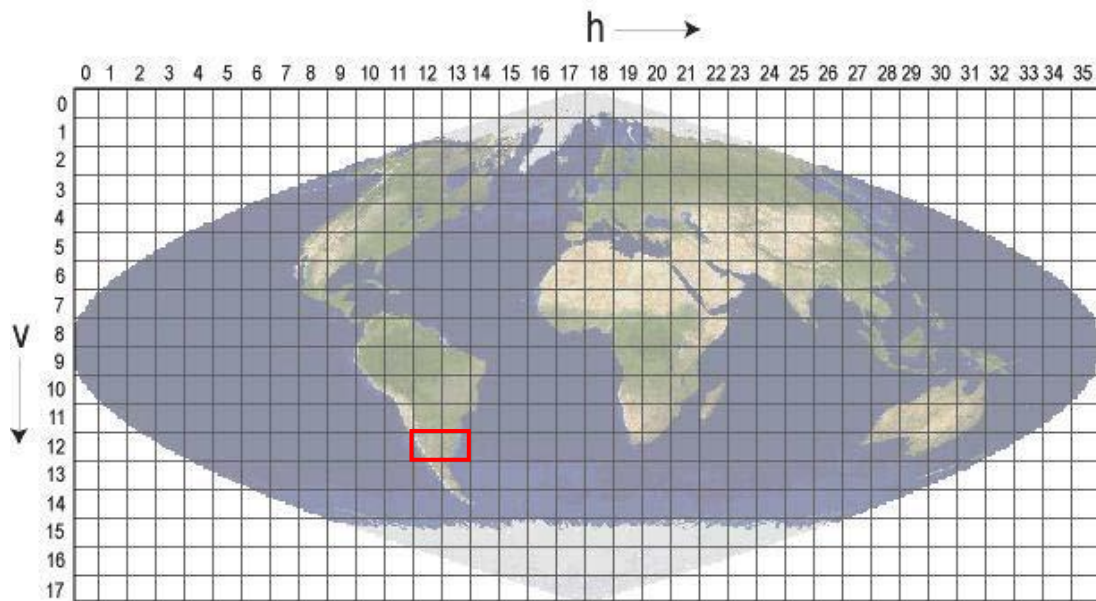


Figura 4. Mosaico global para MOD16. En rojo, sección descargada de WWW1 para este estudio.

En lo referente a los datos del producto, cuando se trata de MOD16_A2 8 días, posee un tamaño de 1200 x 1200 píxeles, contiene cinco variables, incluyendo ETr_1km, LE_1km, ETp_1km, LEp_1km y ET_QC_1km. Las primeras cuatro variables están contenidas dentro de 2 bytes y la última en 1 byte, por lo tanto, las cinco variables tienen nueve bytes. Entonces, en teoría, para un año (46 8-días) 286 cuadrantes de 1 km de datos globales, tendrán un tamaño igual a $9 * 1200 * 1200 * 286 * 46 = 0,17$ TB. Gracias a la potente capacidad de compresión interna de HDF, sólo se requiere un 17% de tamaño del HDFEOS luego de comprimir los archivos. Como resultado, el MOD16_A2 global de 8 días requiere aproximadamente 30 GB por año.

El MOD16_A2 mensual solo contiene ETr_1km, LE_1km, ETp_1km, LEp_1km que tienen los mismos tipos de datos que las cuatro variables correspondientes, en el producto MOD16_A2 de 8 días. En teoría, durante un año, el tamaño total de los datos debería ser $8 * 1200 * 1200 * 286 * 12 = 40$ GB. Después de la compresión interna, se requiere aproximadamente el 20% del tamaño, y el MOD16_A2 mensual global requiere aproximadamente 8,1 GB por año.

En lo que respecta a MOD16_A3 (producto anual), contiene cinco variables, incluyendo ETr_1km, LE_1km, ETp_1km, LEp_1km, ET_QC_1km, que al igual que para MOD16_A2 de 8 días, ocupan 9 bytes, por lo que para un año, el tamaño de los datos debe ser $9 * 1200 * 1200 * 286 = 4$ GB, y la compresión interna resulta en 0,9 GB de MOD16_A3 global para cada año.

En total, para cada año, el producto MOD16 ET requiere $30 + 8,1 + 0,9 = 39$ GB. Durante 11 años entre 2000 y 2010, hay aproximadamente 429 GB de datos para el producto global MOD16_A2/A3.

Capítulo III. Metodología

III.I. Preparación de los datos del lisímetro

Desde el año 2011 se obtiene la ETr mediante el lisímetro de pesada, en la estación perteneciente al Campus Universitario de la ciudad de Tandil. Allí se realizan mediciones puntuales del peso del lisímetro, obteniendo los valores en kilogramos (kg). Como describe Silicani (2015), el pesado se realiza suspendiendo la estructura con las cadenas ubicadas en la parte superior del cilindro, que están separadas a 120°. Los extremos de las cadenas se colocan a la parte inferior de una balanza digital (de capacidad máxima de 500 kg y mínima de 0,200 kg, cuyo error asociado es de $\pm 0,7$ mm) y la parte superior de la balanza es acoplada a una pluma hidráulica (capacidad máxima 2000 kg), como se puede observar en la Figura 5. Una vez acopladas todas las partes (Figura 6) se procede a elevar toda la estructura de manera lenta y verificando que no se produzcan roces sobre los costados del pozo que la contienen (Figura 7). Este procedimiento se repite tres veces para obtener una correcta medida realizando los siguientes pasos:

- 1- Se coloca la “pluma hidráulica”, de manera que al levantar la estructura esta quede totalmente suspendida en el aire, sin que haya ningún tipo de rozamiento con las paredes del pozo del lisímetro.
- 2- Una vez colocada la pluma, se cuelga la balanza (posee autonomía de 72 horas), se enciende y se espera unos minutos hasta calentar la resistencia interna (de no hacer esto se puede incurrir a errores en la medida del peso).
- 3- Cuando la balanza ya está colocada, encendida y puesta en cero (tarada), se colocan las cadenas de la estructura y se levanta suavemente (Figura 6), considerando nuevamente que no haya rozamiento y que, en el caso de que la pluma este por sobre la estructura del lisímetro, no levantar demasiado porque los pastos pueden provocar una resistencia que se traducirá en un peso falso (de acuerdo a información de los operadores del sistema puede ocasionar errores de entre 200 y 400 g). Esto se realiza tres veces como mínimo y de no haber anomalías, se reproducirá la misma lectura, de no ser así se deberán anotar las tres lecturas y sacar un promedio de las mismas, considerándola como lectura final.
- 4- En cada ocasión se lleva un cuaderno con las lecturas anteriores para tener en cuenta las medidas previas y en las condiciones climáticas que fueron tomadas, para así saber si los valores están dentro del rango de pesos determinados. En caso de haberse producido lluvias, se deberá anotar el valor de la precipitación medida en el pluviómetro.

Existen una serie de precauciones interesantes a tener en consideración para una correcta medida: 1) Que no se produzcan rozamientos con el entorno al lisímetro; 2) Esperar el tiempo de calentamiento del sistema electrónico de la balanza; 3) Poner la balanza en cero cuando está suspendida y sin las cadenas colocadas; 4) Colocar en las ruedas de la pluma maderas para que esta no se entierre y no cambiar el entorno de la cobertura vegetal de la parcela; 5) No pisar mucho en el entorno del lisímetro; 6) Considerar la existencia de los cables de los sensores de humedad de suelo (no pisarlos); 7) Al finalizar la medida, colocar la estructura del lisímetro en el centro del pozo, sin que roce con las paredes; 8) Verificar el entorno y tomar nota si hubiera anomalías; y 9) Si hubo registro de lluvias en el pluviómetro, anotarla y vaciar el recipiente.



Figura 5. Balanza acoplada a la pluma hidráulica



Figura 6. Pluma hidráulica acoplada a la balanza que sostiene las cadenas del Lisímetro



Figura 7. Lisímetro de pesada suspendido mediante una pluma hidráulica

Para determinar los valores ETr se obtiene la diferencia de masas existente entre dos pesadas consecutivas, a este resultado se lo multiplica por un factor de 0,27, para transformar los kg en mm. El paso siguiente es dividir ese valor por la cantidad de días existentes entre una pesada y la siguiente para obtener los mm evaporados por día. En el caso de que entre una pesada y otra existan lluvias, los mm se suman al total obtenido, si es que la pesada 1 es mayor que la 2, en caso contrario, las lluvias se restan para evitar sumar peso extra.

Como ya se ha dicho, el lisímetro opera desde Noviembre del 2011 a la actualidad, pero para este trabajo se tuvieron en cuenta los datos a partir de Abril del 2012 (debido a que el suelo dentro del lisímetro ya había logrado poseer las condiciones naturales e iguales a toda la parcela) y hasta Diciembre del 2013, y se eligieron estratégicamente las fechas de las pesadas, excluyendo los datos en los que hubo lluvias intensas los días previos, o cuando se realizaron tareas de mantenimiento en la parcela, para que esto no influya ni modifique los valores reales de la ETr.

En un principio, para el año 2012 se contaba con 12 datos, luego del filtrado se trabajó con 9 datos de distintas fechas desde Abril a Diciembre. Por su parte, para el 2013, inicialmente había 47 datos, que luego de aplicadas las restricciones establecidas, resultó un total de 30 datos de ETr entre Enero y Diciembre del 2013.

III.II. Procesado de las imágenes MODIS

Desde WWW1 se descargó el producto MOD16_A2 para las fechas seleccionadas. La zona de estudio abarca los cuadrantes h12v12 y h13v12 (Figura 4). Mediante el uso del *software* ENVI, con la herramienta “MODIS Conversion Toolkit” fueron reproyectadas, y posteriormente se las multiplicó por el factor de 0,1, para convertir los valores a magnitud física de ET (Mu *et al.*, 2013).

Para poder extraer los datos de ET de MODIS se realizaron ventanas de 3x3 km², en cuyo píxel central se encuentra la coordenada de cada estación. Se generaron Regiones de Interés

(ROIs) y se tomó la media de esas ventanas como ET real para la zona correspondiente al lisímetro y potencial para las estaciones de Azul, Pigüé, Bolívar, Junín, y General Pico.

III.III. Comprobación de la representatividad de las medidas *in situ* a escala MODIS

Debido a que MODIS posee una resolución espacial de 1 km, se decidió comprobar la representatividad de las medidas *in situ* dentro de las ventanas 3x3 km² mediante el uso del producto de reflectividades de Landsat 7 (“*Landsat Surface Reflectance Higher-Level Data Products*”, descargado de WWW2), se tomaron las 6 bandas que posee en el visible e infrarrojo cercano (VNIR), se realizó la conversión a reflectividad de banda aplicando la Ecuación 2 para transformar las cuentas digitales (CD) a reflectividades (ρ):

$$\rho = \text{gain} \times \text{CD} + \text{offset} \quad (2)$$

donde gain y offset son parámetros que se encuentran en el archivo .MTL correspondiente a la imagen. Ésta ecuación se programó en la herramienta Band Math de ENVI.

Se descargaron cuatro imágenes del año 2013 (una por cada estación del año), para cada estación meteorológica. Se reprodujeron las ROIs creadas sobre las imágenes MODIS en las de Landsat, en primera instancia se convirtieron las ROIs en vectores para poder representarlas sobre las imágenes Landsat, luego nuevamente a ROIs y se tomaron los valores medios y desviaciones estándares de los valores de ρ . Posteriormente se calculó el valor del NDVI mediante la Ecuación 3, con la finalidad de determinar los contrastes de vegetación en la superficie.

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (3)$$

donde ρ_4 es la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano (banda 4), y la ρ_3 es la reflectividad de la banda perteneciente al rojo (banda 3) para el sensor ETM+.

III. IV. Comparación de datos de teledetección con medidas *in situ*

Para evaluar la respuesta del producto MOD16 se utilizaron medidas *in situ* de las diferentes estaciones meteorológicas ya nombradas. Se tomaron las bandas de ETr y ETp del producto y a la primera se la comparó con la parcela que contiene un lisímetro de pesada, y a la segunda con los datos provenientes de la ORA perteneciente al Ministerio de Agroindustria de la Nación Argentina.

Se obtuvieron los valores de ET para las distintas estaciones con la utilización del *software* ENVI, extrayendo la media de cada ventana. Se compararon los datos en gráficos ETr_lisímetro vs DOY y ETr_MOD16_A2 vs DOY, lo mismo con la ETp_ORA. La bondad del producto se evaluó cuantitativamente mediante el uso de la Me, la RSD según la Ecuación 4 (Wilrich, 2007) y el R-RMSE que se calcula como se muestra en la Ecuación 5. También se tuvo en cuenta el coeficiente de determinación (R^2), obtenido al enfrentar en una gráfica la ETr_lisímetro con ETr_MOD16 y la ETp_ORA con la ETp_MOD16_A2.

$$RSD = 1.483 \cdot \text{Mediana}(|(y-x)j - \text{Mediana}((y-x)j)|) \quad (4)$$

donde 1,483 es un factor de corrección, y es el valor de ET estimado por la imagen MODIS y x el valor de ET *in situ*.

$$R - RMSE = \sqrt{RSD^2 + Mediana^2} \quad (5)$$

donde RSD corresponde a la desviación estándar robusta.

Capítulo IV. Resultados y Discusión

IV.I. Representatividad de las medidas *in situ* a escala MODIS

En la Figura 8 se muestra la comparación de los valores de NDVI entre el píxel Landsat de 30 x 30 m² que contiene cada estación y la ventana 3x3 km² (de MODIS) de la misma zona para las diferentes fechas disponibles.

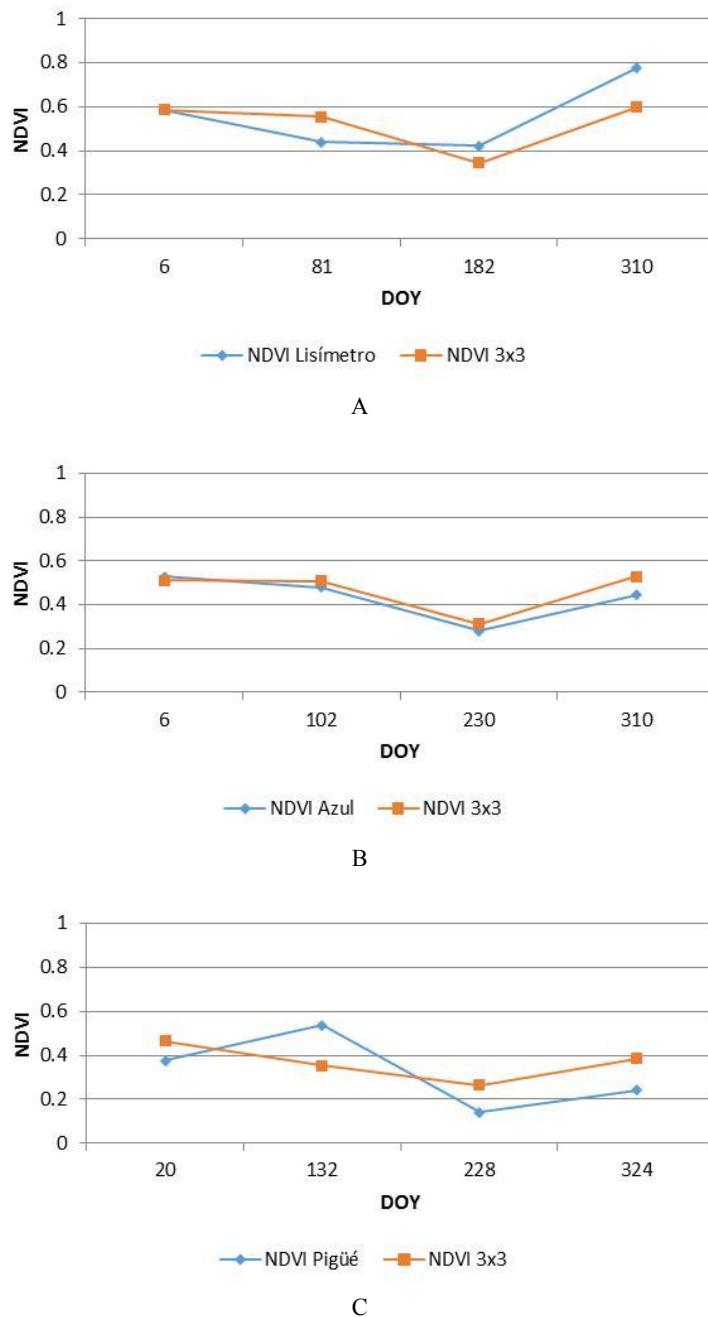
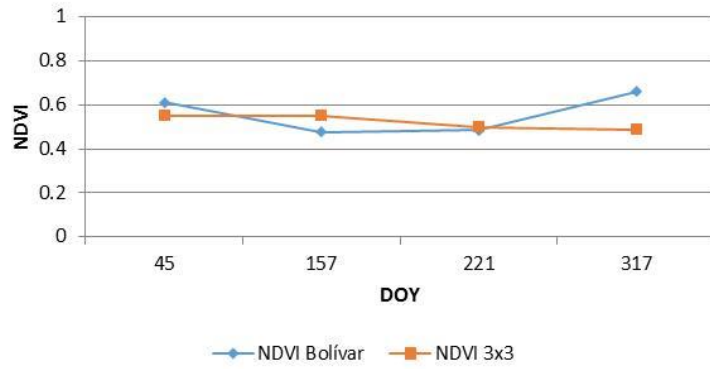
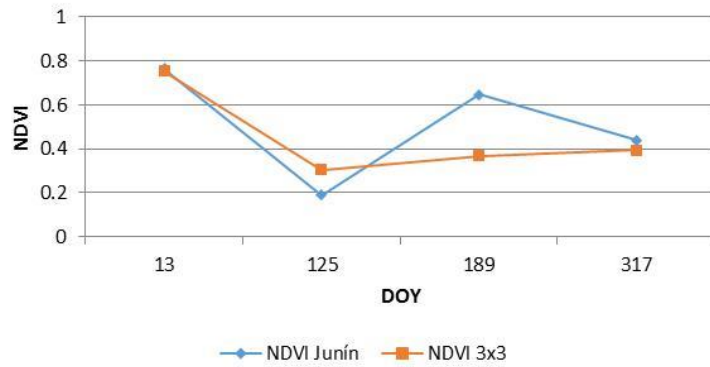


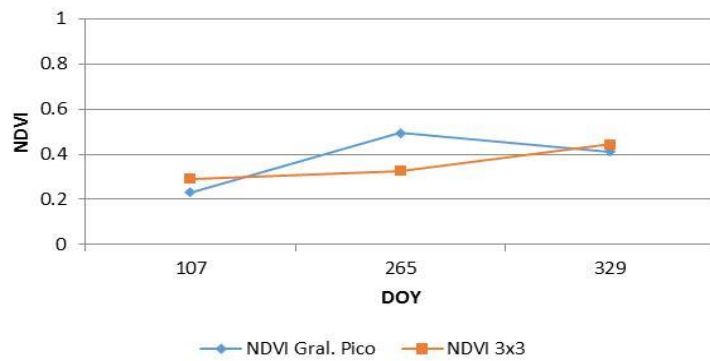
Figura 8. Comparación NDVI para el año 2013 en Lisímetro (A); Azul (B); Pigüé (C), Bolívar (D), Junín (E) y General Pico (F)



D



E



F

Figura 8. Comparación NDVI para el año 2013 en Lisímetro (A); Azul (B); Pigüé (C), Bolívar (D), Junín (E) y General Pico

Como se puede determinar en la Figura 8A, para el año 2013 se observa que para verano casi no hay diferencias entre el píxel del lisímetro y la ventana 3x3 km² MODIS, hay diferencias pequeñas para otoño e invierno, y mayores diferencias en primavera, cuando el lisímetro está bastante más vegetado (más verdor, mayor NDVI) que el entorno (3x3 MODIS). En Bolívar y Azul, Figura 8B. y 8D, la diferencia de NDVI es mínima para todas las estaciones, incrementándose en la primavera. El gráfico de la Figura 8C muestra que, para Pigüé, hay una mayor diferencia de NDVI en las estaciones de otoño y primavera. En el caso de Junín (Figura 8E), presenta una mayor diferencia de NDVI en invierno, debido a que para el píxel de 30 x 30 m² aumenta. Con respecto a General Pico (Figura 8F), el producto de Landsat se encontró nublado durante el año 2013, por lo que se han mezclado estaciones con el 2012, asimismo los valores de NDVI en primavera son más altos que en las demás estaciones.

En general, en los gráficos de las Figura 8A-F., el NDVI tiende a ser mayor en los meses de primavera, así como la diferencia entre ambas curvas. Mientras que para el resto del año, las diferencias son menores, y el NDVI disminuye.

Una de las métricas estadísticas obtenidas para los datos de reflectividad es la desviación estándar (SD); con ella se puede determinar el grado de variación existente entre los valores de cualquier variable. En la Figura 9 se muestra la variación de la SD para cada zona de estudio y las diferentes estaciones del año.

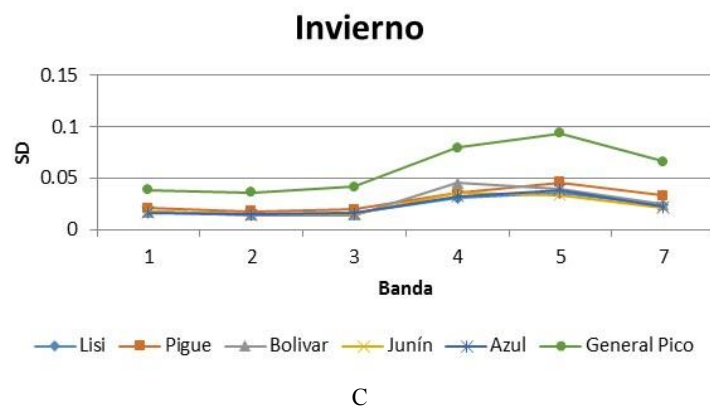
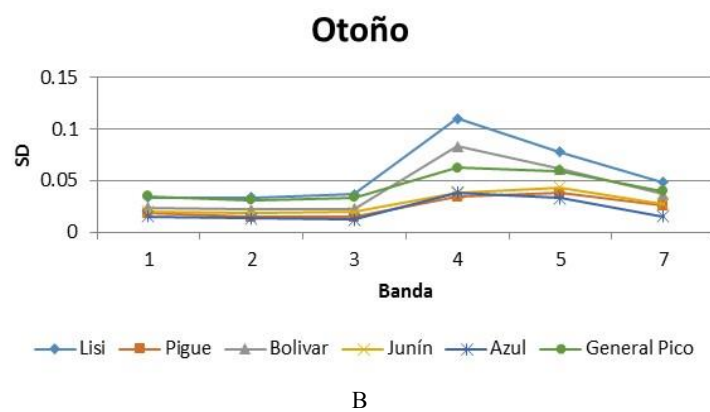
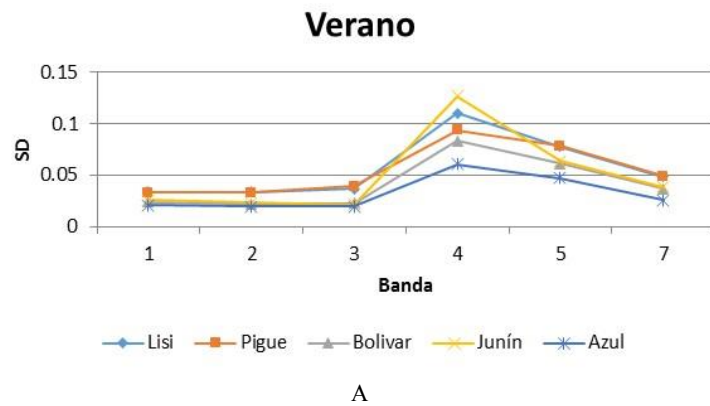


Figura 9. SD para los datos de ρ para las distintas estaciones en A. Verano, B. Otoño, C. Invierno; D. Primavera

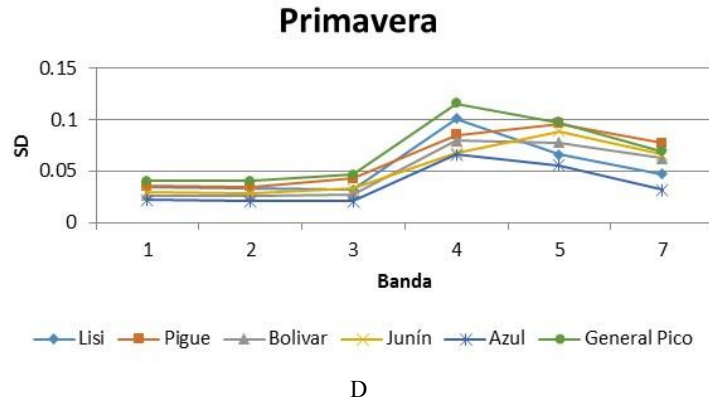


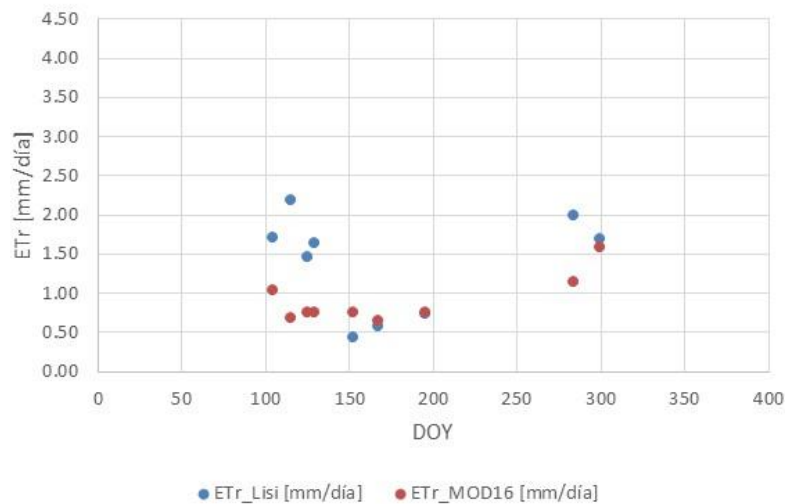
Figura 9. SD para los datos de ρ para las distintas estaciones en A. Verano, B. Otoño, C. Invierno; D. Primavera

Los datos de SD son importantes para obtener el grado de heterogeneidad de la zona que cubre los $3 \times 3 \text{ km}^2$ de MODIS. En este sentido, como se observa en las Figura 9A-D, hay zonas como Azul, Bolívar y Junín, en las que los datos de SD en términos relativos a los valores de reflectividad son inferiores al resto, es decir, en estas estaciones la medida puntual de la estación correspondiente es más representativa de su entorno. Distinto sucede en el caso de General Pico, donde se observa una SD mayor a las demás estaciones, asimismo, la parcela 3×3 que contiene al lisímetro que posee una heterogeneidad mayor, principalmente en otoño. Mientras que la SD para la zona de Pigué es menor al resto en otoño e invierno.

IV. II. Comparación entre MOD16_A2 y las medidas *in situ*.

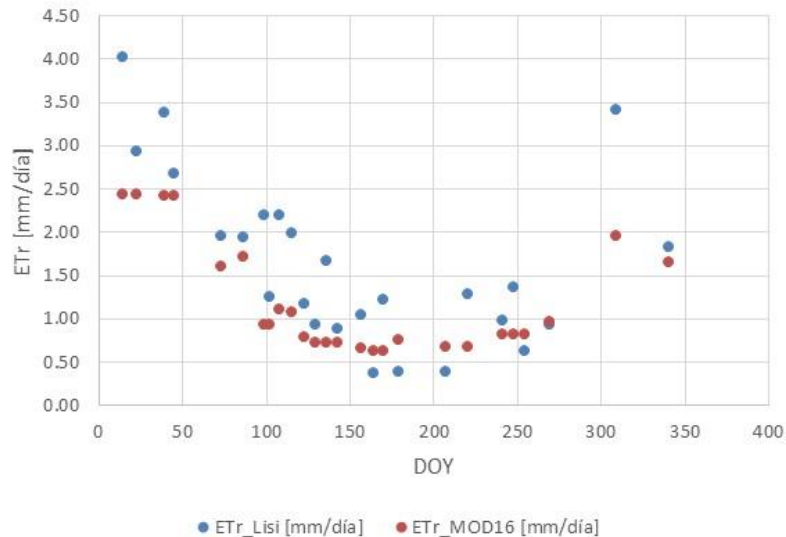
IV.II.I. Lisímetro vs MOD16_A2

Al relacionar el producto MOD16_A2 con el lisímetro, se obtienen dos gráficas, una para el año 2012, que se observa en la Figura 10A., y la otra para el año 2013, que se muestra en la Figura 10B.



A

Figura 10. Comparación temporal de los valores de ETr medidos y los observados en el producto MOD16_A2 para los años 2012 (A) y 2013 (B)



B

Figura 10. Comparación temporal de los valores de ETr medidos y los observados en el producto MOD16_A2 para los años 2012 (A) y 2013 (B)

La Figura 10A., representa la relación de la ETr entre los datos medidos mediante el lisímetro de pesada y los obtenidos de MOD16_A2, para el año 2012. Al comparar los valores de ETr, se puede observar que, en la mayoría de los días, el lisímetro muestra valores mayores que los que indica MOD16_A2. En la Figura 10B. se muestra la ETr de la relación Lisímetro-MOD16_A2 para el año 2013. Al igual que en el caso anterior, los datos obtenidos por el método de pesada diferencial son mayores, en la mayoría de los días, respecto a los de MOD16_A2.

Tanto en 2012 como en 2013, como es natural, la tendencia general de la disposición de los datos es que disminuyen los valores de ETr en los DOYs pertenecientes al período invernal, y aumentan cuando se trata de la época estival.

La Figura 11 relaciona los valores de ETr medidos con Lisímetro vs los determinados con MOD16_A2 para los dos años. Se observa que esta relación posee un R^2 de 0,69, por lo que la correlación entre los datos es del 69%.

En el gráfico de la Figura 12 se muestra la variación de los promedios estacionales de la ETr estimada mediante el lisímetro de pesada y a través del producto MOD16_A2. Se puede observar que los datos de Lisímetro son mayores que los que presenta MOD16_A2 en todas las estaciones del año y para los dos años. En ambos casos (lisímetro y MOD16_A2) los valores de ETr son mayores en 2013 en comparación a 2012.

Se han calculado los valores de la mediana de la diferencia entre los valores de satélite y los observados (Me), RSD y el R-RMSE para la relación existente entre los datos de ETr del Lisímetro con los del producto MOD16_A2 para las cuatro estaciones del año (ver Tabla 3). Se observa que los valores de la Me son en su mayoría negativos, indicando subestimación en los resultados. Para la primavera del 2013 la RSD es mayor que para el 2012 y el R-RMSE es más alto en otoño que en las demás estaciones tanto para el 2012 como para el 2013, seguido de la primavera, verano y finalmente invierno.

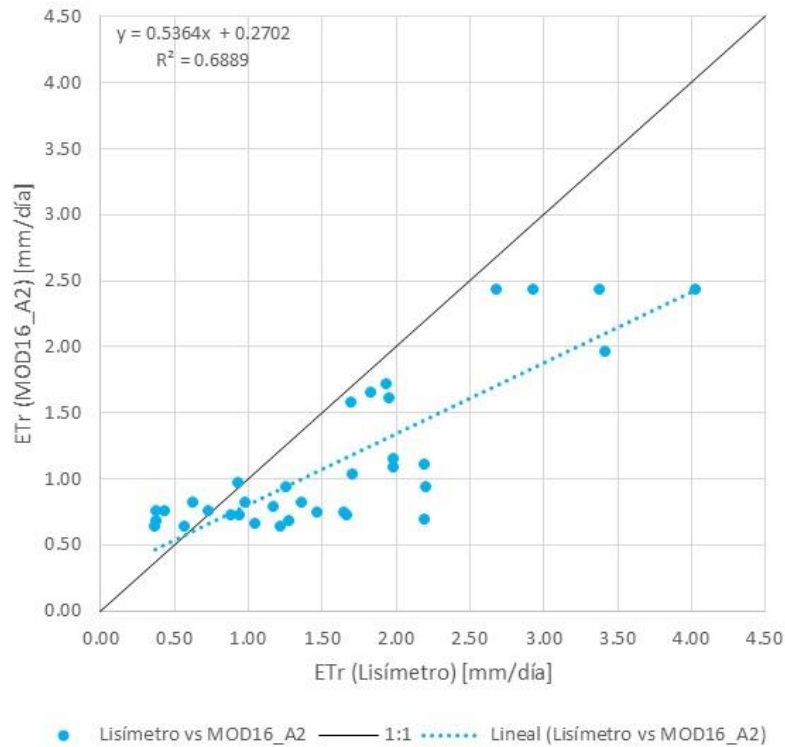


Figura 11. Comparación entre datos de Lisímetro vs MOD16_A2 de ETr.

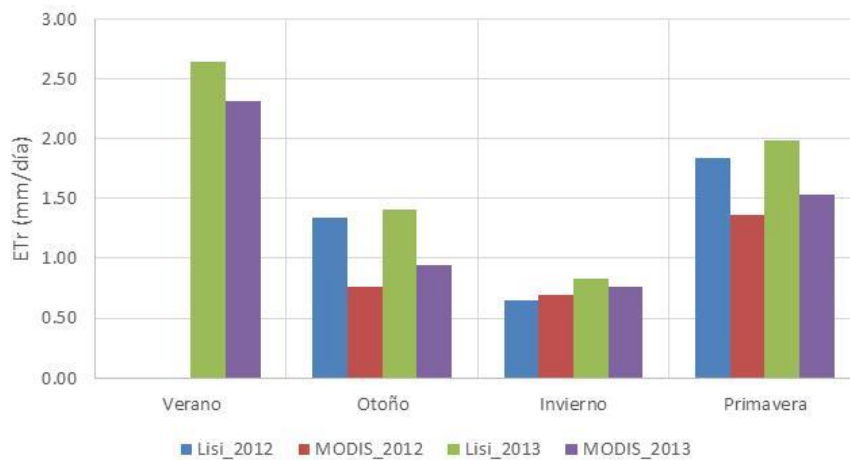


Figura 12. Variación estacional de los valores promedio de ETr para Lisímetro y MOD16_A2 en los años 2012 y 2013

Tabla 2. Me (mm/día), RSD (mm/día) y RMSE (mm/día) estacional para los datos de ETr para la relación Lisímetro-MOD16_A2

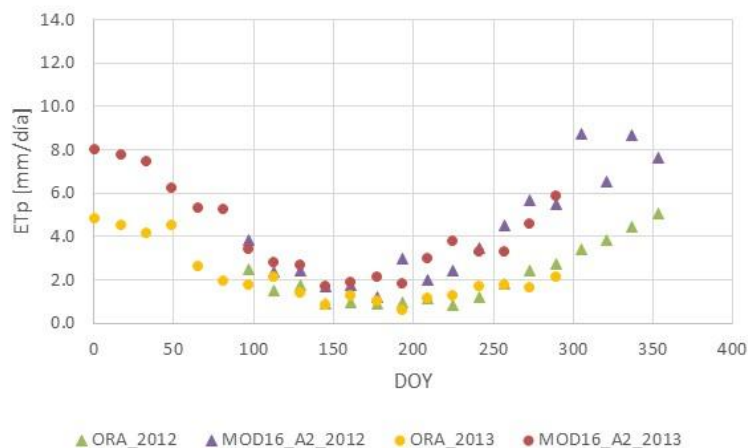
Estación	2012			2013		
	Me	RSD	R-RMSE	Me	RSD	R-RMSE
Verano				-0,49	0,3	±0,6
Otoño	-0,70	0,3	±0,8	-0,38	0,2	±0,4
Invierno				0,02	0,2	±0,2
Primavera	-0,48	0,2	±0,5	-0,18	0,5	±0,5
Anual	-0,68	0,3	±0,7	-0,36	0,2	±0,4

IV.II. ORA vs MOD16_A2

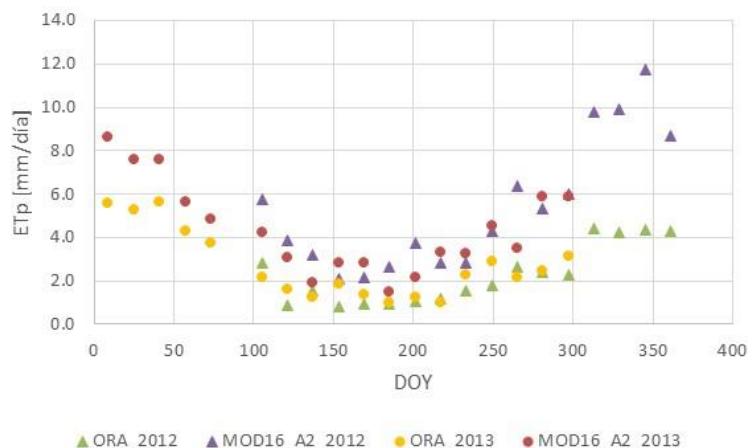
En las Figura 13A-E. se muestra la relación entre los datos de ETp provenientes de ORA y de MOD16_A2 para los años 2012 y 2013. Conviene aclarar que para el 2012 se toman DOYs intercalados entre el 97 y 361, y para el año 2013 se tomaron fechas comprendidas entre el DOY 1 y el 297.

En general, en las Figura 13A-E, se observa la misma tendencia en cuanto a la relación entre ORA y MODIS. En los cinco casos, MOD16_A2 sobreestima la evapotranspiración, ofreciendo valores entre 1,4 y 12,8 mm/día, mientras que los valores que determina ORA oscilan entre 0,6 y 5,2 mm/día para el año 2012. Por su parte, para el año 2013, los valores determinados por MOD16_A2 varían entre 1,5 y 8,7, mientras que ORA muestra valores significativamente menores, de entre 0,6 y 5,8. En ambos años los datos de MOD16_A2, en general, duplican a los de ORA.

En ambos casos, la distribución de los datos de ETp poseen una tendencia de aumento hacia los DOYs pertenecientes a los meses de primavera/verano, época del año en la que las temperaturas aumentan, así como la radiación neta, generando un aumento en la ETp. Asimismo se puede observar que la diferencia entre medidas del mismo año se incrementa en los meses de primavera/verano, lo que puede ser debido al mismo fenómeno.

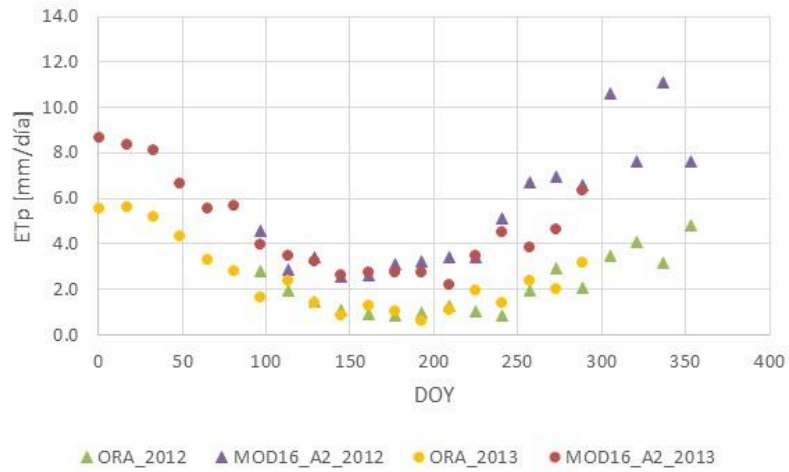


A

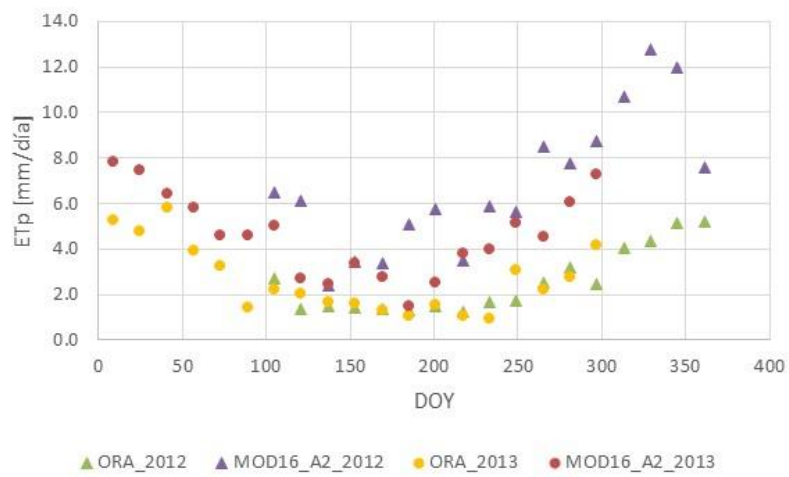


B

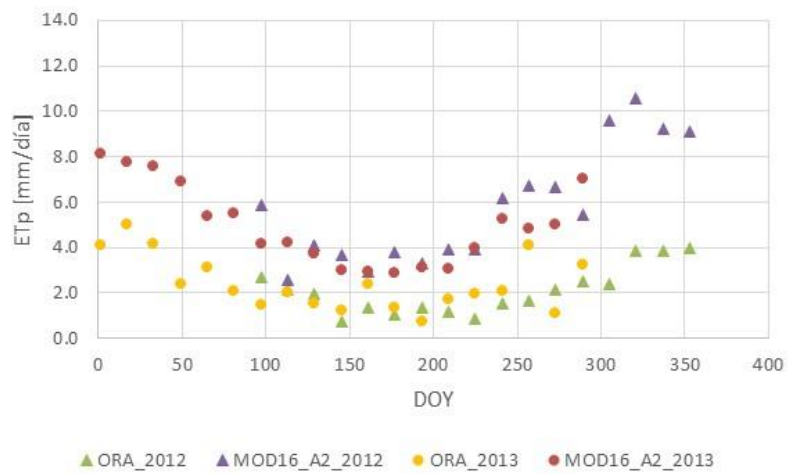
Figura 13. Comparación temporal de los valores de ETp medidos y los observados en el producto MOD16_A2 para 2012 y 2013 en Azul (A), Pigüé (B), Bolívar (C), Junín (D), General Pico (E).



C



D



E

Figura 14. Continuación- Comparación temporal de los valores de ETp medidos y los observados en el producto MOD16_A2 para 2012 y 2013 en Azul (A), Pigüé (B), Bolívar (C), Junín (D), General Pico (E).

La Tabla 3 refleja la Me, los coeficientes de determinación y RSD obtenidos para la relación de los datos de ETp determinados por la ORA y por los procesados en el producto MOD16_A2. Para el año 2012 se observa que el R² oscila entre 0,58 y 0,93, lo que indica una correlación alta entre ambos métodos, siendo mayor en Pigüé y menor en la zona de Bolívar. En lo referente a la RSD se puede observar que varía entre 2,0 para Junín, seguido por General Pico, Pigüé Bolívar y Azul, con 1,0. Para el 2013, el R² varía entre 0,6 y 0,92, siendo mayor en Junín y menor en General Pico. La Me y la RSD otorgan valores menores que el año anterior. Los valores de la Me son positivos en ambos años, lo que indica una sobreestimación por parte MOD16_A2.

Tabla 3. Me (mm/día), coeficientes de determinación y RSD (mm/día) de ETp entre ORA y MOD16_A2 para los años 2012 y 2013.

Estación	2012			2013		
	Me	RSD	R ²	Me	RSD	R ²
Azul	2,05	1	0,84	1,68	0,8	0,83
Pigüé	2,92	1,4	0,93	1,44	0,7	0,87
Bolívar	2,34	1,1	0,58	2,24	1,1	0,92
Junín	4,21	2,0	0,68	2,11	1	0,72
General Pico	3,07	1,5	0,64	2,40	1,2	0,60

La Figura 15 muestra un gráfico con la relación entre ET₀ (ORA) y ETp (MOD16) para el año 2012. Se puede observar que los puntos se muestran en su totalidad distribuidos por encima de la línea de tendencia, lo que indica una sobrestimación por parte de MOD16_A2, especialmente cuando los datos de ORA están en el rango entre 0-6 mm/día. El valor de R² para resulta de 0,70, lo que determina un 70% de correlación entre los datos de ambos métodos de determinación de ETp.

En la Figura 16 se observa la relación de ETp para los datos de ORA vs MOD16_A2 en este caso para el año 2013. La correlación general existente entre estos dos métodos para el año 2013 es de un 78%, dado que el valor de R² es de 0,78.

Si se retoman los resultados de la sección IV.I y se comparan los resultados de heterogeneidad dentro de las ventanas 3x3 píxeles de MODIS, con las diferencias observadas ahora en términos de ET entre las medidas *in situ* (lisímetro y ORA) y los valores del producto MOD16_A2, se puede concluir que existe una relación más o menos directa, es decir, que a medida que la diferencia entre las curvas de NDVI o de reflectividades aumenta, también lo hacen las diferencias de ET₀ y ETr, lo que sucede en mayor proporción en los meses de primavera. Este hecho es indicativo de que parte de las discrepancias observadas en términos de ET podrían justificarse por la falta de representatividad de las medidas *in situ* dentro del área cubierta por el producto de MODIS.

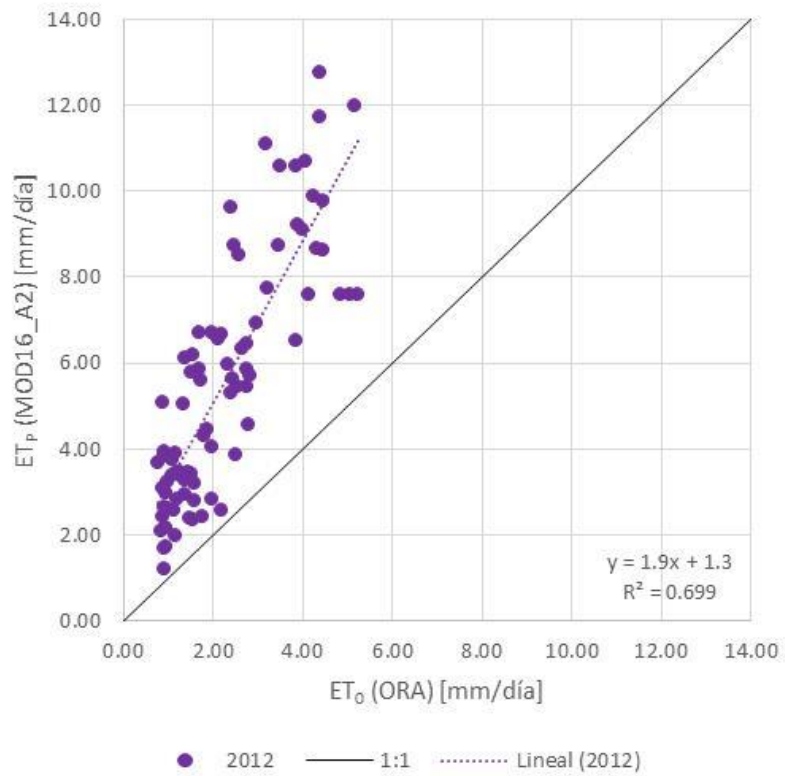


Figura 15. Comparación entre datos ORA vs MOD16_A2 para ET_p del año 2012.

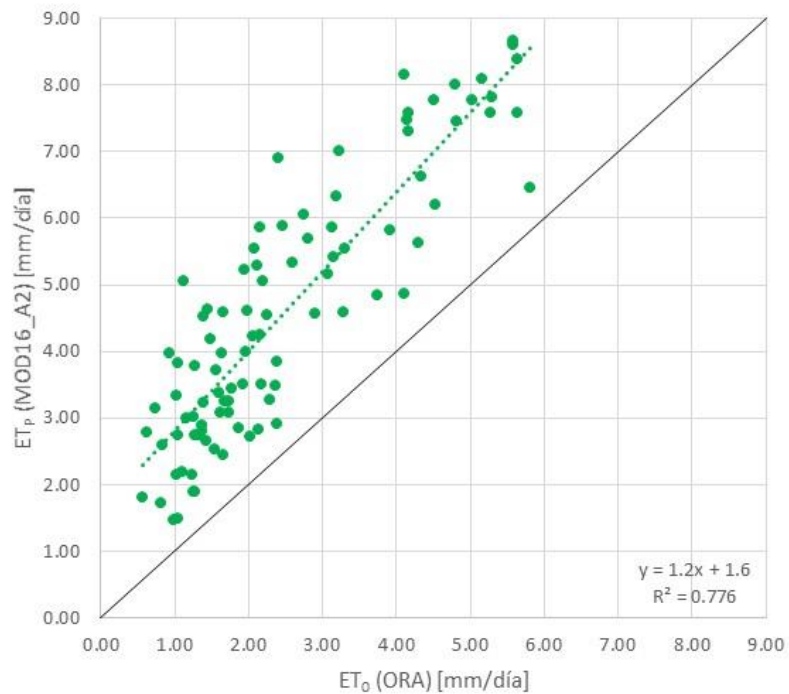


Figura 16. Comparación entre datos ORA vs MOD16 para ET_p del año 2013.

Durante los últimos años, varios autores han evaluado el rendimiento del producto MOD16_A2 en diferentes partes del planeta, basado en la comparación con mediciones de torre. Kim *et al.* (2012), a partir de los datos recogidos en veinte torres de flujo en Asia verificaron el comportamiento del producto MOD16_A2, sin tener en cuenta los errores causados por la clasificación errónea de la cubierta terrestre de MODIS. Los resultados indicaron que, la fiabilidad del producto MOD16_A2 no podía considerarse lo suficientemente fuerte como para predecir la evapotranspiración del cultivo a través de los entornos investigados.

Investigaciones similares se llevaron a cabo en Brasil por Ruhoff *et al.* (2013), en dos puntos de la cuenca del Río Grande, uno caracterizado por una plantación de caña de azúcar y el otro cubierto por vegetación natural de sabana para el año 2001. La comparación entre el promedio de 8 días de las estimaciones del producto de ET MOD16_A2 y las mediciones de las torres de flujo produjeron correlaciones de 0,78 a 0,81, con R-RMSE de $\pm 0,78$ y $\pm 0,46$ mm/día, en la plantación de caña de azúcar y la sabana, respectivamente. Estos autores evidenciaron que el algoritmo es más preciso durante las estaciones secas en comparación con las estaciones húmedas, probablemente debido a los efectos de la cobertura de nubes que podrían haber afectado al producto MOD16_A2.

Una subestimación significativa en ETr fue reconocida más tarde por Ramoelo *et al.* (2014), en las condiciones semiáridas de la sabana africana, así como por Hu *et al.* (2015) en regiones áridas y semiáridas de Europa. Por otro lado, los mismos autores observaron un mejor desempeño de este producto MODIS en sitios europeos situados en climas templados y completamente húmedos (Hu *et al.*, 2015).

En su trabajo, Barraza Bernardas (2014), determinó que el producto MOD16_A2 para las áreas de bosque decíduo de la zona del Río Bermejo (en el Norte del Chaco Seco Argentino), subestima la ET durante toda la temporada de crecimiento. También se observó que para muchos casos hay subestimación para valores bajos de ET y una sobreestimación para valores altos de ET, o sobreestimaciones de ET para todo el ciclo anual. Puede ser posible mejorar el producto MODIS ET a nivel global usando datos meteorológicos de mejor calidad, también sería útil considerar métodos alternativos para la estimación precisa de otras variables, como ser la conductancia estomática.

Autovino *et al.* (2016), obtuvieron estimaciones precisas de la ETr, basándose en la aplicación directa de PM. En particular, las medidas de “*Eddy Covariance*” de ETr, asociadas a LST obtenidas por la serie temporal MODIS (MOD11_A2) caracterizada por resolución de 8 días, permitieron calibrar un modelo simple de resistencia superficial, basado en dos años de observaciones de datos recogidos de forma bastante homogénea en el distrito de riego de Sicilia, donde el olivar es la principal cosecha. El modelo fue validado por una base de datos independiente recogida en cuatro años diferentes (2011-2014). La comparación entre los flujos de ETr medidos y modelados mostró que el modelo propuesto se caracteriza por una precisión aceptable para fines prácticos, con un R-RMSE medio de $\pm 0,52$ mm/día para todo el período de validación. Además, la comparación entre los valores ETr recuperados por el producto MOD16_A2 muestran una subestimación en los valores de ETr, especialmente durante los períodos secos.

Como explican Autovino *et al.* (2016), las razones del mal desempeño reconocido del producto MOD16_A2 se relacionan principalmente con la variabilidad espacial de los datos de entrada requeridos por el algoritmo de recuperación que generalmente necesitan validación

específica del sitio, así como la determinación de los datos climáticos de la Oficina Global de Modelación y Asimilación (GMOO) (Ramoelo *et al.*, 2014, Kim *et al.*, 2012, Ruhoff *et al.*, 2013). Por lo tanto, es necesario desarrollar una parametrización local de los datos de entrada del modelo para obtener estimaciones más precisas de ETr (Ramoelo *et al.*, 2014).

Capítulo V. Conclusiones

Para determinar la representatividad de las medidas *in situ* de evapotranspiración real realizadas con un lisímetro a escala del producto de MODIS (MOD16_A2), se utilizó el producto de reflectividad de Landsat 7, calculando luego el NDVI. Este parámetro biofísico de superficie influye en los meses en los que transcurre la primavera, mientras que para las demás estaciones del año, el NDVI disminuye.

Se calculó la SD de los datos de reflectividad para cada parcela 3x3 km² para determinar el grado de heterogeneidad de las mismas para su comparación con las medidas *in situ*, mostrándose que en Azul, Bolívar y Junín la SD es inferior que en las demás estaciones, lo que indica que la medida puntual es más representativa de su entorno que en el resto.

Al comparar los resultados de heterogeneidad dentro de las ventanas 3x3 píxeles de MODIS, con las diferencias observadas ahora en términos de ET entre las medidas *in situ* (lisímetro y ORA) y los valores del producto MOD16_A2, se puede concluir que existe una relación más o menos directa, es decir, que a medida que la diferencia entre las curvas de NDVI o de reflectividades aumenta, también lo hacen las diferencias de ET₀ y ETr, lo que sucede en mayor proporción en los meses de primavera. Este hecho es indicativo de que parte de las discrepancias observadas en términos de ET podrían justificarse por la falta de representatividad de las medidas *in situ* dentro del área cubierta por el producto de MODIS.

En la relación Lisímetro-MOD16_A2, donde se comparan los valores de ETr, se obtiene una correlación entre ambas variables del 69%. El producto MOD16_A2 estaría subestimando los valores de evapotranspiración real, indicado también por el valor de la Me. Los valores de RSD son mayores en la primavera del 2013, y el valor del R-RMSE es mayor en otoño tanto para 2012 como para 2013.

Observando la relación de ORA con MOD16_A2, donde se compara la ETp, se concluye que los datos siguen la misma tendencia en ambos modelos, pero MOD16_A2 sobreestima la evapotranspiración, en más de un 50%. Los valores positivos de la Me también determinan la sobreestimación por parte de MOD16_A2. La RSD en 2012 varía entre 1,0 y 2,0 mm/día, siendo mayor en la zona de Junín, y disminuyendo para General Pico, Pigüé, Bolívar y finalmente Azul, lo que indica que, para Azul los valores de ETp son más homogéneos que en el resto de estaciones. En 2013, esta métrica es menor que en el año 2012, oscilando entre 0,70 mm/día en Pigüé y 1,2 mm/día en General Pico. La correlación observada entre los datos es del 70% y 78% para 2012 y 2013, respectivamente.

Este trabajo contribuye a reforzar las afirmaciones de los diferentes autores citados, resaltando discrepancias de los datos del producto MOD16_A2 con respecto a medidas locales en caso de este trabajo, observándose una subestimación de los valores de ETr y una sobreestimación de los valores de ETp de más del doble en comparación con datos *in situ*. Por tanto, los resultados de este estudio demuestran que hay que tener mucha cautela a la hora de utilizar datos de ET del producto MOD16_A2 en la zona de la región pampeana Argentina.

Capítulo VI. Bibliografía

Aboukhaled A., Alfaro A. and Smith M. (1982): *“Lysimeters FAO Irrigation and Drainage paper N°39”*, Rome, Italy.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998): *“Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements”*. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy..

Barraza Bernardas, V. D. (2015): *“Modelos y aproximaciones basadas en información satelital en microondas pasivas para la estimación de la evapotranspiración en áreas boscosas de la Cuenca del Río Bermejo”*. Tesis doctoral. Biblioteca Digital de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires.

Botella, O. y Campos, I. (1993): *“El agua en la planta. Agronomía del Riego”*. Ediciones Mundi-Prensa Universidad de Castilla La Mancha, Madrid, 239-298.

Brasa, A. (1997): *“Determinación mediante teledetección de la evapotranspiración en regadíos extensivos”*. Tesis doctoral, Universidad de Castilla La Mancha, Cuenca, España 167 pp.

Entraigas I., Rivas R. y Usunoff E. (2001): *“Intercepción y Distribución de la Precipitación bajo el Canopeo de Maíz”*. Revista de la Asociación Argentina de Agrometeorología, Vol. 1, 2 : 89-94.

Friedl, M.A., McIver, D.K., Hodges, J.C.F., Zhang, X.Y., Muchoney, D., Strahler, A.H. et al. (2002): *“Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. Remote”*. Sensing of Environment 83(1-2): 287-302.

Hu, G.C., Jia, L. and Menenti, M. (2015): *“Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011”*. Remote Sens. Environ. 156,510-526.

Inoue, Y. and Moran, M. S. (1997): *“A simplified method for remote sensing of daily canopy transpiration-a case study with direct measurements of canopy transpiration in soybean canopy”*. International Journal Remote Sensing, 18, (1): 139-152.

Jin, Y., Schaaf, C.B., Woodcock, C.E., Gao, F., Li, X., Strahler, A.H. et al. (2003): *“Consistency of MODIS surface BRDF/Albedo retrievals: I. Algorithm performance.”* Journal of Geophysical Research 108(D5): 4158.

Kim, H.W., Hwang, K., Mu, Q., Lee, S.O., Choi, M., (2012): *“Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia”*. KSCE J. Civil Eng. 16 (2), 229-238.

Monteith, J. L. y Unsworth, M. H. (1990): *“Principles of environmental physics”*. Edward Arnold, London, second edition, 291 pp.

Morello, J., Matteucci, S. D., Rodríguez, A. F., Silva, M. y de Haro, C. J. (2012): *“Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos”*. Buenos Aires, Argentina,

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Grupo de Ecología del Paisaje y Medio Ambiente. Orientación Gráfica Editora. Cap. 12, 341-495

Mu, Q., Heinsch F. A., Zhao M. y Running S.W. (2007): “*Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data*”. Remote Sensing of Environment, 111, 519-536.

Mu, Q., Zhao, M. y Running, S. W. (2011): “*Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm*”. Remote Sens. Environ., 115(8), 1781–1800, doi:10.1016/j.rse.2011.02.019.

Mu, Q., Zhao, M. and Running, S. W. (2013): “*MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3)*”. Algorithm Theoretical Basis Document. Collection 5. Numerical Terradynamic Simulation Group. College of Forestry and Conservation. The University of Montana.

Myneni, R. B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Glassy, J., Tian, Y. *et al.* (2002): “*Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data*”. Remote Sensing of Environment 83(1–2): 214–231.

Nadzri, M. I., y Hashim M. (2014): “*Validation of MODIS Data for localized spatio-temporal evapotranspiration mapping*”. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., 18(1), 012183, doi:10.1088/1755- 1315/18/1/012183.

Ocampo, D., Rivas, R, Silicani, M., Carmona, F, Holzman, M., y Mancino, C (2012): “*Estimación de la fracción evaporativa a partir de registros de humedad de suelo y un lisímetro de pesada*”. 8^{vo} Encuentro Internacional del E-ICES en Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Quattrocchio, M.E.; Borrromei, A.M., Deschamps, C.M., Grill, S.C. and Zavala, C.A. (2008): “*Landscape evolution and climate changes in the Late Pleistocene–Holocene, southern Pampa (Argentina)*”. Evidence from palynology, mammals and sedimentology. Quaternary International 181: 123-138

Ramoelo, A., Majazi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A. y Dziki, S. (2014): “*Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna*”. South Africa, Remote Sens., 6(8), 7406–7423, doi:10.3390/rs6087406.

Rivas, R. (2004): “*Propuesta de un modelo operativo para la estimación de la evapotranspiración*”. Tesis doctoral, Universidad de Valencia, Valencia, España 140 pp.

Rivas, R., Bayala, M., Carmona, F., Holzman, M., Degano, M. F. y Mancino, C. (2016): “*Adaptación del modelo de Rivas y Caselles para el cálculo de la evapotranspiración con datos del producto modis MYD11A2*”. Libro de actas: XVII Simposio Internacional En Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica SELPER. 7 al 11 de Noviembre. 1397-1404.

Rivas R., Caselles V. and Usunoff, E. (2002): “*Reference evapotranspiration in the Azul River Basin, Argentina*”. Actas XXXII AIH & VI ALHSUD Congress Groundwater and Human Development, pp. 693-700; E. Bocanegra, D. Martínez y H. Massone (Eds.), Mar del Plata, Argentina.

Rivas R. y Ocampo D. (2009): “*Comportamiento del balance de energía en un cultivo de Avena sativa L. Estudios en la Zona no saturada del Suelo*”, Vol IX O. Silva *et al.* Barcelona, 18 a 20 de Noviembre.

Ruhoff, A. L., Paz, A. R. Aragao, L. E., Mu, Q., Malhi, Y., Collischonn, W., Rocha, H. R. and Running, S. W. (2013): “*Assesment of the MODIS global evapotranspiration using Eddy Covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin*”. Hydrol. Sci. J. 58, 1-19, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.837578>.

Salomon, J., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Gao, F. and Jin, Y. (2006): “*Validation of the MODIS Bidirectional Reflectance Distribution Function and Albedo Retrievals using combined observations from the aqua and terra platforms*”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44(6): 1555-1565.

Schaaf, C. B., Gao, F., Strahler, A.H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T. *et al.* (2002): “*First operational BRDF, Albedo and Nadir Reflectance Products from MODIS*”. Remote Sensing of Environment 83: 135–148.

Silicani, M. R. (2015): “*Diseño, construcción y operación de un lisímetro de bajo costo*”. Tesis de especialización. Universidad de Cuyo, Argentina.

Teuling, A. J., Hirschi, M., Ohmura, A., Wild, M., Reichstein, M., Ciais, P., *et al.* (2009): “*A regional perspective on trends in continental evaporation*”. Geophysical Research Letters, 36, L02404.

Thornthwaite, C.W. (1948): “*An approach toward a rational classification of Climate*”. Geographical Review, 38: 55-94.

Weinzettel P. y Usunoff E. (2001): “*Cálculo de la recarga mediante aplicación de la ecuación de Darcy en la zona no saturada*”. En: A. Medina, J. Carrera y L. Vives (Ed.). Las caras del agua subterránea, serie hidrogeológica y aguas subterráneas, Tomo I, 225-232.

Wilrich, P.T. (2007): “*Robust estimates of the theoretical standard deviation to be used in interlaboratory precision experiments*” Accred. Qual. Assur., vol. 12, pp. 231–240.

WWW1: NTSG “Numerical Terradynamic Simulation Group”, “*Modeling and Monitoring Ecosystem Function At Multiples Scales*” (2013) <http://www.ntsug.umt.edu/project/mod16>, The University Of Montana.

WWW2: USGS “United States Geological Survey”, “*Science for a changing world*” (2017) <https://glovis.usgs.gov/next/>