



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNCUYO

Monografía Especialización en Riego y Drenaje

Título: Técnicas de Teledetección y datos climáticos de un cultivo de ajo
regado por pívot

Especialización en Riego y Drenaje

Tesista: Sofía Gigena

Director: Raúl Rivas

1. Título.....	1
2. Índice.....	2
3. Introducción y Antecedentes Bibliográficos.....	3
4. Formulacion y Fundamentación de la Propuesta.....	6
5. Objetivos de la memoria.....	9
Objetivos General.....	9
Objetivos Específicos.....	9
5.1 Hipótesis del trabajo.....	9
6. Metodología.....	10
6.1 Relación kc con índices de vegetación (IV).....	11
7. Area de Estudio.....	17
7.1 Materiales.....	17
8. Análisis de datos y resultados.....	20
8.1 Discusión de resultados y conclusiones.....	28
9. Bibliografía.....	31
10. Anexo.....	35

3. Introducción y antecedentes bibliográficos

El ajo se cultiva ampliamente en todo el mundo con una producción global de aproximadamente 26,5 millones de toneladas en un área cultivada de 1.450.000 ha. La producción de Europa es de 825.000 toneladas en 99.400 ha. En España la producción de ajo es de 170.000 toneladas sobre una superficie cultivada de 18500 ha, es decir rinde de 9,2 ton por ha ([FAO, 2016](#)); ([Campoy, 2019](#)).

Argentina se destaca como tercer exportador de ajo después de China y España. La producción Argentina de ajo ronda las 148 mil toneladas anuales, ocupando un área cosechada de 15.787 ha con un rendimiento promedio de 9,4 ton por ha. El principal destino de la producción es Brasil. ([Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2021](#)).

En la temporada 2021, en la provincia de Mendoza de las más de 17.000 hectáreas cultivadas con hortalizas de invierno, 11.000 corresponden a cultivo de ajo, lo que representa el 66% del total, según un informe del Instituto de Desarrollo Rural ([IDR, 2021](#)).

Mendoza atraviesa cada vez una sequía más extensa y profunda. En un año normal la cuenta hidrológica arroja 1390 hectómetros y en la anterior temporada, desde octubre 2021 hasta septiembre de 2022 se había alcanzado los 760 hectómetros según el pronóstico del [DGR \(Departamento General de Irrigación\)](#), por lo tanto, hay que evaluar para el futuro “de manera transparente” los recursos hídricos a suministrar a los distintos usuarios del agua como lo son la agricultura, la industria y **la sociedad**. Si bien hasta el momento se han llevado a cabo medidas para este fin, frente al cambio climático deberán implementarse diversas acciones para conceder los caudales en tiempo y forma a los diversos actores.

Por lo que es valioso incorporar tecnología y sistemas de monitoreo a distancia que recopilen datos que permitan anticiparse a las problemáticas y riesgos. Los datos recopilados, de las necesidades de riego y producción, temporada tras temporada permiten evaluar decisiones a largo plazo y no sólo respaldar las de corto plazo.

Las necesidades netas de riego se pueden establecer mediante un balance de agua, entre otros métodos, en el que los componentes principales en zonas áridas

son la evapotranspiración (ET), la precipitación y la variación del contenido de agua en el perfil de suelo explorado por las raíces (Allen et al., 1998).

. Otra manera de realizar este estudio es mediante un balance de energía de la superficie que determina como la radiación neta (R_n) se distribuye entre diferentes flujos de calor incluido el Latente (LE) (Brutsaert, 1982).

En cultivos hortícolas como “el ajo” con su sistema radicular poco profundo y el gran porcentaje de suelo desnudo conducen a la necesidad de aplicar riegos poco abundantes y frecuentes, y todo el ciclo **adolece de un control de la humedad de suelo** ya que es altamente sensible tanto al exceso como al déficit del agua.(Lipinski,2015).

Estos factores derivan en la necesidad de adaptar las ecuaciones más comunes de cálculo del coeficiente de cultivo (K_c) a partir de datos generados con información recopilada por sensores a bordo de plataformas de satélite para estos cultivos (Allen et al., 1998). (Plaza et al., 2018) calcularon las necesidades hídricas netas en ajo y cebolla a lo largo de todo el ciclo de cultivo mediante herramientas de teledetección en la provincia de Albacete (España), hallando resultados satisfactorios de las estimaciones de los **requerimientos de agua del cultivo de ajo** (ET_c del ajo) derivados de una estimación usando valores del índice de vegetación NDVI (índice de diferencia normalizada de vegetación) y de la ET_o (Evapotranspiración de referencia) (Allen et al., 1998).

La disponibilidad de imágenes satelitales en conjunto con el desarrollo de nuevas tecnologías como software para el procesamiento de datos masivos en la nube, bases de datos de información en internet, IOT (internet de las cosas) con sensores cada vez más económicos y con mayores capacidades de medir variables de interés ambiental (en particular las de mayor peso en el proceso de pérdida de agua del sistema como la temperatura, la cobertura y la precipitación entre otras), es posible incorporar el uso de estas herramientas para un número cada vez mayor de aplicaciones adaptadas a las necesidades de los usuarios en cuanto al aprovechamiento del agua que le permitirá aumentar en productividad, sustentabilidad y reducir el tiempo que se dedican en las tareas del riego, además del uso racional del recurso.

Tecnologías que costaban anteriormente una inversión significativa como utilizar cables para la comunicación de los datos a un nodo central que recopilaba la información, sensores de alto costo y la capacidad de almacenamiento físico eran difíciles de implementar, pero hoy se pueden aplicar fácilmente incluso sin costos. ***Los datos que se pueden obtener son valiosos ya que son disparadores de preguntas para encontrar oportunidades de mejora.*** Estas metodologías conllevan un proceso de recolección, integración y análisis que pueden permitir operatorias más eficientes, citando a Deming (1950) “*sin datos, no es usted más que otra persona con una opinión*”, la información está disponible para la creación de herramientas que nos conduzcan a un mejor entendimiento para la toma de decisiones basadas en datos.

Al centralizar la información de los predios se puede contar con una trazabilidad del riego de cada sector, precipitaciones, períodos de alta demanda evaporativa y otras variables importantes (por ejemplo, la velocidad del viento) permitiendo un manejo por ambientes.

4. Formulación y fundamentación de la propuesta

La observación sistemática de la tierra es la clave para pronosticar la evolución de los sistemas dinámicos terrestres ([Liang, 2008](#)). Conocer en detalle el comportamiento de estos sistemas tiene gran importancia en la predicción de escenarios futuros, convirtiendo entonces a la teledetección en una herramienta fundamental.

En Mendoza, su agricultura de oasis irrigada por fusión de nieve se encuentra amenazada en la mayoría de los escenarios de cambio climático ([Mussetta & Barrientos, 2015](#)). Durante la última década las zonas productivas de la región centro oeste de Argentina se encuentran en un contexto de crisis hídrica, producto de la escasez de precipitaciones níveas durante el periodo invernal ([Rivera et al., 2021](#)). Los cambios en la circulación de la atmósfera resultantes del cambio climático generan disminución de caudales y un funcionamiento diferente de los contaminantes del agua de riego del Cinturón Verde de Mendoza ([Cónsoli et al., 2018](#)).

La falta de agua es una realidad tangible y significativa presente en la mente de los productores. En los periodos de emergencia hídrica, condición frecuente en el último decenio, el gobierno de Mendoza en conjunto con el DGI (Departamento General de Irrigación) toman medidas, pero dentro de las mismas hay cada vez más recortes en el caudal de agua entregado a cada agricultor, luego de la constatación de una severa disminución de caudales (Pronóstico de caudales de los ríos de la provincia de Mendoza, 2021). Si bien se trata de una política de gran alcance que supone una reducción de la disponibilidad de agua para todos los usos, afecta principalmente al agua de riego para uso agrícola ([Mussetta & Barrientos, 2015](#)).

Desde esta perspectiva, este trabajo intenta aplicar datos e información que le ayuden al productor a monitorear la estimación de las necesidades hídricas del cultivo del ajo mediante la metodología FAO-ET_c ([Allen et al., 1998](#)). La evapotranspiración (ET) depende de la meteorología, tipo de cultivo y disponibilidad de agua en el suelo. La ET_o se determina a partir de variables meteorológicas (temperatura, humedad, viento y radiación solar) que controlan el proceso asumiendo un pasto corto en buenas condiciones y sin limitaciones de agua para el proceso ([Allen et al., 1998](#)).

La ETo calculada a partir de la temperatura y la radiación solar explican por lo menos el 80% de su variabilidad (Samani, 2000). La FAO recomienda alternativamente el método de HG (Hargreaves) cuando no se cuenta con datos confiables y cercanos de radiación solar, además de no disponer de valores de humedad relativa o velocidad del viento (Allen et al., 1998).

Se define la ET como el resultado del proceso por el que el agua pasa del estado líquido al gaseoso, bien directamente desde la superficie del terreno, o a través de las plantas, por ende, es la suma de la salida de agua del sistema por el proceso de Evaporación y de Transpiración. En la práctica, es difícil distinguir entre el agua evaporada a la atmósfera desde la superficie del suelo y la transpirada desde la cubierta vegetal, por lo que ambos procesos suelen presentarse de forma conjunta y se lo engloba bajo la denominación de evapotranspiración. La ET conecta los balances de agua y energía en la superficie del suelo (entendiendo a ésta como pérdida real de agua del sistema suelo planta atmósfera). Desde un punto de vista de energía la ET (denominado flujo de calor latente) es la energía empleada para transportar el vapor de agua desde el interior de las hojas o suelo a la atmósfera. En este caso es el flujo de calor latente es medido en unidades de energía siendo la unidad más común el W/m².

La ecuación operativa, en una dimensión, que gobierna el balance de energía viene dada por la forma en que se distribuye la radiación neta (Rn) a nivel de superficie, por medio del flujo de calor en el suelo (G), el flujo de calor sensible (H) y el flujo de calor latente (LE) (Brutsaert, 1982):

$$R_n + H + G + LE = 0 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Las determinaciones de Rn y G podrían estimarse con SR (sensores remotos), pero los valores de H y LE son difíciles de aproximar ya que se requieren mediciones con instrumental a veces no económicos y difíciles de usar. Por lo que la FAO adopta el modelo analítico de Penman-Monteith como una metodología de referencia para determinar la ET de los cultivos (extendido en la comunidad de regantes e ingenieros asesores). El método de FAO requiere la medición de variables atmosféricas (radiación solar, temperatura y humedad del aire, velocidad de viento) y de superficie (la disponibilidad del agua en superficie como una proporción). La proporción de suelo

y de vegetación (en relación con la cubierta de referencia) se englobaron en un coeficiente de cultivo empírico (k_c) el cual es la relación existente entre la ET del cultivo (ET_c) y la ET_o (adimensional, $k_c = ET_c/ET_o$). Por lo tanto, en el marco de este trabajo se busca el uso de datos disponibles en repositorios de variables atmosféricas para estimar la ET_o y datos de satélite para calcular el coeficiente de cultivo con la finalidad de lograr un método simple aplicable en la producción de ajo.

5. Objetivos de la memoria

Objetivo General

El objetivo es evaluar el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de ajo utilizando datos meteorológicos de repositorios de libre acceso y de imágenes satelitales para calcular el coeficiente de cultivo a partir de índices de vegetación para el período 2021/2022.

Objetivos Específicos

- Evaluar las aptitudes de los datos MERRA2¹ frente a las medidas de 2 estaciones meteorológicas cercanas al predio donde se ubica el cultivo productivo para estimar la evapotranspiración ET_o .
- Utilizar datos obtenidos por el satélite Sentinel-2 para evaluar el control del cultivo sobre el proceso de evapotranspiración del cultivo de referencia, mediante la determinación del coeficiente de cultivo (K_c)
- Evaluar la aptitud de los datos GEE² para la obtención de índices de vegetación
- Probar el cálculo de la ET_c determinando el K_c con funciones lineales dependientes del valor de NDVI
- Comparar los resultados de ET_c de ajo utilizando la metodología in situ y con tanque Tipo A versus ET_c satélite (ET_o con datos atmosféricos y K_c con datos de satélite).
- Calcular el error cuadrático medio (ECM) entre los valores obtenidos por SR y los medidos en tanque Tipo A.

5.1 Hipótesis del trabajo

Los datos atmosféricos y los índices de vegetación obtenidos por los sensores remotos permiten estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) en áreas productivas de ajo, con un error cuadrático medio (ECM) aceptable para su uso en la gestión agrícola y del riego.

¹ Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2

² Google Engine Earth

6. Metodología

Para el cálculo de la ETo existen diversos procedimientos. ([Jensen et al., 1990](#)) clasifican las ecuaciones de cálculo de ET en función de los datos requeridos para la estimación con la siguiente estructura:

- **Temperatura:** ecuaciones de Hargreaves (HG), Blaney-Criddle y Thornthwaite.
- **Radiación:** Makkink.
- **Temperatura y radiación:** ecuaciones de Presley-Taylor, Jensen-Haise.
- **Temperatura, radiación, humedad relativa y velocidad de viento.**

A este grupo pertenecen las ecuaciones de combinación derivadas de Penman (1948) como la de Penman-FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) y la de Penman-Monteith ([Allen et al., 1998](#))

La estimación de ETo con la ecuación de HG es óptima en zonas áridas ([Ocampo & Rivas, 2010](#)) y será la que se aplicará en el marco del presente trabajo (Ecuación 2).

$$ET_o \text{ [mm día}^{-1}\text{]} = 0,0135 \cdot (T_a + 17,78) \cdot R_s \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo

T_a la temperatura del aire (°C)

R_s la radiación solar (mm día⁻¹)

Para integrar la información de satélite se usa el coeficiente de cultivo que se deriva usando un método dual el cual permite acercarnos a la estimación de la evapotranspiración como la suma por un lado de la transpiración, o flujo de agua a través de la planta, y por otro de la evaporación desde la fracción de suelo desnuda.

Para ello se introduce el coeficiente de cultivo basal K_{cb} como el cociente entre la transpiración de una cubierta en ausencia de estrés y la evapotranspiración de referencia, así como un coeficiente evaporativo K_e que recoge la evaporación desde el suelo desnudo. Por lo tanto, la expresión de la ET de un cultivo se expresa como ([Allen et al., 1998](#)):

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$ET_c = (k_{cb} * k_s + k_e) * ET_o \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde K_s es el coeficiente de reducción de la transpiración debido al déficit en el agua del suelo.

En la Figura 1 se muestra la escala eco fisiológica utilizada para la toma de decisiones de manejo en el ajo.



Figura 1. Escala Eco-fisiológica del ajo desde su plantación hasta la cosecha (INTA, 2021).

Cuando existen limitaciones de agua en el suelo el valor de $k_s < 1$; si no existen limitaciones entonces $k_s = 1$ y durante todo el desarrollo del cultivo (en este caso ajo) k_s es indicador del nivel de estrés hídrico. Vamos a suponer que no hay estrés por lo tanto $k_s = 1$.

6.1 Relación K_c con índices de vegetación (VI)

El coeficiente de transpiración (K_c) del cultivo y IAF (índice de área foliar) se relacionan mediante la expresión exponencial (Choudhury et al., 1994):

$$T_c = 1 - e^{-kIAF} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde T_c es la transpiración de cultivo y el coeficiente de amortiguamiento k toma valores de entre 0,5 y 0,7 y en base en las definiciones se relacionan según la expresión:

$$K_{cb} = K_{cb, \text{máx.}} \cdot T_c \quad (\text{Ecuación 6})$$

$K_{cb, \text{máx.}}$ = coeficiente basal de un cultivo con cobertura efectiva

Por otro lado, se han descrito relaciones con los índices multispectrales de vegetación y variables de crecimiento de cultivos como el IAF y la fracción de cobertura de suelo (fc) ([Choudhuy et al., 1994](#)) han mostrado que los VI se pueden estimar mediante una función exponencial del IAF.

$$VI = VI_{\text{máx.}} - (VI_{\text{máx.}} - VI_{\text{mín.}}) e^{-k' IAF} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde VI puede ser tanto NDVI ((Normalized Difference Vegetation Index) como SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) y los valores máximos (máx.) y mínimo (mín.) se refieren a los valores que pueden tomar con cubiertas totales y suelo desnudo. El coeficiente k' hace referencia a la disposición de las hojas adoptando valores (0.5/0.7) para SAVI y (0.8 /-1.3) para NDVI. Combinando las ecuaciones:

$$T_c = 1 - [1 - (VI_{\text{máx.}} - VI) / (VI_{\text{máx.}} - VI_{\text{mín.}})]^\eta \quad (\text{Ecuación 8})$$

$\eta = (k/k')$, sustituyendo la ecuación nos queda:

$$K_{cb} = K_{cb, \text{máx.}} [(1 - (VI_{\text{máx.}} - VI) / (VI_{\text{máx.}} - VI_{\text{mín.}}))^\eta] \quad (\text{Ecuación 9})$$

Dicha ecuación es genérica para derivar K_{cb} desde un IV. Diversas funciones empíricas se han desarrollado para relacionar K_{cb} y NDVI. Entre ellos los trabajos de ([Calera et al., 2016](#)) eligieron ajustes lineales para la relación K_{cb} -NDVI. Las ecuaciones vinculantes son ecuaciones lineales que permiten determinar k_{cb} a partir de la medición de medidas de fc de suelo o mediante la reflectividad del cultivo en las regiones del rojo (RED) e infrarrojo cercano (NIR) medida por los sensores a bordo de cualquier tipo de plataforma ([González-Dugo et al., 2009](#)).

Un VI es una operación algebraica sencilla de los valores de reflectividad medidos en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. Los índices de vegetación como el NDVI indica la diferencia en la reflectividad de la banda NIR y la banda RED, este índice es buen indicador del vigor y del estado de la vegetación (Ecuación 10). Los valores que puede tomar el NDVI se ubican entre -1 y 1. Las superficies con vegetación verde tienden a un valor de 1 dependiendo del vigor y proporción de ésta, valores próximos a 0 corresponde a suelo desnudo y el agua tendrá valores menores a 0 dependiendo de la cantidad de sedimento en suspensión.

El SAVI por su parte, es un índice que sustrae del NDVI el efecto del suelo por debajo de la vegetación (ecuación 11). Sirve para corregir la influencia del suelo cuando el cultivo se encuentra en estadios tempranos de crecimiento.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\text{SAVI} = \frac{((\text{NIR} - \text{RED}) * (1 + L))}{(\text{NIR} + \text{RED} + L)} \quad (\text{Ecuación 11})$$

L: Constante 0,5

Si L vale 0 el SAVI será igual al NDVI. En la literatura, frecuentemente aparece un valor de 0,5 para L. Sin embargo, el valor de L puede ser derivado del análisis de múltiples imágenes donde la vegetación no sufra cambios, pero si la humedad del suelo (Allen et al., 2002).

Como ya expresamos, (Plaza et al., 2016) determinaron las necesidades hídricas netas en ajo y cebolla mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales adquiridas principalmente por Landsat-8 y Sentinel-2. Las series temporales permiten realizar un seguimiento de la evolución de un cultivo agrícola para un mayor control de la producción.

En adición, se utiliza la expresión calibrada a escala regional para doce estaciones meteorológicas- la ecuación de HG para el Oasis Norte de Mendoza por medio de coeficientes de ajuste anuales y mensuales, utilizando como valor de referencia la ETo obtenida de FAO56-PM. De acuerdo con su formulación original, la ecuación de HG ofrece sobreestimaciones sistemáticas y considerables en el cálculo ETo en el Oasis Norte de Mendoza (Aguilera, 2018).

De acuerdo a (Rivas et al., 2023) los datos de ETo calculados para Mendoza utilizando el método de Hargreaves (HG) ***son satisfactorios para la planificación del riego.***

Los coeficientes anuales obtenidos para todas las estaciones del Oasis Norte de Mendoza fueron menores que el coeficiente original de HG (Figura 5).

$$\text{EToHG} = \text{Ca Ra} (\text{Tmed} + 17, 78) (\text{Tmax} - \text{Tmin})^{0,5} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde Ca es el coeficiente de ajuste anual obtenido regionalmente (Aguilera, 2018), Ra es la Radiación extraterrestre.

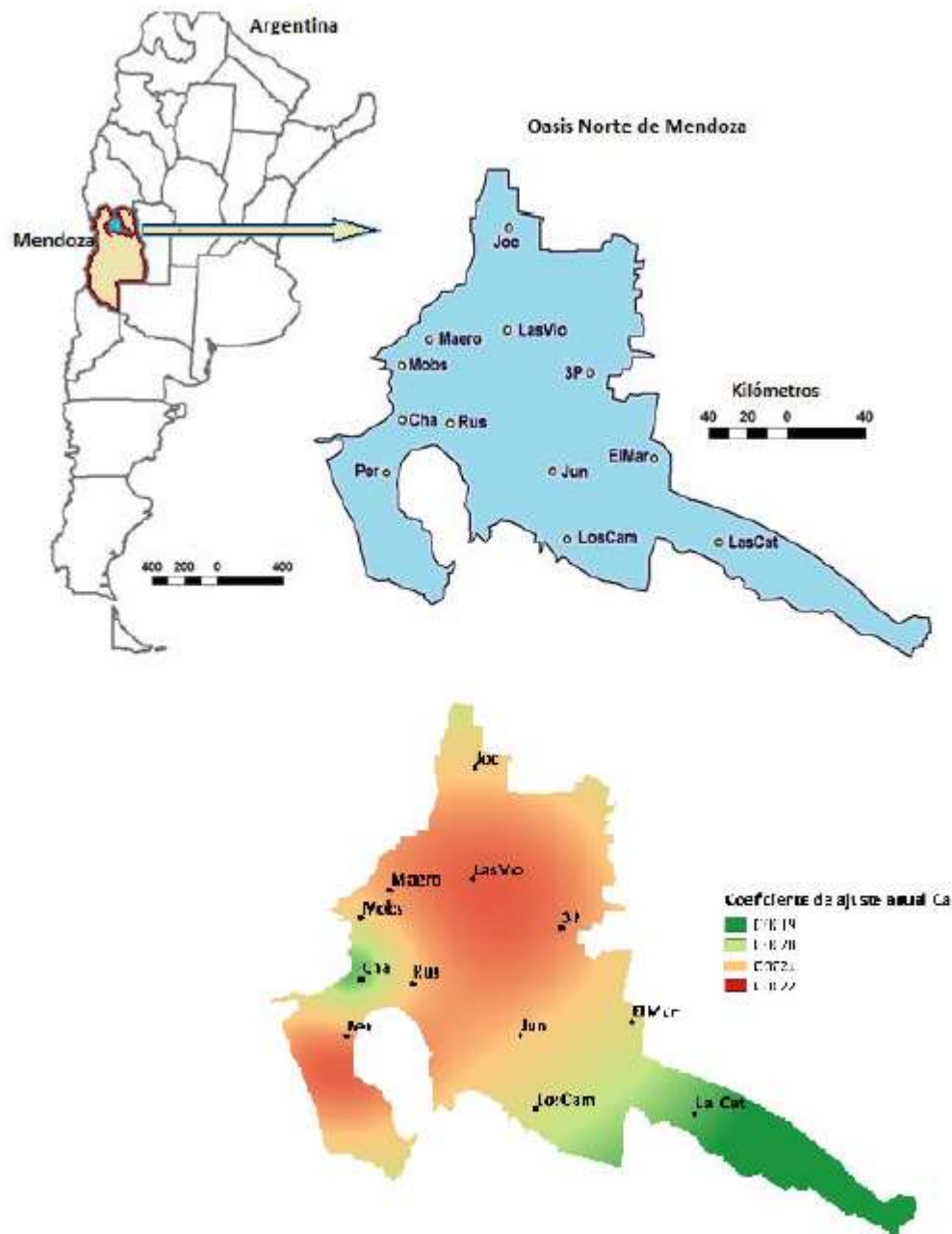


Figura 2. Mapa de coeficientes de ajuste HG para el Oasis Norte de Mendoza. Tomado de Calibración de la ecuación de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia de Aguilera

Para los índices de vegetación se procesan las imágenes de Sentinel 2 desde la plataforma GEE (*Google Earth Engine*) para la pisada HED que contiene el pivó bajo estudio. La resolución espacial del sensor es de 10 m, rojo (banda 4) e infrarrojo (banda 8) lo cual lo hace aceptable para sistemas de riego por pivó. Se utilizan las

imágenes del período de crecimiento del ajo de la temporada 2021, aplicando un filtro de nubosidad menor al 20%. Se determina para cada imagen el valor medio de NDVI.

La componente de transpiración se deriva de la relación Kcb-NDVI lo que permite obtener valores kcb para cada píxel aplicando (Campos et al., 2018):

$$K_{cb} = 1,44 * NDVI - 0,1 \quad (\text{Ecuación 14})$$

En un ensayo posterior (Plaza et al., 2018) desarrolla la relación Kc-NDVI que incluye los dos componentes Kcb y Ke que está adaptada para cultivos hortícolas que cubren parcialmente el suelo y bajo una frecuencia de riego alta, como es el caso del ajo. En este caso los parámetros de la función lineal son los indicados en la (Ecuación 14).

$$K_c = 0,85 * NDVI + 0,47 \quad (\text{Ecuación 15})$$

Asimismo, se evalúa una ecuación que toma como base a la (Ecuación 13) pero esta calibrada para el hemisferio sur. Esta fórmula se deriva de estudios empíricos y modelos que relacionan el NDVI con el coeficiente de cultivo (kc). Del ajuste y calibración de la relación se deriva esta expresión:

$$K_{cb \text{ cal}} = (1,44 * NDVI - 0,1) * 0,7 \quad (\text{Ecuación 16})$$

A modo de sugerencia, el director de este trabajo recomienda utilizar otra relación entre el coeficiente basal de cultivo y el índice NDVI por trabajos de investigación que se encuentra realizando y en función de cálculos preliminares realizados en la zona, la cual denominaremos la (Ecuación 16).

$$k_{cb2} = 2,86 * NDVI - 0,1 \quad (\text{Ecuación 17})$$

En la Figura 6 se diagrama el flujo de la información paso a paso de la obtención de datos para su procesamiento y obtención de los resultados.

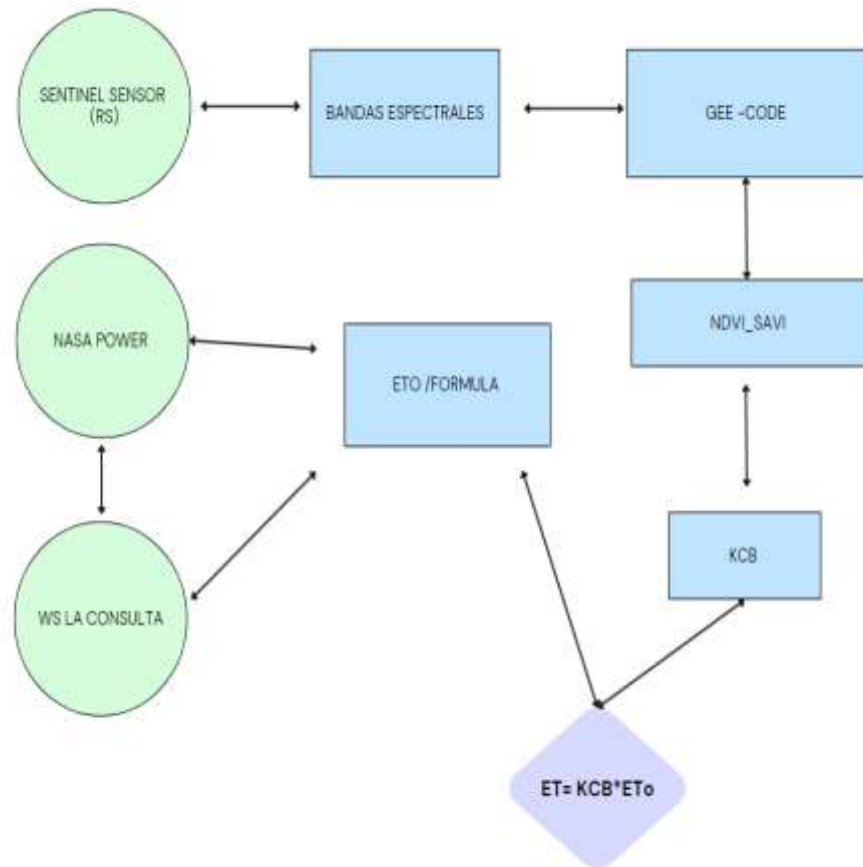


Figura 3. Diagrama de flujo de la información utilizado en la memoria.

7. Área de Estudio

El área de estudio está ubicada en el departamento de Santa Rosa, en la provincia de Mendoza. El cultivo en estudio es regado por un pívot que riega 40 ha, el suelo es franco arenoso en la mayor parte del predio encontrando en algunos sitios el dominio de la fracción de arena media (Figura 4).

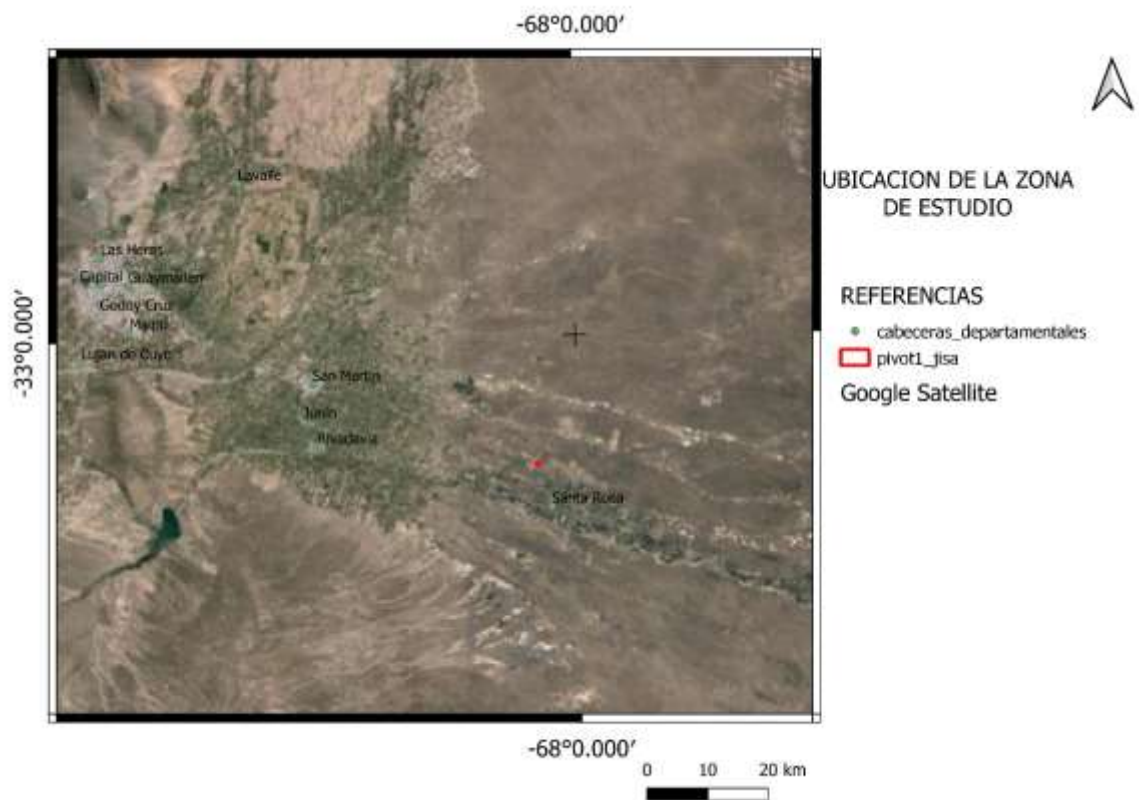


Figura 4. Ubicación Pívot marcado en rojo usando como base la plataforma Google Satellite.

7.1 Materiales

Se utilizan para el estudio las imágenes proporcionadas por la misión Sentinel-2 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). La misión Sentinel-2 consta de 2 satélites el 2A y 2B, equipados con instrumentos multispectrales avanzados que capturan imágenes de 13 bandas espectrales, entre el visible hasta el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta. La resolución es de 10 m y cubre 290 km de ancho, permitiendo la observación de la superficie terrestre cada 5 días, lo que lo hace un instrumento válido para el monitoreo de cultivos.

	SENTINEL 2	
	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - Aerosol	0,43 - 0,45	60
Banda 2 - Blue	0,45 - 0,52	10
Banda 3 - Green	0,54 - 0,57	10
Banda 4 - Red	0,65 - 0,68	10
Banda 5 - Red edge 1	0,69 - 0,71	20
Banda 6 - Red edge 2	0,73 - 0,74	20
Banda 7 - Red edge 3	0,77 - 0,79	20
Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1	0,78 - 0,90	10
Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2	0,85 - 0,87	20
Banda 9 - Water vapour	0,93 - 0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36 - 1,39	60
Banda 11 - SWIR 1	1,56 - 1,65	20
Banda 12 - SWIR 2	2,10 - 2,28	20

Tabla 1. Bandas de Sentinel 2 con indicación de sector del espectro resolución espectral del ancho de banda y espacial.

Se realiza un análisis del área del pivot agrícola mediante composiciones de bandas espectrales (SWIR -NIR-VIS) empleando la plataforma Google Earth Engine (GEE) con el propósito de evaluar visualmente el estado de los cultivos en distintos momentos del ciclo de producción durante el año 2021(Figura 4).

La selección de esta combinación específica de bandas resulta fundamental, ya que posibilita la diferenciación entre áreas que exhiben un crecimiento vegetal saludable y aquellas donde la vegetación presenta signos de estrés o se encuentra en etapas avanzadas de senescencia.

Adicionalmente, esta misma combinación es utilizada para llevar a cabo la composición de diferentes tipos de suelos y para detectar cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, proporcionando así un enfoque versátil y poderoso para el monitoreo y análisis de la zona de cultivo.

En abril, se aprecia que el sector de suelo desnudo es el predominante, cuando está más avanzado el ciclo en junio se logra apreciar la cobertura del cultivo en la totalidad de las 40 ha, en septiembre se observan áreas de diferenciación dentro del pivot.

ABRIL



JUNIO



SEPTIEMBRE



Figura 5. Combinación de bandas (2-3-4-8-11-12) Sentinel 2 -Sensor MSI (MultiSpectral Instrument) para diferentes fechas.

En Mendoza, la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas (DACC) cuenta con una red de estaciones meteorológicas y una página web donde presenta información de la red de estaciones tanto a nivel mensual como en tiempo real. La estación meteorológica más cercana al predio productivo es la llamada El Mercado (Finca Zuccardi) (Ubicación 33°05'S 68°13'O) Altura 622 msnm, desde ahora la estación se anota como WS. La WS no cuenta con datos de Radiación solar por lo cual se utilizarán los datos de la estación meteorológica experimental INTA - La Consulta que posee un piranómetro entre sus sensores de variables climáticas. De esta manera comparamos las estimaciones de ETo de ambas fuentes de datos para evaluar la consistencia de los resultados que se logren en esta memoria.

8. Análisis de datos y resultados

Se realiza en primer lugar el análisis de los datos climáticos obtenidos desde las diferentes fuentes propuestas para luego realizar una comparación mes a mes de las variables climáticas entre ellas.

Los datos de las variables climáticas obtenidas del **SR (Sensor Remoto)** desde *NASA POWER*² y de las **WS (Estación Meteorológica)** pueden obtenerse de otras formas a la aquí propuesta, pero necesitan cuantiosos parámetros a medir por ejemplo se puede trabajar con datos de diversos SR como MODIS³ o GOES⁵ los cuales cuentan con información climática pero el procedimiento es más extenso. Por la simpleza y la cantidad de variables necesarias para el cálculo se utiliza HG por la eficiencia en la obtención de resultados usando solo las medias mensuales de las temperaturas máxima y mínima. En la Figura 6 se observan los valores de ambas fuentes de la variable temperatura máxima. Se puede observar menores diferencias en verano (con meses de valores prácticamente iguales) y en invierno hasta inicio de la primavera menores valores de temperatura derivados de *NASA POWER* (del orden del 3,8 °C para el mes de junio).

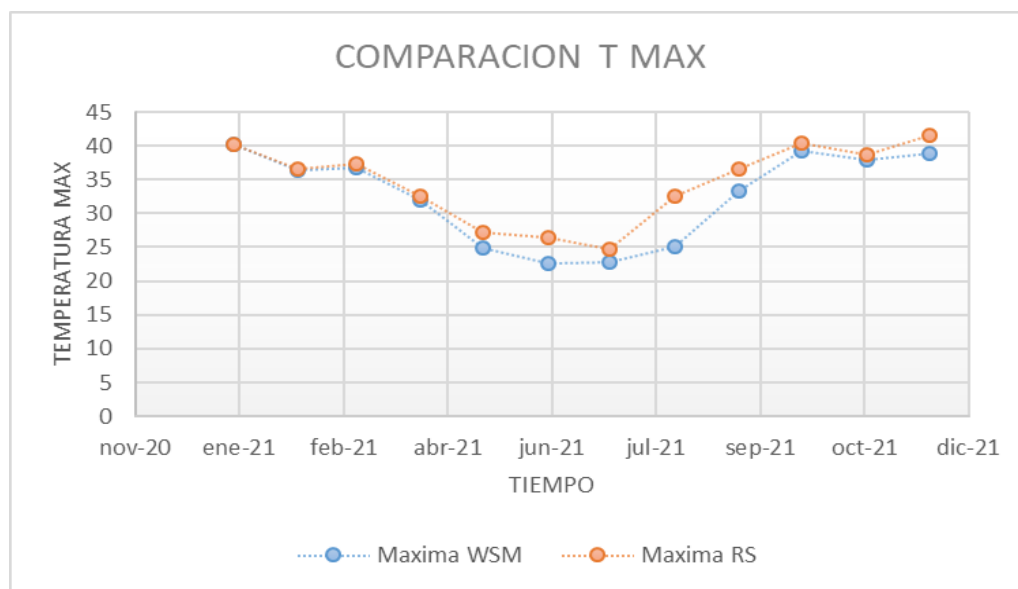


Figura 6. Comparación entre **SR** y las medidas en la **WS**

² Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER), los datos y la metodología se pueden consultar en <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/>

³ MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

En el caso de la variable temperatura mínima el SR *NASA POWER* presenta valores mayores en todos los meses con mínimas diferencias en los meses de verano y se mantiene una diferencia para los meses de invierno (Figura 7). En cuanto a la radiación, se ha validado el producto SYN11-CERES de radiación solar global y se elaboraron mapas promedio mensual del territorio argentino, obteniendo una buena capacidad del producto para reproducir las variaciones espacio-temporales (Carmona et al., 2016).



Figura 7. Comparación entre **SR** y las medidas en la **WS**

Por lo que se aprecia en la gráfica de las fuentes de datos los valores son similares excepto por el mes de enero ya que la WS está marcando que fue de 0 grados lo cual para la época es un dato anómalo por lo que se estima que es una falla de la WS. Igualmente, las temperaturas máximas son el principal factor que controla la evapotranspiración de referencia (ET_o). Las diferencias entre las temperaturas no son tan variables entre sí, por ende, se puede obtener con los datos del SR el cálculo de la ET_o sin mayores errores.

Haciendo uso de los datos climáticos derivados del SR *NASA POWER*, procedemos a procesar estos mismos para la aplicación de la ecuación HG calibrada para el Oasis de Mendoza para obtener ET_o para el año 2021 (Figura 9).

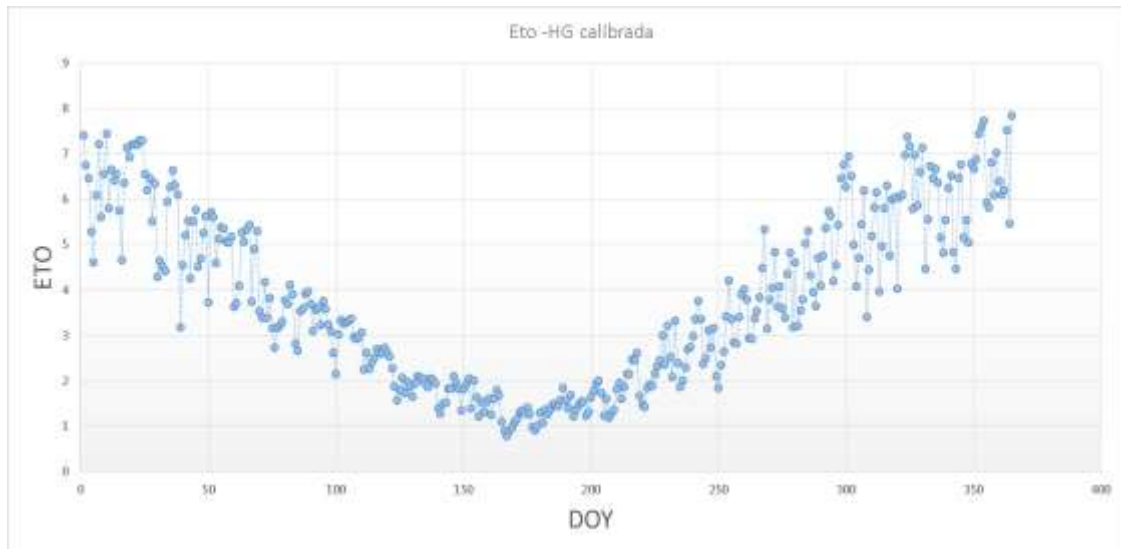


Figura 8. Datos de ETO calculada con HG calibrada para Oasis de Mendoza para el año 2021

Ahora para el cálculo de Kcb es necesario obtener los valores de NDVI utilizando las bandas 8 y 4 del Sentinel2⁴. Como ya mencionamos realizando la aritmética de estas bandas se pueden obtener los valores NDVI. En la Figura 10 se observan los valores de NDVI obtenidos a lo largo de los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y finalmente diciembre para el cultivo del ajo del pívot. El mayor valor obtenido que se observa es de 0,5 correspondiente al mes de octubre. Recordando la curva de evolución del cultivo los valores de Kcb y kc se muestra un rápido crecimiento después de la siembra, una estabilización mediana durante el invierno, un segundo período de crecimiento en primavera y el cultivo ya cosechado en los meses de noviembre y diciembre. La observación periódica del cultivo como ya hemos mencionado permite describir la evolución y muestra la variabilidad espacial (Figura 10) y temporal (Figura 11). ***La ventaja es que permite detectar falta de nutrientes y disponibilidad hídrica.***

⁴ <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>.

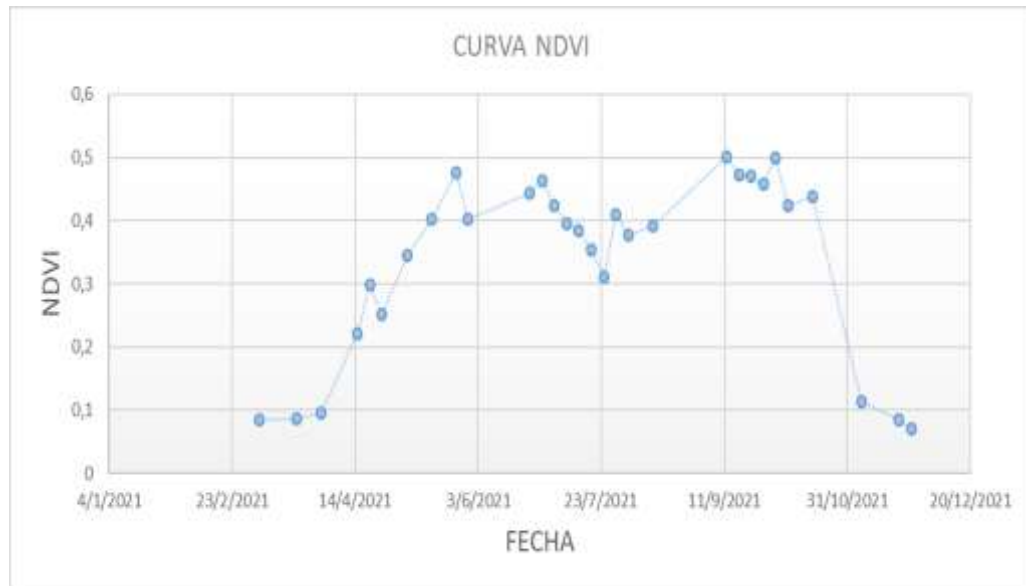


Figura 9. Valores obtenidos de NDVI (sensor MSI-Sentinel) a lo largo de los meses del ciclo del cultivo del ajo para el promedio del área del pívot

En la Figura 11 se observa la variabilidad espacial del NDVI para el mes de mayo, recordemos que el NDVI destaca gráficamente determinados píxeles relacionados con las coberturas vegetales. Estima la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación reflejada en el rojo y en el infrarrojo cercano del espectro. También el NDVI es un indicador de la proporción de suelo y vegetación. En el anexo se puede visualizar la variabilidad intraparcilaria en el área cubierta por el pívot la cual puede estar relacionada con diversos factores como una falta de uniformidad del riego del equipo, las diferentes texturas del suelo y sus consecuentes diferencias en la velocidad de infiltración.



Figura10. Valores de NDVI del ajo para el mes de mayo 2021

Los valores de k_c se calculan con las ecuaciones anteriormente expuestas (13), (14), (15) y (16) y se muestran sus valores en la Figura 12, los valores arrojados dependen fuertemente de la arquitectura de la cubierta y de la cobertura alcanzada por el cultivo.

El valor de K_e está relacionado con la evaporación del suelo y depende de su humedad. Para un sistema de riego presurizado el componente evaporativo puede estimarse alrededor de 0,05 (Calera et al., 2016), valor que se adoptará para la realización de los cálculos.

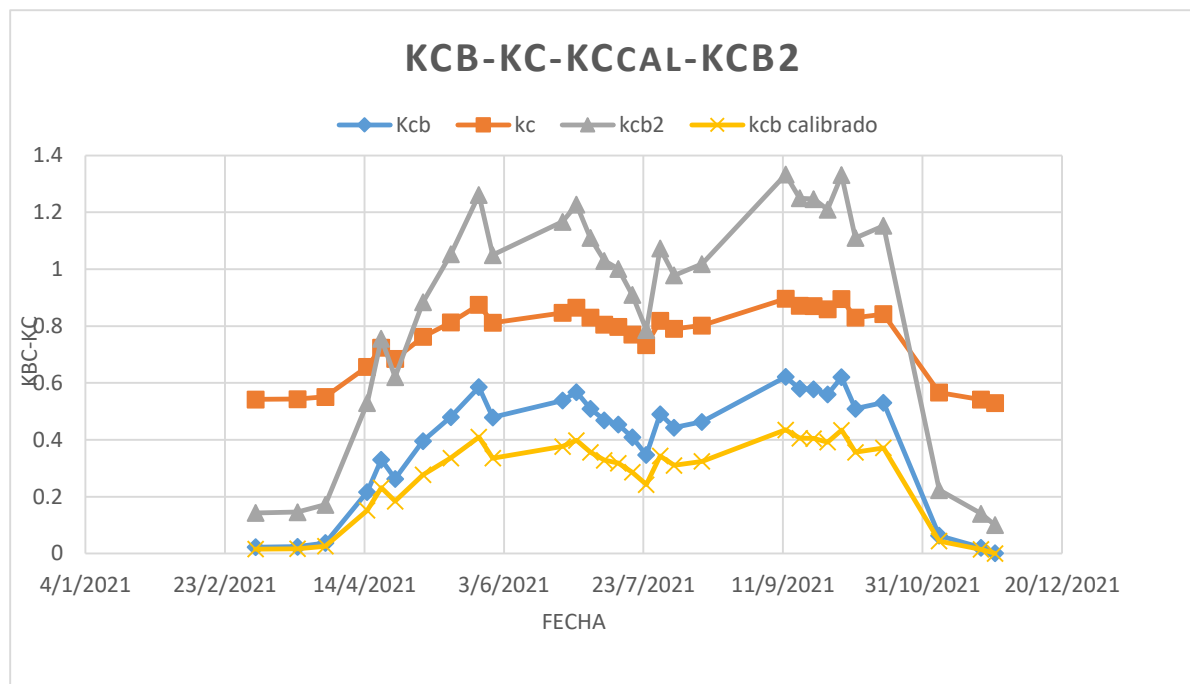


Figura 11. Valores K_{cb} obtenidos con las ecuaciones propuestas por Plaza, (Azul), Campos (anaranjado), Plaza calibrado (amarillo) y Rivas (gris)

Finalmente, con la integración de todos los datos para el cálculo de la ET se representa el comportamiento temporal del cultivo del ajo regado por pivot en la Figura 13 donde se puede observar la evapotranspiración calculada con base en los datos recopilados de NASA POWER e imágenes satelitales, es decir desde SR. La relación existente entre el gráfico del crecimiento del ajo de la Figura 1 (Escala fisiológica para el cultivo del ajo) tiene una similitud con la gráfica del k_c (coeficiente de cultivo). Durante la fase inicial el desarrollo es lento y las plantas no tienen un gran desarrollo foliar por lo cual, el k_c derivado de esta etapa tiene valores bajos (0,2 a 0,4) como se aprecia en la Figura 12 en los meses iniciales. Luego a partir del crecimiento vegetativo el k_c crece progresivamente creciendo hacia valores (0,4 a 0,7) Es decir,

al tener mayor superficie foliar, el kc acompaña este crecimiento y la tasa de evapotranspiración aumenta por un NDVI mayor.

También se pueden observar los momentos de estrés hídrico vinculados a un bajo valor de NDVI y aquí la curva de crecimiento teórica para el estadio fenológico presenta una diferencia ya que tiende siempre a crecer. Asimismo, se puede observar como casi todas las ecuaciones generan una sobreestimación al inicio y al final de la temporada, sobre todo de la curva obtenida para el caso de kc, la cual se diferencia en comportamiento respecto de las otras curvas que se asemejan entre sí en su comportamiento.

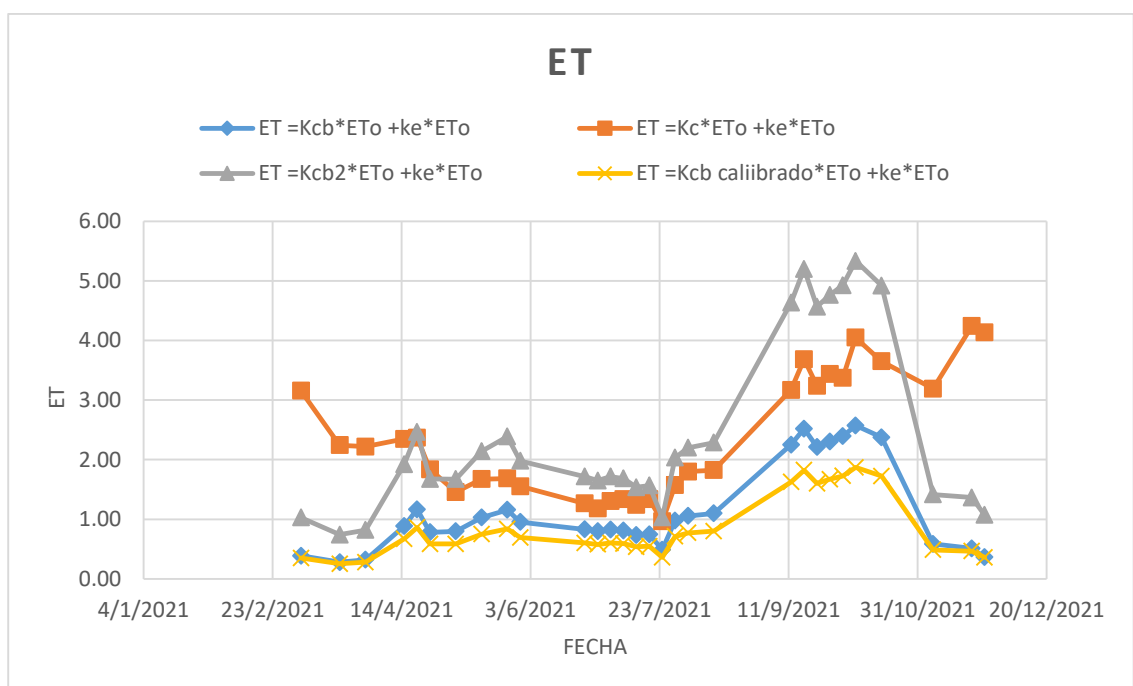


Figura 12. Valores de evapotranspiración para el ajo a partir de IV para el NDVI promedio muestreado en las fechas estipuladas

Si ahora trabajamos con los valores del coeficiente del cultivo calculados a partir del NDVI y realizamos un promedio de dichos valores de un mismo mes y los comparamos con los valores utilizados en el documento *Manejo del riego y la fertilización en cultivos de ajo* (Lipinski, 2015) se puede ver que los valores siguen un patrón existiendo diferencias entre ellos sobre todo al principio y al final del ciclo productivo. (Figura 13).

Mes	kc Lipinski	Kcb	Kc	Kcb2	kcb calibrado
1/3/2021	0,4	0,33	2,54	0,86	0,29
1/4/2021	0,43	0,94	2,18	2,02	0,71
1/5/2021	0,59	0,98	1,59	2,04	0,71
1/6/2021	0,75	0,81	1,22	1,68	0,59
1/7/2021	0,83	0,76	1,29	1,59	0,56
1/8/2021	1,02	1,08	1,81	2,24	0,79
1/9/2021	1,25	2,32	3,38	4,79	1,68
1/10/2021	1,35	2,45	3,69	5,06	1,77
1/11/2021	1,26	0,48	3,85	1,28	0,44

Tabla 2. Valores de Kc Lipinski, Kcb ecuación 13, kc ecuación 14,
Kc calibrado ecuación 15, Kcb2 ecuación 16

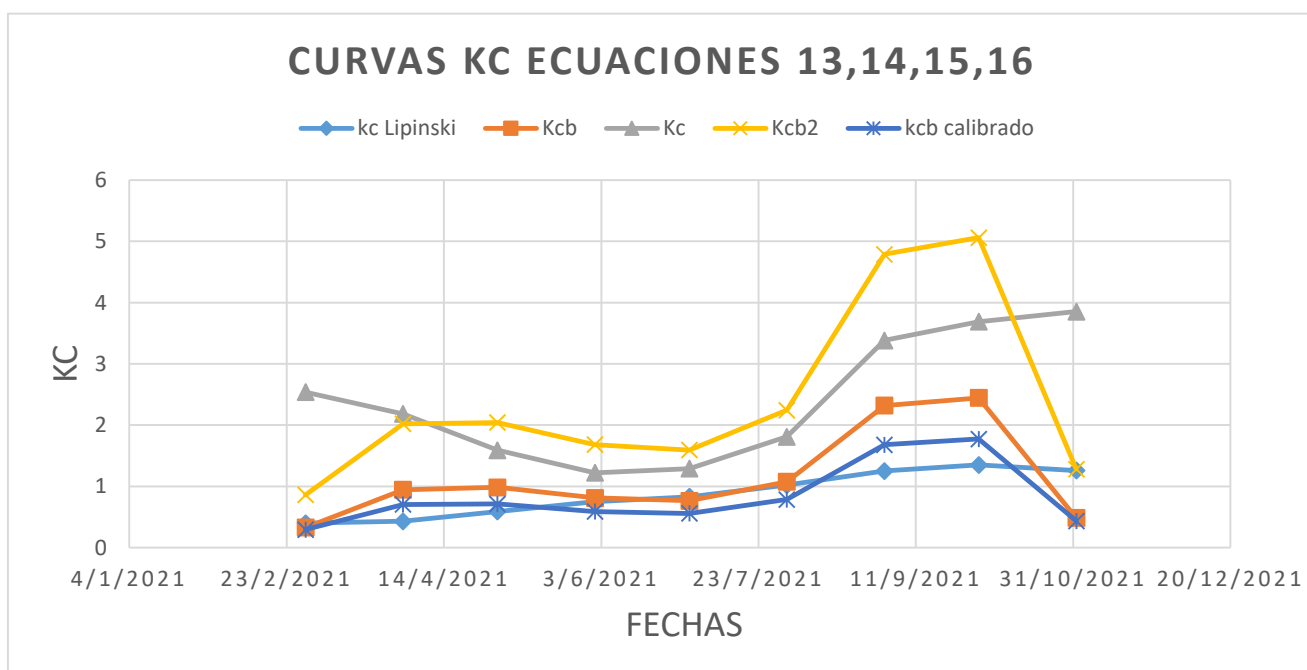


Figura. 13. Comparación de valores kc-Kcb-Kcb2 desde satélite con los
estimados por (Lipinski ,2015)

(Gaviola & Lipinski, 2002) determinaron la ET en ajo entre 718 y 788 mm anuales usando valores de Kc entre 0,4 y 1,3. (Allen et al., 1998) obtuvieron valores entre 0,7 y 1 para el cultivo del ajo.

Evaluando el error cuadrático medio (ECM) para todos los valores obtenidos de las ecuaciones propuestas, respecto al valor que se toma como real el valor de kc obtenido mediante tanque A, obtenemos que, a pesar de las diferencias existentes, se observa que la ecuación 15 tiene un ECM menor al resto de las ecuaciones, es decir que se aproxima de manera más precisa a los valores de referencia calculados por Lipinski.

	Ecuación 13	Ecuación 14	Ecuación 15	Ecuación 16
ECM	0,38	4,92	0,14	5,98

Tabla 3. Valores de Errores cuadráticos medios

8.1 Discusión de resultados y conclusiones

Históricamente, el manejo del riego en la agricultura se ha basado en gran medida en conocimientos empíricos adquiridos en el campo o en prácticas fundamentadas en registros históricos que no siempre reflejan con precisión el consumo real de agua de los cultivos bajo condiciones específicas de crecimiento. Sin embargo, en el contexto actual de cambio climático y creciente presión sobre los recursos hídricos, la agricultura se enfrenta a una encrucijada crítica. La demanda de alimentos está en constante aumento, mientras que la disponibilidad de agua dulce está cada vez más amenazada. Ante este panorama, encontrar soluciones innovadoras para aumentar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura se ha convertido en una prioridad imperativa.

Las nuevas tecnologías emergentes están transformando el panorama agrícola, proporcionando herramientas avanzadas y enfoques inteligentes para optimizar la gestión del agua en la producción de alimentos. Estas innovaciones no solo buscan mejorar la productividad de los cultivos, sino que también aspiran a hacerlo de manera sostenible, conservando el recurso vital que es el agua.

En las últimas tres décadas, los avances científicos en teledetección han llevado a un cambio paradigmático en nuestra capacidad para analizar la dinámica de la vegetación en la superficie terrestre. En este contexto, los índices de vegetación satelitales (IV) se han convertido en herramientas excepcionales para evaluar la vegetación, el vigor de los cultivos y la estimación de la evapotranspiración (ET_c).

La relación K_c-NDVI descrita por la ecuación 15, que utiliza sensores remotos (SR), integra los componentes de K_e y K_{cb}, adaptándose a cultivos hortícolas como el ajo, que cubre parcialmente el suelo y requiere una alta frecuencia de riego. Con los datos comparados, se podría concluir que el coeficiente de cultivo único es similar al obtenido mediante el cálculo del coeficiente de cultivo dual basado en NDVI y ET_o obtenidos de sensores remotos.

Esta metodología consiste en integrar una serie temporal de índices de vegetación en el modelo de la FAO, incorporando propiedades biofísicas del cultivo para estimar la evapotranspiración en comparación con la demanda evaporante de la atmósfera.

Las mayores desviaciones aparecen al final del ciclo de estabilización entre los valores de K_c basados en NDVI y los valores obtenidos del Tanque A. Esta discrepancia podría deberse al porcentaje de cobertura vegetal durante su fase de máximo desarrollo. Los efectos sobre el K_c pueden derivar de la fracción de suelo cubierto, las prácticas de manejo y otros factores ambientales. Repetir este proceso durante la próxima campaña de riego podría ayudar a estudiar estas desviaciones, especialmente si se revelan como consistentes en diversas temporadas y en la misma proporción. Este enfoque permitiría identificar una precisión local del valor de K_c , ajustando los cálculos de manera óptima para el riego según las condiciones específicas de la ubicación del agricultor.

Además, los índices de vegetación tienen en cuenta los cambios estacionales, adaptándose a medida que los cultivos avanzan a través de diferentes etapas de crecimiento, lo que conlleva a requerimientos hídricos variables a lo largo de la temporada, una variabilidad a la que el K_c basado en tablas no puede ajustarse. Por otro lado, los índices de vegetación son esenciales para gestionar el estrés hídrico y evaluar el estado de salud de las plantas, facilitando ajustes precisos y oportunos en la respuesta al riego y a los fertilizantes, evitando así situaciones de desperdicio hídrico.

Se puede decir como conclusión final que la incorporación de índices de vegetación en la toma de decisiones agrícolas ofrece una perspectiva más dinámica y adaptativa, mejorando la eficiencia en el uso del agua y optimizando el rendimiento de los cultivos.

Agradecimientos:

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Exacrop por su generosa contribución de fondos que respaldaron tanto el seguimiento del cultivo como el desarrollo de una aplicación esencial para la gestión del recurso hídrico en la Provincia de Mendoza.

También deseo agradecer sinceramente al equipo de JISA SA por permitirnos acceder a los datos de campo necesarios y por su disposición para proporcionar la información pertinente. Un agradecimiento especial a Aldo López por su apoyo invaluable.

Mis sinceros agradecimientos se extienden a los evaluadores de esta monografía, cuyas observaciones y comentarios fueron fundamentales para mejorar este trabajo.

No puedo dejar de mencionar mi gratitud hacia los profesores y personal administrativo de la especialización, cuyo apoyo y orientación han sido invaluableles en mi trayecto académico.

Por último, quiero expresar mi reconocimiento a mi director, quien demostró una paciencia inquebrantable y brindó consejos sabios y orientación constante que fueron fundamentales para llevar a cabo esta monografía con éxito

9. Bibliografía

Aguilera, R (2018). Calibración de la ecuación de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀) en el Oasis Norte de Mendoza, Argentina.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., et al. (1998) Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300(9): D05109.

Balbontín N., Claudio (2020-08) Plataforma Agrícola Satelital PLAS. Coeficientes de cultivo satelitales para aumentar eficiencia hídrica. Santiago, Chile: Redagráfica. N°113(p.104-107). Disponible en:

<https://hdl.handle.net/20.500.14001/68930>.

Brutsaert, W. (1982) Evaporation into the Atmosphere. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Boston, London. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1497-6>

Calera, A., Campos, I., & Garrido, J. (2016). Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. Jornadas técnicas de innovación en gestión del regadío mediante redes agroclimáticas, teledetección y sistemas de información. CENTER. Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla La Mancha

Campos, I., C.M.U. Neale, A. Calera, C. Balbontín and J. González-Piqueras. 2010b. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). Agricultural Water Management. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.07.011

Campos, I., González-Gómez, L., Villodre, J., González-Piqueras, J., Suyker, A. E., & Calera, A. (2018). Remote sensing-based crop biomass with water or light-driven crop growth models in wheat commercial fields. *Field Crops Research*. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.11.025

Campoy, J. (2019). Water use efficiency and light use efficiency in garlic using a remote sensing-based approach. *Agricultural Water Management*, 40-48. DOI:10.1016/j.agwat.2019.03.032

Carmona F., Orte, F., Rivas, R., Wolfram, E., Kruse, E., Wolfram, Elian; Kruse, E., (2016). Mapas de radiación solar global de la República Argentina a partir del producto SYN1-CERES. Universidad Nacional de La Plata. *Facultad de Ciencias Naturales y Museo..*

Choudhuy, B., Ahmed, N., Idso, S., Reginato, R., & Daugherty, C. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50(1), 1–17. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90090-6

Cónsoli, D., Zuluaga J., Drovandi A., Bermejillo A., Rearte E. (2018) Influencia del cambio climático en la disminución de caudales y evolución de los contaminantes del agua de riego del Cinturón Verde de Mendoza. Cátedras de Química Agrícola e Hidrología Agrícola FCA, UN de Cuyo- Instituto Nacional del Agua

Cuesta, A. et al. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente desde imágenes de satélites. *ITEA*, Vol. 101, 212-224.

DGI (2021). Pronóstico de caudales de los ríos de la Provincia de Mendoza.

FAO. (2016). Estado mundial de la agricultura y la alimentación 2016. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/i6030s/i6030s.pdf>

Gaviola, S., & Lipinski, V. M. (2002). Effect of plant density on yield of onions cv. Cobriza INTA with drip irrigation. *Ciencia del suelo*, 20(1), 43-49.

González-Dugo, M. P et al. (2009). Estimación del consumo de agua en zonas regables mediante series temporales de imágenes satelitales. *Congreso de la Asociación Española de Teledetección*.

Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*

Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G., Eds. (1990) *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, New York.

Liang, S. (2008) *Recent Advances in Land Remote Sensing*. *Physical Geography* 31(5) (2008) pp. 501–516 New York: Springer, 2008.

Lipinski, V. M. (2015). Manejo del riego y la fertilización en cultivos de ajo. Documento Proyecto Ajo/ INTA 114. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina.

INTA. (2015). INTA. Obtenido de www.argentina.gob.ar/inta

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2021). *La Producción de ajo en la Argentina*. Buenos Aires.

Mussetta, P. & Barrientos, M. (2015). Vulnerabilidad de productores rurales de Mendoza. *Rev. FCA UNCUIYO*, 145-170.

Ocampo, D., Rivas, R. (2010). Evaluación de métodos de Estimación de la evapotranspiración a escala mensual y anual en Argentina: Aplicación en zonas húmedas, semiáridas y áridas. *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zona de llanura*, I: 303-310 Varni M., Entraigas I., Vives L. (editores), ISBN: 978-987-543-392-2.

R. G. Allen & Marvin E. Jensen (2015). *Evaporation, Evapotranspiration, and irrigation water requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. DOI:10.13031/irrig.20152143358.

Rivas R. (2023). Sistema integral de soporte a la producción frutícola y vitivinícola argentina, basada en productos de origen espacial PROSAT II-PFVA. Proyecto en Banco de datos de PDTs-0616. Consulta banco de datos en el sitio del MINCYT <https://bancopdts.mincyt.gob.ar/proyectos/bancoPdts.zul>

Rivera, S Otta, C Lauro, N Zazulie. (2021) A decade of hydrological drought in Central-Western Argentina. *Frontiers in water*. Vol3. Article 640544

Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265–267. DOI: 10.1061/(asce) 0733-9437(2000)126:4(265)

10. Anexos

Valores NDVI para diferentes fechas del año productivo, donde se puede apreciar la variabilidad que existe dentro área regada por el pivot.

