

REQUERIMIENTOS HÍDRICOS E INCREMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS BAJO RIEGO ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL NORESTE DE ARGENTINA

José Morábito, Santa Salatino y Rocío Hernández

Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino, Argentina.

jmorabito@ina.gob.ar

Resumen

Es sabido que la actividad agropecuaria de Argentina, debe transitar el sendero del aprovechamiento eficiente del recurso hídrico. A su vez, las zonas de secano frente a escenarios globales de demanda sostenida de granos y cultivos industriales y de la mano de precios atractivos se incorporan al riego. Además, los pronósticos climáticos predicen cambios en el patrón de precipitaciones que podrían ocasionar sequías más frecuentes. Este trabajo tiene por objeto analizar: el incremento de la producción esperada por el riego complementario en áreas de secano del Noreste de Argentina y el impacto del cambio climático sobre el uso del agua y la producción. Para ello se calibró el modelo Aquacrop con ensayos que disponían registros de riego y producción (secano y riego) en maíz, soja, girasol, trigo y algodón. Una vez calibrado, se corrió el programa para 20 años consecutivos, analizando la producción en secano y con riego. En lo referido al impacto del cambio climático se modeló considerando las predicciones sobre temperatura, lluvia y la concentración del CO₂ para el año 2080 (escenario A2 del IPCC), con lo que se simula nuevamente la producción esperada en secano y bajo riego. Como conclusión puede verse que, el riego produciría incrementos de producción en maíz, trigo, soja de 1^a, girasol, algodón y soja de 2^a (en orden decreciente). Se verificaría un incremento de las necesidades de riego en todos los cultivos y un aumento de la producción en la mayoría de ellos, bajo los escenarios de cambio climático planteados.

PALABRAS CLAVE: Aquacrop, evapotranspiración, riego complementario, secano

INTRODUCCIÓN

Es sabido que la actividad agropecuaria de nuestro país, especialmente en las zonas áridas de riego integral, necesariamente debe transitar el sendero del aprovechamiento cada vez más eficiente del escaso recurso hídrico disponible. Si bien los usos: urbano, recreativo y energético representan una demanda que crece día a día, el uso agrícola sigue siendo uno de los más importantes y sobre él se asienta el crecimiento de la economía. Paralelamente, como consecuencia del crecimiento de la población y el desarrollo de sociedades emergentes, la demanda de alimentos, fibras y biocombustibles va en aumento, lo que incrementará la demanda de agua para riego y consecuentemente las perspectivas de escasez hídrica serán mayores (11). Bajo este escenario la actividad agropecuaria sigue expandiendo cada vez más sus fronteras acentuando la necesidad de realizar un uso más eficiente y sostenible del agua. A su vez, las zonas húmedas y sub-húmedas (tradicionalmente de secano) frente a escenarios globales de demanda sostenida de granos y cultivos industriales (*commodities*) y de la mano de precios atractivos para los productores locales se incorporan a esta expansión. Sumado a esto, la escasez hídrica en diversas regiones podría agravarse por los efectos del cambio climático global ya que los pronósticos climáticos además de predecir el aumento de la temperatura del planeta, predicen cambios en el patrón de precipitaciones que podrían ocasionar episodios de sequía más frecuentes (IPCC; 1992 citado en 12).

Muchos autores -en el mundo y en Argentina- han demostrado el impacto de pequeñas láminas de riego sobre el incremento de la producción en zonas de riego complementario, así como la importancia de un adecuado servicio de control y gestión del riego. Carmona Graciano y otros (2008), en un ensayo realizado en algodón “donde se monitorizó la cantidad de agua aplicada, el crecimiento, el estado hídrico del suelo y el rendimiento”, comparando tres dosis de fertirriego, concluyen que la aplicación del 80 % del agua que consumiría el cultivo con pleno desarrollo condujo a rendimientos máximos, en fecha de recolección segura y que la dosis del 60 % mejoró la productividad del agua. Smith (1999) observó que en la provincia del Chaco, en general, las condiciones de producción potencial (con riego) originan algodón con fibra de mayor longitud, resistencia, uniformidad, madurez y refractancia. Las pérdidas de rendimiento de algodón en bruto para el tratamiento sin riego, fueron del 57 al 65 % según la variedad analizada. Morábito y otros (2015) para INTA Reconquista-Santa Fe, mencionan aumentos de 17 % del rendimiento final de algodón bajo riego, respecto a secano. De Azevedo y otros (2014), en experimentos realizados en el noroeste de Brasil, para investigar los efectos de diferentes láminas de riego sobre la eficiencia del uso del agua y el rendimiento de algodón marrón demostraron una mayor eficiencia del uso del agua cuando se riega con el 80 % de la evapotranspiración del cultivo y el máximo rendimiento del algodón en rama ocurre cuando se aplica una lámina de riego equivalente al 120 % de la evapotranspiración del cultivo. En EEUU, Grassini P. et al (2014) en un trabajo cuyo objetivo fue cuantificar la productividad del agua e identificar oportunidades para aumentar el rendimiento en los sistemas de maíz de regadío del centro de Nebraska, demostraron que podría mantenerse el rendimiento actual reduciendo hasta un 32 % el volumen anual asignado. En nuestro país, Dardanelli et al (2010) mencionan que en “la región pampeana durante 95 años han ocurrido 21 fases Niño (las

precipitaciones tienden a ser mayores a las normales) y 23 fases Niña (precipitaciones menores a las normales). El riego aseguraría mayor rendimiento y menor variabilidad de la producción en los años “Niña”. Giaveno, C.D. y otros (2002) evaluaron la respuesta productiva del maíz para silaje a la aplicación de riego suplementario y fertilización estratégica en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe. El ensayo vinculó tres épocas de siembra, dos condiciones - riego y secano - y diferentes híbridos. Para todas las variables estudiadas fueron encontradas diferencias significativas entre riego y secano, destacándose la producción de granos que se incrementó entre un 130 y 285 % y la biomasa total, con aumentos que variaron entre 52 y 155 %, dependiendo de la época de siembra de los híbridos. Por su parte, Prieto Angueiras y otros (2012), en maíz, obtuvo resultados en los que el rendimiento de materia seca manifestó diferencias significativas entre los distintos tratamientos regados y entre éstos y el testigo. Los valores extremos de producción fueron de 34.628 kg.ha⁻¹ en el tratamiento con riego y 20.414 kg.ha⁻¹ en el tratamiento sin riego (el rendimiento del T1 fue 70 % mayor). En promedio el rendimiento en grano fue 72 % mayor que el del tratamiento sin riego. La cantidad de agua aplicada varió entre 360 y 300 mm.

En trigo con riego suplementario y para el área centro-norte de Córdoba, Rivetti (2007) sostiene “que se trata de una tecnología que permite no solo aumentar la producción, sino también disminuir la acentuada variabilidad interanual de los rendimientos”. En condiciones óptimas de disponibilidad de agua y nutrientes es posible alcanzar rendimientos medios de entre 4900 y 6200 kg/ha (rendimientos potenciales inferiores a los de la zona “núcleo” triguera del país). Las ventajas son una mayor posibilidad productiva y económica del doble cultivo y la calidad obtenida. No obstante, los autores coinciden en que “la tecnología empleada implica un costo de producción elevado por lo que se requiere un análisis económico criterioso para asegurar la rentabilidad del sistema”. En el mismo cultivo y para la zona central de la provincia de Santa Fe, Camussi y Marano (2008) afirman que el uso de riego suplementario permitió incrementar significativamente en un 38 % la producción de grano. Observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) de 1338 kg ha⁻¹ entre tratamientos, a favor del riego. Dichas diferencias se debieron a que el riego en la etapa de elongación del tallo permitió la supervivencia de un mayor número de macollos, y por lo tanto de más espigas que en el tratamiento sin riego. Salinas y otros (2009) mencionan incrementos de producción de 111 al 127 % en trigo (con cultivo antecesor de soja y maíz respectivamente), 30% en soja de 1^a, 23 % en soja de 2^a, 52 % en maíz de 1^a y 46% en maíz de 2^a, en ensayos realizados en la estación INTA Manfredi de Córdoba durante los años 1996/2011, con distintas dosis de riego. En soja de segunda en Santa Fe, Marano y otros (2006), encontraron que los tratamientos con riego superaron ampliamente (31% en grano) a los de secano. Por su parte en Santiago del Estero, Paytas y otros (2012) observaron que para el tratamiento con reposición del 100 % de la ETo se obtuvieron incrementos de rendimiento del 18,5 % y 45 % en relación al secano. Por último, Mieres y Marano (2010), en Santa Fe, encontraron para la variedad de girasol KD 3940 una diferencia de producción de 1064 kg ha⁻¹ promedio de grano entre los tratamientos *riego fertilizado* y *secano fertilizado*. De similar manera DK 4045 -bajo riego- fue superior en 1112 kg ha⁻¹ con respecto a secano fertilizado.

La adecuada gestión del riego es la que determina cuándo y cuánto regar, en base en las necesidades de agua de los cultivos, las características del suelo y las

condiciones climáticas del entorno, para optimizar la calidad y cantidad de la producción. Carlesso R. (2008) menciona que las necesidades de agua de las plantas varían entre especies, dependiendo de la genética y la adaptación a diferentes condiciones de cultivo. Si bien en las regiones áridas, la decisión de cuándo y cuánto regar es relativamente simple, cuando se trata de riego suplementario, su programación se convierte en una tarea compleja, debido principalmente a la ocurrencia de precipitaciones. En ese sentido los servicios de monitoreo y gestión de riego, son una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, donde los criterios de cuándo regar y cuánta agua aplicar basados en parámetros agronómicos del cultivo y características del suelo y clima se combinan con un modelo matemático que permita determinar la ETo. El desafío aquí es utilizar riego complementario o suplementario especialmente en aquellos momentos críticos de los diferentes cultivos que permitan estabilizar o incrementar significativamente los rendimientos medios de secano, considerando la justificación socio-económica de las inversiones.

En este trabajo el primer paso fue la delimitación de la zona de estudio, provincias de Chaco, Formosa, Corrientes, Misiones, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y Santiago del Estero. Fue necesario diseñar una adecuada planificación que permitiera conocer la demanda hídrica de los cultivos para diferentes situaciones de probabilidad de ocurrencia de la lluvia anual (años medios, secos y húmedos).

La disponibilidad de modelos computacionales (ETo-calculator, CROPWAT, entre los principales) permite el cálculo preciso de la ETo, que se obtiene utilizando distintas variables provenientes de las bases meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (23) y a INTA. A partir del dato de ETo, se estima la evapotranspiración ETc de cada cultivo utilizando para ello coeficientes únicos de cultivo (kc) según el procedimiento descrito en (1). Para la elección de los kc se debe realizar un análisis previo de las distintas etapas fenológicas de cada cultivo destinado a obtener un adecuado ajuste de los coeficientes a las particularidades del lugar. Esta información, junto con la lluvia efectiva (Pe), permite determinar las necesidades de riego netas y brutas (en función de las eficiencias extra e intra-prediales dependientes de la infraestructura de transporte, distribución y aplicación), para distintas probabilidades de ocurrencia, con el objeto de definir los caudales proyecto de las obras de riego (17). El conocimiento de los valores de ETo, ETc y Pe resulta fundamental para el cálculo del dimensionamiento de las obras de riego y para el diseño de equipos y/o métodos de riego intra-prediales.

El presente trabajo surge como resultado del estudio enmarcado en la Componente B (Determinación de demandas hídricas de modelos productivos) del Acuerdo (10) para la *“Identificación de potenciales nuevas áreas de regadíos y áreas de riego complementario en la cuencas de la zona noreste de Argentina”* realizado en el año 2013.

OBJETIVOS

Conocer la evapotranspiración mensual del cultivo de referencia (ETo), información de base para el cálculo de la demanda de riego de los cultivos en la zona centro noreste de la Argentina y su respectiva variabilidad; conocer la evapotranspiración de los cultivos analizados (trigo, maíz, girasol, soja y algondón) a lo largo de toda la zona productiva; cuantificar el incremento de la producción debido al riego

comparándolo con el secano; analizar el impacto del cambio climático sobre ese incremento de la producción y brindar información básica necesaria para un posterior análisis económico de justificación de la conveniencia o no de aplicar riego complementario.

MATERIALES Y MÉTODOS

En base a la información disponible en CLIMWAT 2.0 (2009) se representó la distribución espacial de sesenta y nueve (69) estaciones meteorológicas situadas en el área de estudio y en áreas periféricas, con el fin de interpolar sus registros climáticos para el período 1971-2000. Para el cálculo de la ETo y de la precipitación efectiva (Pe) se utilizó el programa CROPWAT 8.0 - FAO (24). Cuando no fue posible obtener información sobre la serie elegida se incluyeron con fechas próximas que finalizaran a posteriori de 1975 y que -por lo menos- presentaran 15 años continuos de registros.

La variable velocidad del viento se transformó a una altura de 2 m, en los casos en que la medición fuese realizada a 10 m, mediante la siguiente ecuación:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 Z - 5,42)} \quad (1)$$

donde:

u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura.

u_z = velocidad del viento a la altura z.

Z = altura de medición del viento.

El modelo CROPWAT 8.0 (24) utiliza la fórmula de Penman-Monteith para el cálculo de la ETo. Para el cálculo de Pe, el programa presenta varias opciones. En este estudio se usó la ecuación empírica de USDA.

Para determinar la variabilidad de ETo y a los fines de acotar el estudio, se seleccionaron dieciséis estaciones meteorológicas distribuidas espacialmente en el área de estudio. Sobre la base de un análisis estadístico de las precipitaciones para la serie 1971-2010 (10) se identificaron tres años representativos: seco, medio y húmedo (alta, media y baja ETo respectivamente). En el análisis estadístico, para verificar la normalidad de las series, se realizaron gráficos de histogramas, box-plot y de las series muestrales en papel probabilístico normal. Mediante el programa estadístico AFMOM (6), se aplicó la distribución Normal (Gauss) para identificar los valores teóricos que corresponden a cada clasificación. El año "seco" fue definido como aquél que tiene una probabilidad de excedencia de precipitaciones igual al 80 %; "húmedo" al que presenta una probabilidad de excedencia del 20 % y "medio o típico" al que se acerca a la media estadística (probabilidad de estar comprendido entre el 45 y el 55 % de los casos). Para ellos se calcularon los valores de ETo y Pe. Los resultados de ETo, junto con los valores de precipitación (Pp) y Pe se volcaron a un formato gráfico mediante el empleo de Arc View 3.2^a (2), a través de su módulo Spatial Analyst. Se interpolaron las variables de interés mediante el método Kriging y se confeccionaron los distintos mapas de isóneas de las variables expresados en forma mensual y anual.

Utilizando la información climática obtenida de la base de datos de registros (serie histórica 1971-2010), se obtuvieron los valores de ETo (mm/mes) para años

representativos de los tres escenarios (seco, medio y húmedo), en el área de estudio.

La información se volcó a la confección de mapas de evapotranspiración (ET_o), para cada uno de los meses del año medio.

A partir de los mapas mensuales generados, se confeccionaron mapas de ET_o por cada mes, considerando años con valores bajos, medios y altos, para visualizar la variabilidad anual del parámetro.

En cuanto a la estimación de las necesidades netas de riego de los cultivos seleccionados (trigo, maíz, girasol, soja y algodón), se obtuvo la evapotranspiración real para tres situaciones (años lluviosos, medio y secos) y se confeccionaron mapas de isolíneas.

La información obtenida, se volcó a la confección de mapas de ET_c acumulada para cada cultivo, a lo largo de todo el ciclo y para un año medio, presentando en el área un mapa de ET_c media y el consiguiente requerimiento de riego.

A los fines de poder simular la productividad del cultivo ante situaciones variables de clima, suelo, manejo del cultivo, oferta hídrica (secano y riego) y demostrar la conveniencia del riego complementario y/o suplementario se utilizó el modelo Aquacrop (FAO, Steduto et al., 2012). Para ello se realizó una profusa búsqueda bibliográfica con el objeto de seleccionar los trabajos más relevantes realizados en el área del estudio referidos al incremento de la producción de los cultivos por efecto del riego para (1) calibrar el modelo en las condiciones del estudio y (2) validar los resultados de la calibración y analizar posibles escenarios de cambio climático.

A partir de la calibración del modelo Aquacrop, para diferentes modelos productivos y condiciones climáticas y edafológicas de las distintas regiones, se determinaron las productividades estimadas en los diversos escenarios climáticos futuros, con y sin riego.

Para la determinación del requerimiento hídrico de los cultivos en distintos escenarios, se calculó en primera instancia la media aritmética de las variables: capacidad de campo (W_c) y punto de marchitamiento (W_m), para cada horizonte de suelo y para la profundidad del perfil; y luego las láminas de agua disponible por horizonte (d_u) y total del perfil (d). Se analizó la distribución espacial de las características y propiedades de los suelos de la región.

Por razones de extensión en esta presentación se hará referencia sólo al *cultivo trigo*. Se simuló la producción en secano y bajo riego de los cultivos seleccionados, para las estaciones meteorológicas y las distintas zonas productivas de cada cultivo. A su vez, se calculó la frecuencia de meses con riego durante el ciclo de cultivo, y el porcentaje de años en los cuales sería necesario regar o no, para los escenarios sin y con cambio climático.

Se calcularon también las dotaciones de riego o caudales ficticios continuos necesarios, para diseñar la red de riego en función de las necesidades netas de los cultivos, para una frecuencia acumulada del 80%. De esta forma se define para los diferentes escenarios con y sin cambio climático, la frecuencia de riego anual y el porcentaje de uso de los equipamientos de riego.

RESULTADOS

En la figura 1 se observa la distribución espacial de las 69 estaciones meteorológicas evaluadas, 35 en el área de estudio y 34 en su periferia,

individualizando en la misma figura las 16 elegidas para el estudio de la variabilidad de ETo.

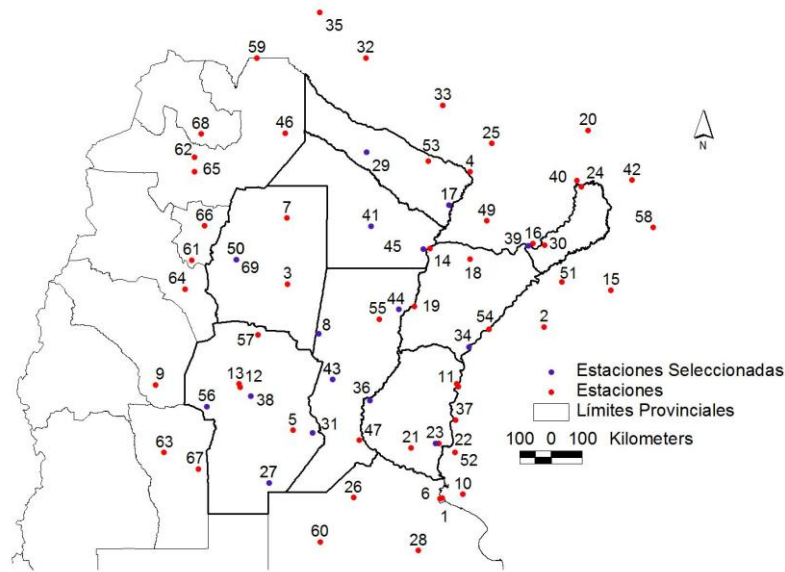


Figura 1: distribución espacial de las estaciones meteorológicas (base: CLIMWAT-FAO, 2009)

La figura 2 presenta la ETo anual (mm año^{-1}) de toda el área de estudio.

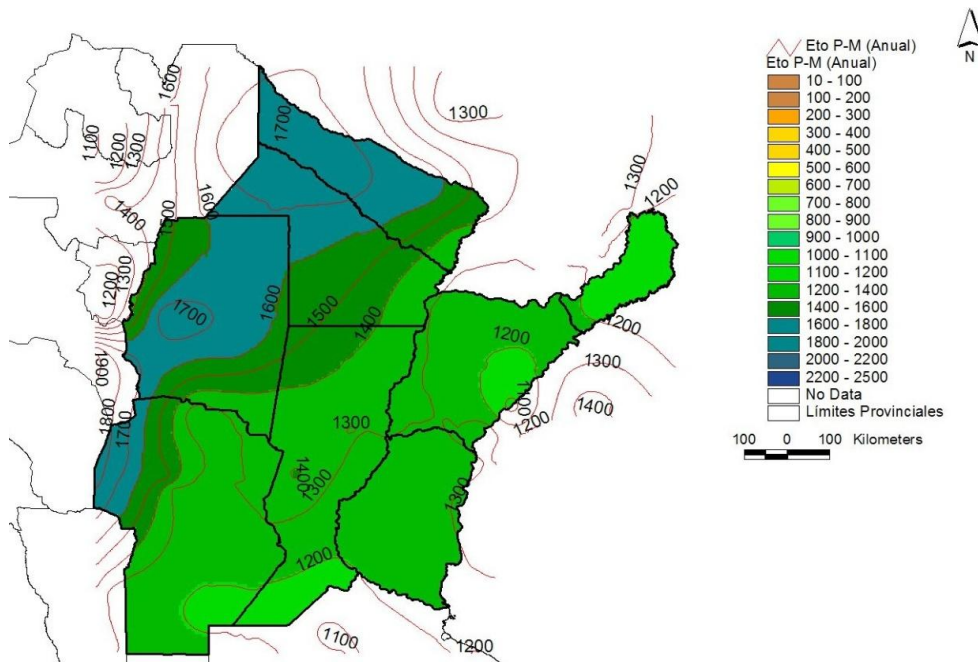


Figura 2: Evapotranspiración anual del cultivo de referencia (ETo mm año^{-1})

En la figura 3 pueden verse las isólineas correspondientes a los valores medios anuales de P_e (mm/año) obtenidos según el método del USDA de EEUU, disponible en CROPWAT 8.0.

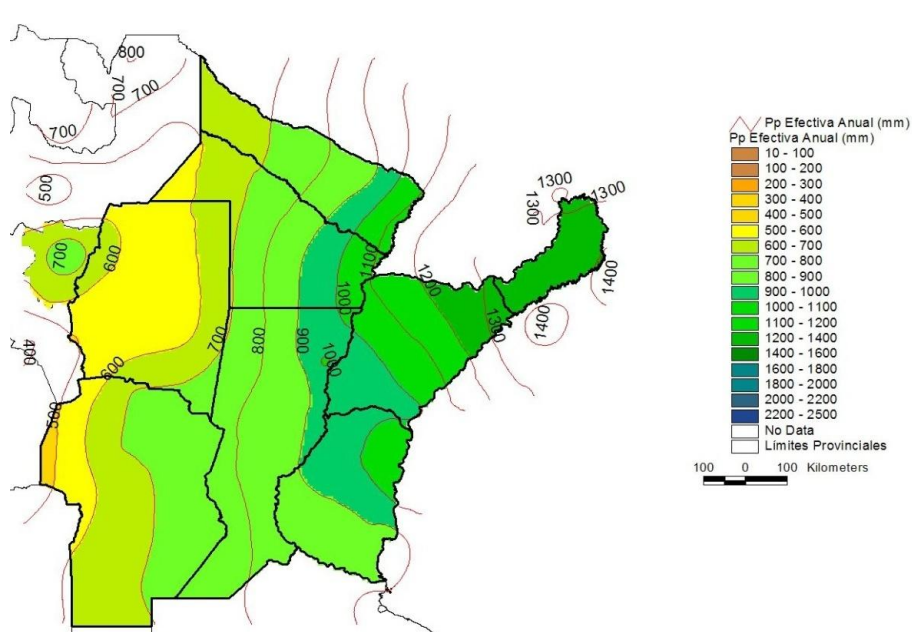


Figura 3: Lluvia efectiva media anual (Pe mm.año⁻¹)

La figura 4 hace referencia a la lluvia mensual para los años representativos (seco, medio y húmedo) tomando como ejemplo la estación meteorológica Las Lomitas (Prov. de Formosa), si bien en algunos meses no se cumple la tendencia de la lluvia anual.

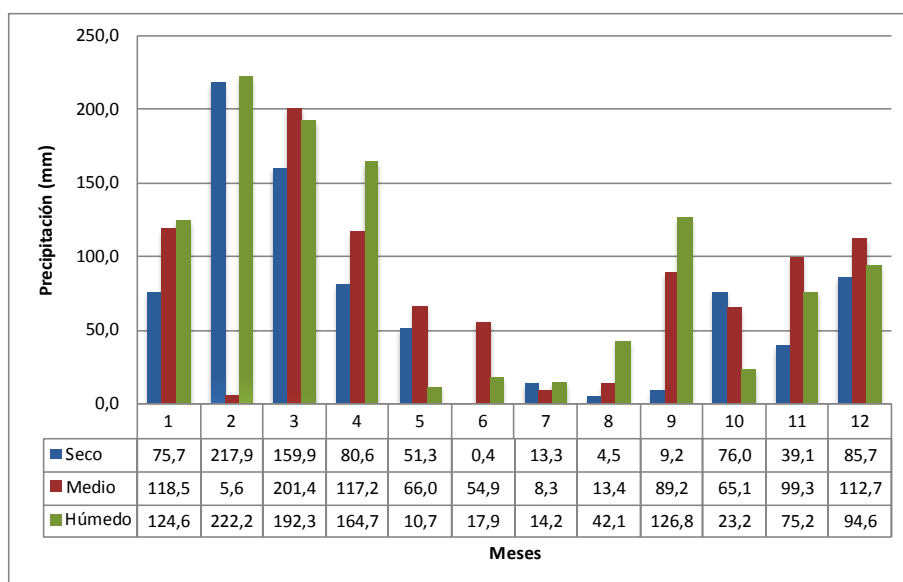


Figura 4: Lluvia mensual: años seco, medio y húmedo. Estación Las Lomitas.

La figura 5 presenta los valores de ET_o (mm día⁻¹) alta, media y baja para sus respectivos años: seco, medio y húmedo para la estación Las Lomitas. Se confeccionaron -además- mapas mensuales de valores de ET_o (baja, media y alta), para evidenciar la variabilidad del parámetro.

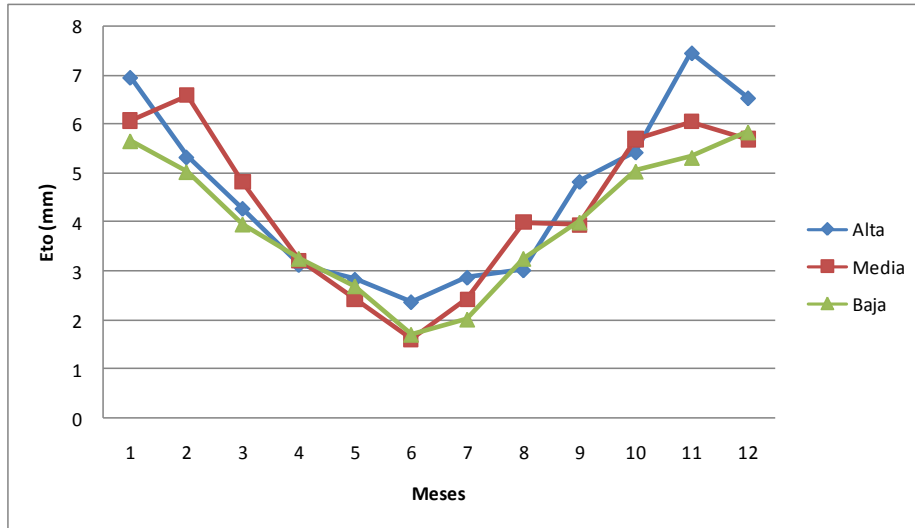


Figura 5: ETo baja, media y alta. Estación Las Lomitas (Formosa)

Analizando el mapa de isolíneas para enero (figura 6) puede verse -por ejemplo- que la ETo media del mes de enero varía entre 160 y 200 mm.mes^{-1} (en los meses de enero y febrero -si bien las diferencias fueron pequeñas- la ETo resultó menor en el noreste que en el sureste del área de estudio. Esto puede ser atribuido a altos valores de humedad relativa registrados en el NE, lo que reduce la transferencia de vapor de agua del cultivo a la atmósfera). Así también, en el NE de Córdoba la ETo media del mes de enero varía entre 165 y 185 mm.mes^{-1} (en julio, la variabilidad es baja: para los tres casos el valor es prácticamente igual a 50 mm.mes^{-1} o 1,6 mm.día^{-1}).

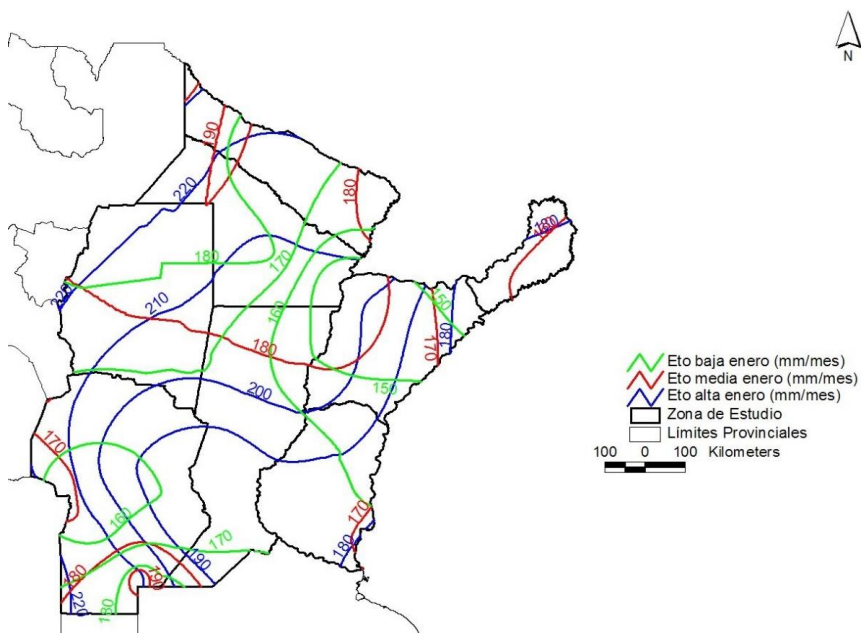


Figura 6: ETo para el mes de enero (valores bajos, medios y altos)

La figura 7 grafica la evapotranspiración del cultivo y el requerimiento de riego del trigo para un *año medio* y a lo largo de su ciclo agrícola (mm.día^{-1}). Esta última

información se considera de utilidad ya que -si se conocen la lámina de agua total disponible para la profundidad radical del cultivo, la fracción fácilmente disponible y la evolución de las lluvias para un año dado- pueden estimarse los intervalos de riego, confeccionar un balance hídrico simplificado y estimar láminas (y oportunidades de riego) que aseguren un rendimiento satisfactorio del cultivo.

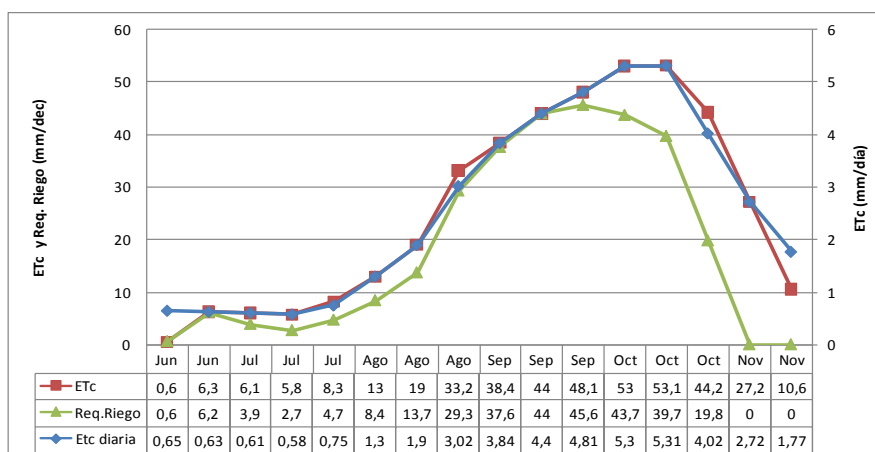


Figura 7: evapotranspiración del cultivo para el *año medio* (ETc; mm/década y mm/día). Requerimiento de riego (Req.Riego; mm/década) vs tiempo: *año medio*. (Estación Ceres)

La figura 8 muestra las isolíneas de ETc correspondientes a un *año medio* para trigo y las figura 9 permite visualizar los requerimientos *medio* para este cultivo y para la totalidad de su ciclo fenológico.

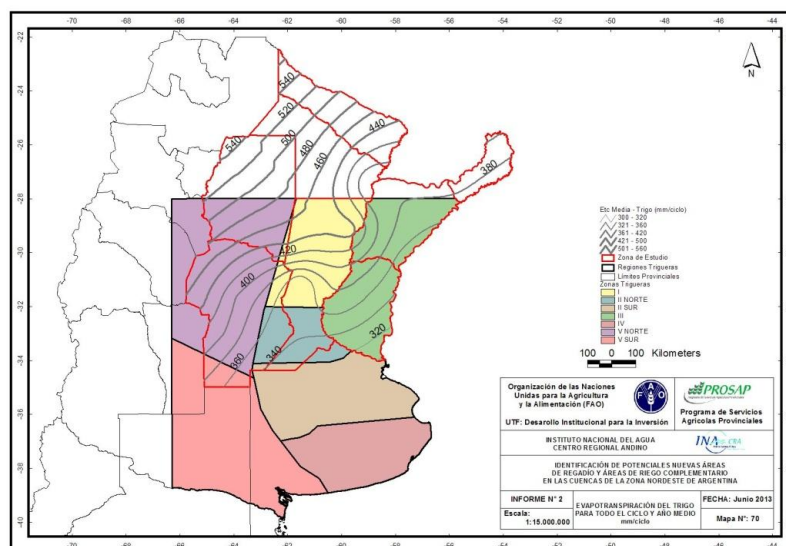


Figura 8: Evapotranspiración (ETc) del cultivo *trigo* para el *año medio* y para todo el ciclo en el área de estudio

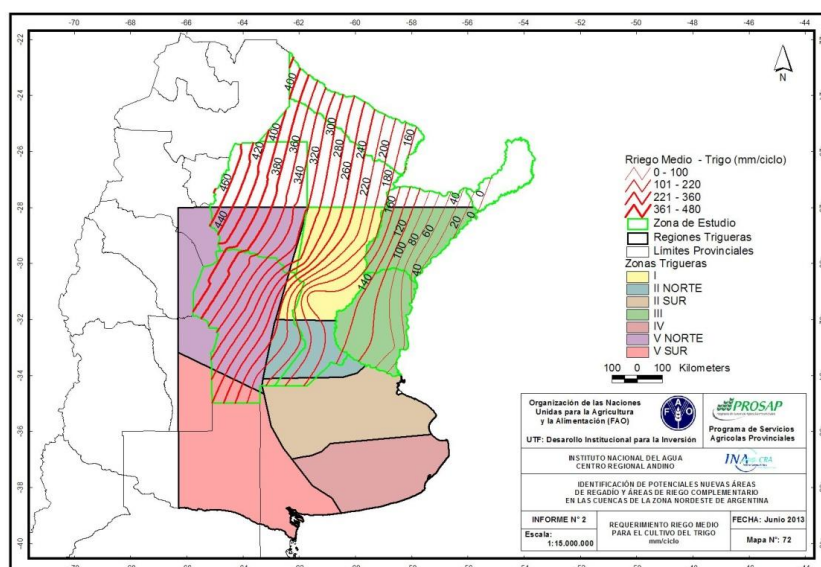


Figura 9: Requerimiento de riego *medio* del cultivo *trigo* para todo el ciclo, en el área de estudio

Para estimar la productividad del trigo en la región y en las distintas estaciones meteorológicas seleccionadas se procedió a correr -una vez calibrado- el modelo Aquacrop. La tabla 1 resume el valor de los parámetros obtenidos del ensayo y los simulados con el modelo (en las corridas se usaron valores por defecto).

La tabla 1 resume el valor de los parámetros obtenidos del ensayo y los simulados con Aquacrop. Interesa destacar que la producción simulada *con riego* supera a los registros de campo (pequeñas variaciones de la humedad en las condiciones iniciales de cultivo afectan la producción final, especialmente la de grano).

Para la validación de los resultados obtenidos (tabla 2) se eligió otro ensayo (Marano R. et al; 2009) con la variedad "Cronox", de ciclo intermedio, cultivado en el establecimiento "Miraflores" (Lat. 32°08´S, Long 60°58´W), Santa Fe, en el año 2009. El suelo fue un Argiudol-típico Serie Esperanza y el método de riego aspersión con pivote central (salinidad del agua de riego = 0,5 dS/m).

Tabla 1: Trigo: parámetros del ensayo a campo y obtenidos por simulación

Tratamiento		ET _o (mm)	ET _c (mm)	Pe (mm)	Riego (mm)	Biomasa MS total (kg ha ⁻¹)	MS grano (kg ha ⁻¹)	IC
Secano	Medido	441	379	203	0	7571	2143	0,28
	Simulado	544	316	260	0	7643	2174	
Riego	Medido	441	514	203	164	11112	3481	0,31
	Simulado	544	501	260	164	13698 (+23%)	3881 (11%)	

Tabla 2: Validación de la simulación para *trigo* bajo riego

Tratamiento	ET _o (mm)	ET _c (mm)	Pe (mm)	Riego (mm)	Biomasa MS total (kg ha ⁻¹)	MS Grano (kg ha ⁻¹)	IC
-------------	-------------------------	-------------------------	------------	---------------	---	------------------------------------	----

Secano	Medido	511	402	314	0	14527	5956*	0.41
	Simulado	457	406	444	0	13732	5640	
Riego Deficitario	Medido	511	488	314	64	14.771	7090*	0,48
	Simulado	457	-	444		14241(- 4%)	5839(-18%)	
Riego Total	Medido	511	524	314	64	14.171	6944*	0,49
	Simulado	457	-	444		14241 (+0,5%)	5839(-16%)	

*: Obtenido a partir del índice de cosecha IC.

Como resultado puede verse que la producción de biomasa final (al momento de la cosecha) ajusta muy bien a lo medido tanto en secano como con riego (tabla 2). En lo referido a producción de materia seca (grano) se obtuvo un buen ajuste para secano; para trigo regado se obtuvieron valores inferiores en un 17 % a lo realmente cosechado. Esto puede explicarse por el hecho de usar el mismo IC que para secano en lugar de ajustarlo para riego. La tabla 3 resume las necesidades netas y brutas de riego para los escenarios sin y con cambio climático:

Tabla 3: necesidades netas y brutas para una frecuencia acumulada del 80 %

Sin cambio climático (80 %)					
Parámetros	Todos los meses	Ago	Sept	Oct	Nov
Nec. Neta mm/mes	82	0	120	82	52
Nec. Neta (L/s)	0,32	0,00	0,46	0,32	0,20
Nec. Bruta (50 %)	0,63	0,00	0,93	0,63	0,40
Con cambio climático (80 %)					
Parámetros	Todos los meses	Ago	Sept	Oct	Nov
Nec. Neta mm/mes	100	82	90	140	64
Nec. Neta (L/s)	0,39	0,32	0,35	0,54	0,25
Nec. Bruta (50%)	0,77	0,63	0,69	1,08	0,49

La figura 10 muestra los incrementos de producción de grano generados por el riego para los escenarios sin y con cambio climático. Para el caso *sin cambio climático*, las láminas de riego totales a aplicar por ciclo variaron entre 0 y 300 mm (hasta con 3 riegos) y generaron incrementos productivos máximos de 4,7 Ton/ha (grano) mientras que *con cambio climático* la variación fue de 0 hasta 320 mm, también hasta con 3 riegos y los incrementos productivos máximos fueron de 7,5 Ton/ha (grano).

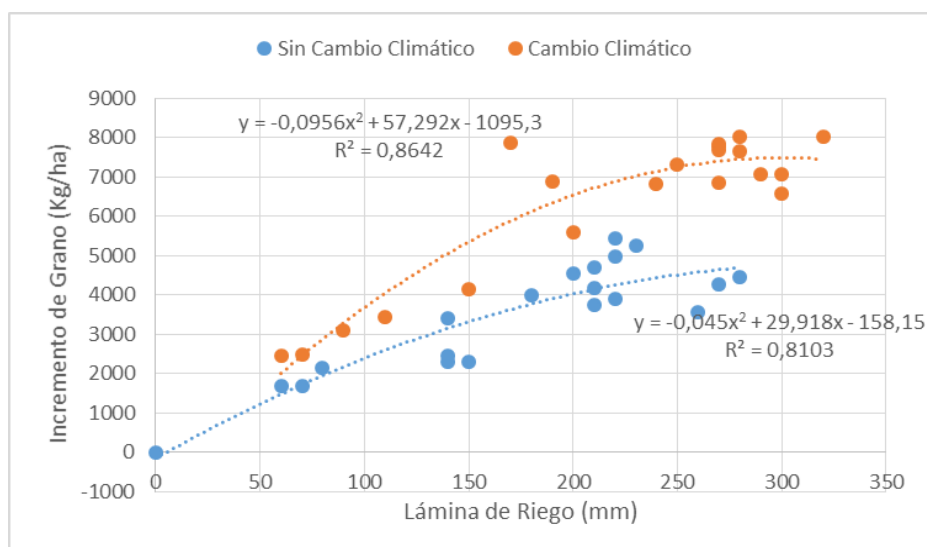


Figura 10: incremento de producción de grano generada por el riego sin y con cambio climático

Si se analiza la totalidad de riego (mm por mes) dados en los 20 años simulados considerando la situación actual y con cambio climático, se obtienen la tabla 4 y la figura 11.

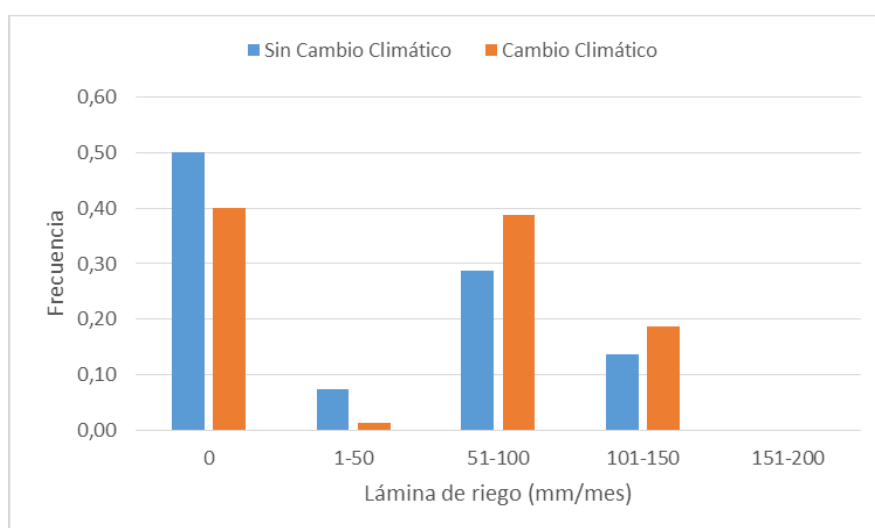


Figura 11: frecuencia relativa de ocurrencia de láminas mensuales de riego sin y con cambio climático Ceres

Se calcularon necesidades netas y brutas (50 % de eficiencia del sistema) para una frecuencia acumulada del 80 % considerando los riegos en su totalidad (todos) y para cada mes, sin y con cambio climático

Tabla 4: necesidades netas y brutas para una frecuencia acumulada de láminas de riego del 80 %

Sin cambio climático (80 %)					
Parámetro	Todos	Ago	Sept	Oct	Nov

Nec. Neta mm/mes	90	90	50	130	34
Nec. Neta (L/s)	0,35	0,35	0,19	0,50	0,13
Nec. Bruta (50%)	0,69	0,69	0,39	1,00	0,26
Con cambio climático (80 %)					
Parámetro	Todos	Ago	Sept	Oct	Nov
Nec. Neta mm/mes	102	72	120	104	64
Nec. Neta (L/s)	0,39	0,28	0,46	0,40	0,25
Nec. Bruta (50%)	0,79	0,56	0,93	0,80	0,49

Las figuras 12 y 13 presentan, respectivamente, las isolíneas de necesidades netas del trigo en la región de cultivo en el país para los escenarios *sin* y *con* cambio climático:

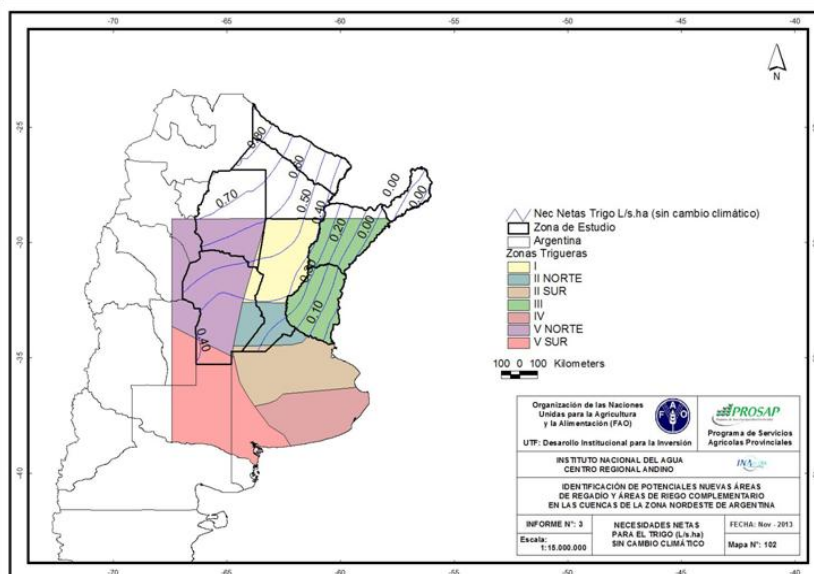


Figura 12: necesidades netas de trigo sin cambio climático

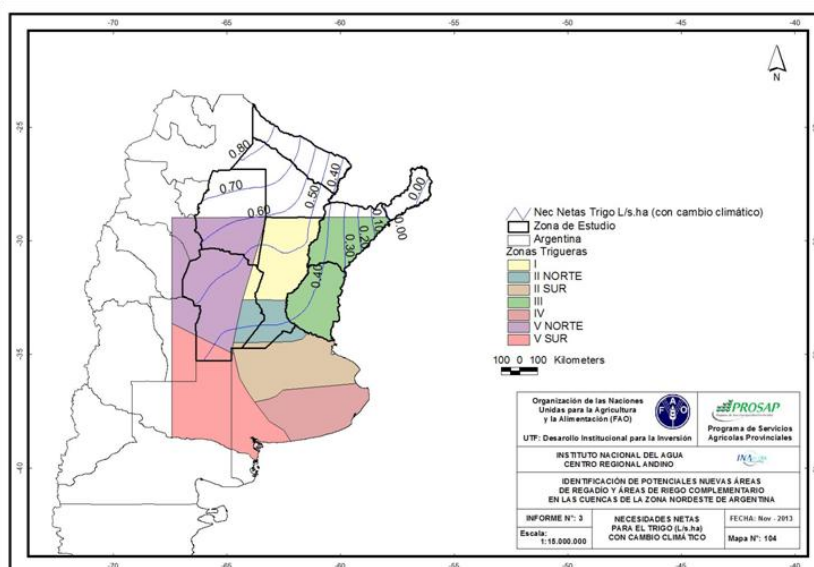


Figura 13: necesidades netas de trigo con cambio climático

Con el objeto de comparar los resultados de las producciones en secano y bajo riego simuladas por Aquacrop con los de diversos ensayos realizados en INTA Manfredi (serie 1969/94) se realizaron corridas en condiciones óptimas de fertilidad (100 %) y humedad (riego óptimo y condiciones iniciales de 90 % de capacidad de campo) para la estación Pilar: los resultados pueden verse en la tabla 5.

Tabla 5: Producciones medias obtenidas por INTA Manfredi (serie 1969/94) vs producciones simuladas para la estación Pilar en condiciones óptimas

Cultivo	INTA Manfredi Serie 1969/94		Producción Simulada		Producción Simulada Óptima
	Secano	Riego	Secano (Fert 60 %)	Riego (Fert 80 %)	Riego (Fert 100%)
Trigo	1850	5530	1914	5511	7003

La figura 14 ilustra los incrementos de producción de la tabla anterior. Se observa que lo simulado con niveles de fertilidad del 80 % genera incrementos menores que las simulaciones óptimas y que lo obtenido a campo.

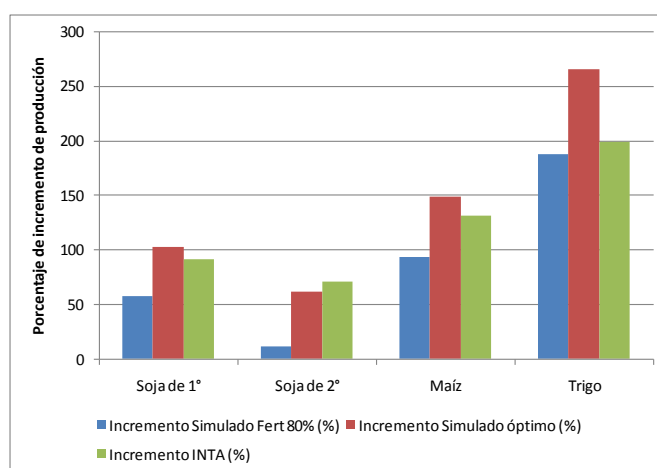


Figura 14: incremento de producción simulada (80 % de fertilidad y fertilidad óptima) versus rendimientos obtenidos a campo

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido disponer de: (a) la confección de una base de datos meteorológicos para las 16 estaciones seleccionadas como representativas del área de estudio; (b) los valores anuales de ETo y Pe; (c) los valores mensuales de ETo y su variabilidad y (d) la lluvia media mensual (Pp). Además, los mapas de isolíneas permiten estimar valores de ETo y Pe para aquellos sectores del área de estudio que no cuenten con información meteorológica más precisa.

Si se comparan los resultados obtenidos con el mapa de lluvia media anual del Programa Nacional de Eco-regiones del INTA se observa una alta coincidencia, con excepción del límite noreste (provincia de Misiones) donde estos últimos son un poco más elevados.

Por último, es interesante destacar que los resultados del presente estudio permiten disponer -para un lugar determinado (dentro de la zona considerada)- de un rápido acceso a los valores de las variables analizadas y hacen posible la toma de decisiones tanto para la elaboración de calendarios preliminares de riego ajustados a la evolución de las condiciones climáticas de un año dado como para el adecuado dimensionamiento de futuras obras de riego y la acertada selección de métodos y maquinarias de riego, contribuyendo al uso racional del recurso hídrico en la región. La información está disponible en <http://www.fao.org/americas/programas-y-proyectos/utf017arg/es/>

En lo referido al impacto del cambio climático puede verse que, el riego produciría incrementos de producción en maíz, trigo, soja de 1ª, girasol, algodón y soja de 2ª (en orden decreciente). Se verificaría un incremento de las necesidades de riego en todos los cultivos y un aumento de la producción en la mayoría de ellos, bajo los escenarios de cambio climático planteados.

BIBLIOGRAFÍA

Allen R., L. Pereira, D. Raes & M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Servicio de Recursos, Fomento y Aprovechamiento de Aguas. FAO. Roma, Italia. ISSN 0254-5293.

ESRI, I. ArcView, versión 3.2. 1999. Software: Sistema de Información Geográfica. 380 New York Street Redlands, USA.

Bianchi y Cravero. 2010. Atlas Climático Digital de Argentina. Programa Nacional de Eco-regiones del INTA

Carlesso R. 2008. La agricultura de Precisión y los Sistemas de Riego. Cyted, Perú. <http://ceer.isa.utl.pt/cyted/peru2008/>

Carmona Graciano M., Íñiguez L., Fereres Castiel E. 2008. Riego deficitario del algodón. Asociación española de riegos y drenajes. España.

http://www.geoscopio.com/est/gmms/aeryd/a2_riego_deficitario_del_algodon_62722.htm

Cacik, P.; Paoli, C.; Bolzicco J. 1990. "Programa AFMOM". FICH-UNL, Santa Fe, Argentina.

Camussi G. F., Marano R. P. 2008. Respuesta del trigo al riego suplementario en la región central de Santa Fe. Revista FAVE - Ciencias Agrarias 7 (1-2). Argentina. ISSN 1666-7719.

Dardanelli J., Collino D., Otegui M., y Sadras V. 2010. En producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Satorre E., Benech R., Slafer G., de la Fuente E., Miralles D., Ortegui M., y Savin R. Ed. Facultad de Agronomía. UBA. Argentina. ISBN 950-29-0713- 2.

De Azevedo P, Bezerra J, Da Silva V. 2014. Evapotranspiration and water-use efficiency of irrigated colored cotton cultivar in semiarid regions. Agricultural Sciences [serial online]. September 2012; 3(5):714. Publisher Provided Full Text Searching File, Ipswich, MA.

FAO-INA. 2013. Carta acuerdo: Identificación de potenciales nuevas áreas de regadíos y áreas de riego complementario en las cuencas de la zona nordeste de Argentina. Componente B: Determinación de Demandas Hídricas de Modelos

Productivos. Morábito J., Salatino S., Hernández R., Schilardi C., Mastrantonio L., Mirabile C., Álvarez A., Rodríguez P. P. Argentina.

Fereres, E.; Orgaz, F.; Gonzalez-Dugo V. 2011 "Reflections on food security under water scarcity". *J. Exp. Bot.* 62, pp 4079-4086.

FICH-UNL, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. 2006. Actividades habilitantes para la 2ª Comunicación nacional del gobierno de la República Argentina a las partes de la convención marco de ONU sobre cambio climático. TF 51287/ar. Componente "Vulnerabilidad de los recursos hídricos en el Litoral – Mesopotamia" 1-3. Argentina.

Giaveno, C.D., Pilatti, M.A. & Marano, R.P. Parte I y II. 2002. Riego suplementario en el centro de Santa Fe: maíz para silaje. Respuesta productiva en diferentes épocas de siembra. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias* 1 (2). Argentina.

Grassini P., Haishun Y, Suat I, John T., Charles B., Kenneth G. C. 2014. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Res.* [serial online]. n.d.; 120:133-141. Available from: Science Direct, Ipswich, MA.

Marano R.P.; Hermann, M.; Carnevale, I. 2006. Estudio de la dinámica hídrica del cultivo de soja de segunda en la región central de Santa Fe. Argentina.

Mieres, L. & Marano, R. 2010. Respuesta productiva del cultivo de girasol (*Helianthus annuus*) a riego suplementario en el NE santafesino. IV Jornadas Riego y Fertirriego. Mendoza, Argentina.

Morábito J., R. Hernández S., Salatino y C. Mirábito 2008. Cálculo de las necesidades de riego de los principales cultivos del Oasis sur. IV Jornadas Riego y Fertirriego. Mendoza, Argentina.

Morábito J., S. Salatino, R. Hernández, C. Schilardi, A. Álvarez, P. Rodríguez Palmieri. 2015. Distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia y de la precipitación efectiva para las provincias del centro-noreste de Argentina. *Revista Facultad de Ciencias Agrarias. UNCuyo.* En prensa. Argentina.

Paytas, M.; Mieres, L.; Longhi, T.; Agretti, S. 2012. Evaluación de diferentes estrategias de riego y su efecto en los componentes de rendimiento de algodón INTA Reconquista, Argentina.

Prieto Angueira, S.; Prieto Garra, D.R.; Angella G. A. 2012. Evaluación de diferentes estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. INTA EEA Santiago del Estero. U. Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Agronomía y Agroindustrias.

Rivetti, A.R. 2007. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Córdoba, Argentina. II. Producción de materia seca. *Rev. FCA UNCuyo.* T. XXXIX. 1. Pp. 29-39.

Salinas A., Martellotto E.; J. Giubergia, H. Salas; E. Lovera. 2009. Producción de trigo con riego suplementario en el área Centro Norte de la provincia de Córdoba. INTA-Manfredi, Argentina.

Salinas A.; E. Martellotto; J. Giubergia, C. Álvarez, M. Bocardo, I. Severina y A. Arce. 2012. INTA-EEA Manfredi. Resultados de 17 años de experiencia en el módulo demostrativo de riego de INTA Manfredi – Córdoba. 3º Reunión Internacional de Riego. Rendimientos potenciales con uso eficiente de agua e insumos. Manfredi – Córdoba - Argentina. ISBN 978-987-679-172-4.

Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina (SMN). 2013. Base de datos: serie 1971-2000. Argentina.

Smith, M. 1999. CROPWAT Windows versión 8.0. FAO. Italia.

Solé L. 2012. Determinación del rendimiento potencial de tres variedades de algodón (*Gossypium hirsutum*) en el Sud oeste chaqueño. Tesina de grado. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste.