

Relación estadística entre los rendimientos de maíz y la ocurrencia de deficiencias hídricas en el Depto. Rosario

Statistical relationship between corn yield and water deficiency occurrence in the Department of Rosario

Relação estatística entre o rendimento do milho e as deficiências hídricas na Região de Rosário

María José Dickie¹, Alejandra Coronel²

¹AER INTA Cañada de Gómez

²Facultad de Ciencias Agrarias - UNR
 majodi00@yahoo.com.ar

Resumen

Las condiciones ambientales de temperatura, radiación y agua son factores determinantes en el crecimiento, desarrollo y en la producción final del cultivo. El agua disponible es generalmente el principal factor que limita el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz en condiciones extensivas. El grado de sensibilidad al estrés hídrico en este cultivo depende del momento en que ocurra. Es muy sensible a situaciones de estrés hídrico durante la floración, lo cual determina que su período crítico es de 30 días centrados en floración. Estrés hídrico en etapas vegetativas afecta la expansión foliar reduciendo el índice de área foliar y la radiación incidente interceptada.

Desde el punto de vista agronómico y económico, es muy importante el análisis del impacto que las deficiencias hídricas severas (DHS) asociadas a sequías han tenido en un cultivo de gran difusión regional como el maíz.

El área de estudio está ubicada en el Departamento de Rosario con el objetivo de determinar el período crítico (PC) en el cultivo de maíz en relación a las deficiencias hídricas (DH). Se utilizaron técnicas de regresión lineal múltiple y análisis de agrupamiento. La información meteorológica pertenece a la estación de Zavalla (33°01'S, 60°53'W) y los datos de rendimiento de maíz al Departamento de Rosario.

Se determinaron dos PC de maíz según su impacto en el rendimiento; uno tiene lugar entre la 2ª decena de diciembre y 1ª decena de enero (floración e inicio de llenado de grano), y la otra, en la segunda decena de noviembre (etapa vegetativa). Cuando ocurren DHS, los rendimientos podrían disminuir hasta un 56%.

Palabras claves: Balance hídrico seriado; período crítico; regresión lineal múltiple

Summary

Environmental conditions such as temperature, sunlight, and water are determining factors in crop growth, development and yield. Available water is generally the main limiting factor in maize growth and yield under extensive productive conditions. The degree of maize sensitivity to water stress depends on the time the stress occurs. It is very sensitive to water stress situations during flowering, which extends for 30 days. Water stress during vegetative stages affects leaf expansion by reducing leaf area index and incident radiation interception.

From the agronomic and economic points of view, it is very important to analyze the impact of severe water deficiencies (SWD) associated with droughts on a regionally widespread crop as maize.

Maize yield data were collected from the Department of Rosario and weather information was obtained from the Zavalla meteorological station (33°01'S, 60°53'W). Multiple linear regression and cluster analysis techniques were used with the aim of determining the critical period (CP) in maize.

Two maize CPs were determined according to their impact on yield; one between the second ten days of December fortnight and the 1st ten days of January (flowering and start of grain filling), and the other in the second ten days of November (vegetative stage). When SWDs occur, yields could decrease by 56%.

Keywords: Serial water balance; critical period; multiple linear regression

Resumo

As condições ambientais de temperatura, radiação e água são fatores determinantes no crescimento, desenvolvimento e produção final da cultura. A água disponível é geralmente o principal fator que limita o crescimento e a produtividade da cultura do milho em condições extensivas. O grau de sensibilidade ao estresse hídrico depende do momento em que ela ocorre. Durante a floração é muito sensível, o que determina que seu período crítico seja de 30 dias centrado na floração. O estresse hídrico nos estágios vegetativos afeta a expansão foliar, reduzindo o índice de área foliar e a radiação incidente interceptada.

Do ponto de vista agronômico e econômico, é muito importante analisar o impacto que as deficiências hídricas severas (DHS) associadas às secas tiveram em uma cultura de grande difusão regional, como o milho.

A área de estudo localiza-se na região de Rosário. Com o objetivo de determinar o período crítico (PC) no cultivo de milho em relação às deficiências hídricas (DH), foram utilizadas técnicas de regressão linear múltipla e análise de agrupamento (Cluster). A informação meteorológica pertence à estação de Zavalla (33°01'S, 60°53'W) e os dados de rendimento de milho à região de Rosário.

Foram determinados dois PC de acordo com seu impacto no rendimento: um ocorre entre o 2º decêndio de dezembro e o 1º decêndio de janeiro (floração e início do enchimento de grãos) e o outro, no segundo decêndio de novembro (fase vegetativa). Quando ocorrem DHS, o rendimento pode diminuir em até 56%.

Palavras-chave: Balanço hídrico em série; período crítico; regressão linear múltipla

Introducción

El maíz, *Zea mays L.*, es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen y debido a sus grandes bondades y multitud de usos se ha convertido en el cultivo más importante entre los cereales a nivel mundial por su producción. En Argentina, la región maicera templada se extiende entre los paralelos de 31° y 40° de latitud sur y entre los meridianos 57° y 65° de longitud oeste, coordenadas que corresponden a la zona de la Pampa Húmeda y Subhúmeda argentina. En esta área, los factores climáticos (lluvias, temperaturas, evapotranspiración, etc.), a través de su acción individual o conjunta, introducen el «azar» en los sistemas productivos, detectándose en consecuencia grandes amplitudes en los rendimientos anuales promedio de maíz en la región, hecho que repercute fuertemente en el volumen total del país (Totis de Zeljkovich, 2012).

El agua disponible es generalmente el principal factor que limita el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz en condiciones extensivas. Tiene gran sensibilidad a la variabilidad temporal de los montos de precipitación, debido a su escasa extensión radicular (extractora de agua) en la capa sub-superficial del suelo y a una gran superficie foliar consumidora de agua (Sierra & Pórfido, 1980). El grado de sensibilidad al estrés hídrico en este cultivo, depende del momento en que ocurra (Andrade et al., 1996), y la magnitud de las pérdidas depende de la oportunidad, intensidad y duración del estrés y se manifiesta a través de la disminución de la cantidad de espigas por planta y de menor número de granos en la espiga (Westgate & Boyer, 1986). Carvallo et al. (2004) y Dickie et al. (2012) refieren que las fases más sensibles del cultivo de maíz al déficit hídrico, en orden decreciente son: floración, llenado de grano y desarrollo vegetativo.

Durante la floración es muy sensible a situaciones de estrés hídrico, dado que su principal órgano de interés comercial, la espiga, se encuentra relegada por la dominancia apical ejercida por la panoja, y es en este período en el que se define el número de granos (Echarte et al., 1998). Esta característica, junto con su hábito de crecimiento determinado, le confiere al maíz una marcada variabilidad de rendimiento frente a situaciones de estrés en floración (Andrade et al., 1996), lo cual determina que su período crítico es de 30 días centrados en la misma (Carcova et al., 2003).

Materiales y métodos

Caracterización de la región de estudio

El Departamento Rosario se ubica en el sudeste de la provincia de Santa Fe, dentro de la región de la Pampa Húmeda Argentina. Posee una superficie de 1890 km².

El clima de la región se caracteriza por temperaturas típicas de un clima templado, con veranos cálidos e inviernos suaves, con temperaturas medias entre 10°C en julio y 23.6°C en enero, siendo la media anual de 17°C. El período libre de heladas, de 278 días, abarca desde principios de septiembre hasta mediados de junio (Mancini et al., 2006). Presenta precipitaciones anuales que varían entre 678 mm y 1338 mm, con un régimen pluviométrico semi-monzónico cuya secuencia de mayor a menor lluvia es verano-primavera-otoño-invierno. Se observa además una gran variabilidad interanual en todas las estaciones del año, principalmente en invierno (Sacchi et al., 2002). En cuanto a los suelos, se pueden encontrar dos órdenes: los Molisoles y Alfisoles. Dentro de los Molisoles se encuentran los Argiudoles típicos y vérticos, estos suelos predominan en gran parte de la Pampa Ondulada (Sur de la provincia de Santa Fe). En tanto los Alfisoles, están asociados a posiciones deprimidas del relieve.

Dardanelli et al. (2003) manifiestan que el estrés hídrico en etapas vegetativas afecta la expansión foliar reduciendo el índice de área foliar y la radiación incidente interceptada.

Estas características lo hacen apto para estudiar su rendimiento en función del clima y por otra parte permite acotar el interés de este estudio a las llamadas sequías climáticas (Minetti et al., 2007). Desde el punto de vista agronómico y económico, es muy importante el análisis del impacto que las deficiencias hídricas (DH) severas (DHS) han producido a un cultivo de gran difusión regional como el maíz. Para ello es importante conocer la disponibilidad de agua edáfica, y las situaciones hídricas de excesos y de deficiencias. La estimación de estas variables puede realizarse mediante el balance hídrico (BH) climático (BHC) (Thornthwaite & Mather 1957) y el BH seriado (BHS). El BH es una metodología que cuantifica las entradas y salidas del sistema suelo-cultivo-ambiente, tomando como datos la precipitación (PP) y la evapotranspiración potencial (EP) locales, teniendo en cuenta además la capacidad de almacenaje del suelo.

Como resultado se obtienen la época y la magnitud de deficiencias (DEF) y excesos (EXC) hídricos. En el BHC la información de entrada son las PP medias mensuales y las EP medias mensuales de la serie histórica de datos disponibles, obteniéndose un único balance, representativo del estado medio del lugar. En el caso del BHS se calculan con todos los años de datos balances para cada año, por lo que se obtienen tantos balances meteorológicos como años de información se dispongan. Esto posibilita tener diferentes situaciones de deficiencias y excesos, permitiendo establecer frecuencias y probabilidades de ocurrencia (Coronel et al., 2012).

El objetivo del presente trabajo es determinar para el Departamento Rosario, provincia de Santa Fe, Argentina, el momento temporal de ocurrencia del período crítico de maíz en relación a la ocurrencia de DH y cuantificar las disminuciones de rendimiento que se generan por la ocurrencia de estrés hídrico en las principales etapas de desarrollo.

Información de rendimientos:

Los rendimientos (R) del cultivo de maíz del Departamento Rosario, para las campañas 1974/1975 a 2013/2014, se obtuvieron del Sistema Integrado de Información Agrícola (SIIA, 2015).

Análisis de los rendimientos de maíz

Los R del cultivo de maíz presentan un aumento en el transcurso del tiempo, es de esperar que esta tendencia creciente sea debida a la mejora de las prácticas agrícolas y al mejoramiento genético. Por lo cual muchos trabajos, filtran las tendencias de la productividad previamente y postulan que los cambios de larga escala son únicamente debidos a la tecnología y genética (Hurtado et al., 2003, Fernández Long et al., 2011; Dickie et al., 2012).

Se filtró la componente tendencia de la serie original a través de la función que ajusta mejor a la serie de datos (Raj), generándose la serie de rendimiento sin tendencia (Rst). De este modo sólo se analizó el efecto climático sobre el R.

Información meteorológica:

Las estaciones meteorológicas oficiales que se ubican en este Departamento son: Rosario Aero (32°55'S, 60°47'O), pertenece

ciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y Zavalla (33°01' S, 60°53' O) perteneciente a la red del SMN y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). La estación Rosario Aero se ubica muy cerca de la ciudad de Rosario, mientras que Zavalla es una estación agrometeorológica ubicada en una zona esencialmente agrícola. Por lo tanto, se toma a esta última localidad como representativa de las condiciones climáticas del Departamento Rosario.

La información meteorológica utilizada corresponde a series diarias de temperatura media (T_{med} , °C), máxima ($T_{máx}$, °C) y mínima ($T_{mín}$, °C), humedad relativa media (HR_m , %), heliofania efectiva (H_{ef} , horas), velocidad de viento (V , m/s) y precipitación (PP , mm) correspondiente al período 1974-2014.

Cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ET_o):

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. La ET_o diaria se calculó a través de la ecuación de Penman-Monteith recomendada por FAO (Allen et al., 1998)

$$ET_o = \frac{0,408 D(R_n - G) + g \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{D + g(1 + 0,34 u_2)}$$

Dónde:

ET_o: evapotranspiración potencial (mm/día)

R_n = energía de radiación neta (MJ/m².día)

G = flujo de calor latente desde el suelo (MJ/m²)

T = temperatura promedio (°C)

γ = constante psicrométrica.

e_s - e_a = déficit de presión de vapor

e_s = presión de vapor a saturación a la temperatura promedio del aire (kPa)

e_a = presión de vapor actual (kPa)

u₂ = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).

Δ = pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica (kPa/°C)

Cálculo del Balance hidrológico seriado decádico:

Se utilizó el BHS basado en la metodología de Thornthwaite & Mather (1955) y en escala decádica (BHSd) (cada diez días), a fin de estimar con mayor precisión las DH y el PC.

Los valores de capacidad de campo (CC) y de punto de marchitez (PM) se tomaron de Fernández Long et al. (2012) y de Busso & Ausilio (1989). Se utilizaron los valores de 250 mm y 135 mm, respectivamente.

El valor de almacenaje de la decena t, se obtiene sumando el almacenaje de la decena t-1 y el valor de la diferencia PP-ET_o si esta diferencia es positiva. Si esta diferencia es negativa, el valor de almacenaje de la decena t (Alm_t) se obtiene a partir de la siguiente Ecuación 1 (Murphy & Hurtado, 2011):

Ecuación 1

$$Alm_t = Alm_{t-1} * e^{(PP-ET_o)/CC}$$

Resultados y Discusión

Variación de los rendimientos

El R promedio de las 40 campañas analizadas es de 5.501 kg.ha⁻¹ variando entre 1.449 kg.ha⁻¹ en la campaña 1975/1976 y 10.000 kg.ha⁻¹ en 2009/2010 (Figura 1).

La tendencia de los R se ajusta a través de un polinomio de segundo grado (Raj). El aumento de Raj entre la primera y la

Dónde:

Alm: Almacenaje del suelo (mm)

PP: Precipitaciones (mm)

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm)

CC: Capacidad de campo (mm)

De acuerdo a Fernández Long et al. (2012) y Murphy & Hurtado (2011) se determinaron los siguientes pasos del BHSd.

Cuando el Alm supera la CC se considera que el agua restante no puede permanecer en el suelo, por lo tanto escurre. A esa cantidad de agua se la llama exceso, y se la estima mediante la

Ecuación 2:

$$EXC_t = Alm_{t-1} + DP_t - CC$$

donde DP_t = ET_o - PP_t

Luego se calcula el ΔAlm a partir de la Ecuación 3:

$$\Delta Alm_t = Alm_t - Alm_{t-1}$$

Cuando ΔAlm es negativo indica que el suelo se está secando, y esa cantidad de agua se pierde a través de la evapotranspiración real (ER), por lo tanto se estima mediante la Ecuación 4:

$$ER = |\Delta Alm| + PP$$

En cambio, cuando el ΔAlm es positivo indica que el suelo se está recargando. En estos casos la ER va a ser igual a la ET_o debido a que el suelo tiene suficiente agua para evapotranspirar lo que la atmósfera demanda y, lo que resta se almacena en el suelo, entonces:

$$ER = ET_o$$

Cuando la ER es menor que la ET_o se considera que las plantas comienzan a sufrir un estrés hídrico, por lo tanto se calcula el déficit (DH), Ecuación 5:

$$DH = ER - ET_o$$

Determinación objetiva del PC de maíz

Para definir el PC se utilizó una metodología objetiva que analiza la relación estadística entre los R y las series de DH obtenidas a partir de un BHS decádico (diez días).

Se calculó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) entre la serie de Rst y las series de las DH decádicas (primera decena de noviembre a última decena de enero, 9 series), a fin de determinar las decenas que presentan asociación lineal significativa (probabilidad < 0,05%).

Para la selección de las DH decádicas significativas como variables regresoras del Rst se aplicó la técnica de regresión lineal múltiple con el método de stepwise, tomando como criterio de entrada y de retención el valor t = 0,1. Se determinaron los parámetros estadísticos básicos de cada variable regresora seleccionada: promedio, desviación estándar, máximo, mínimo, primer y segundo tercil (33% y 66%). Debido a que los valores de DH son negativos se definieron las DH severas, moderadas y leves a partir del siguiente criterio:

DH severa: cuando la DH es menor o igual al primer tercil

DH moderada: cuando la DH es mayor al primer tercil y menor o igual al segundo tercil

DH leve: cuando la DH es mayor al segundo tercil

última campaña considerada, es de un 189% (Figura 1).

Los Rst, Figura 2, muestran una variación durante el período de análisis que se considera producto de la variabilidad climática. Se evidencian oscilaciones de Rst, determinando 21 campañas en las cuales el R es superior al Raj y en 19 campañas ocurre lo contrario.

Figura 1: Evolución del rendimiento del cultivo de maíz y su tendencia ajustada a través de un polinomio de segundo grado. Período 1974-2014.

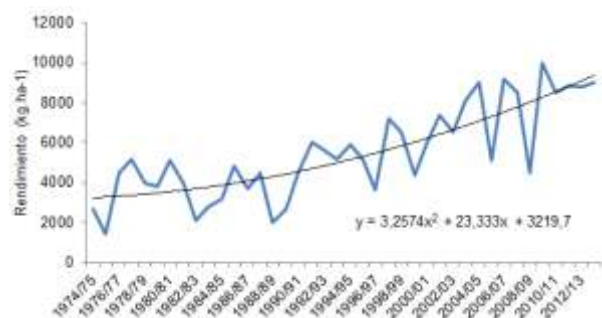


Figura 2: Evolución del rendimiento del cultivo de maíz y del rendimiento sin tendencia. Período 1974-2014.

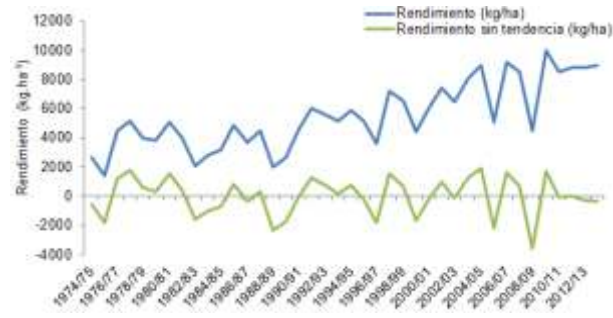


Tabla 1: Porcentaje de decenas con Deficiencias Hídricas y con Excesos. 1973-2014

	1° decena		2° decena		3° decena	
	DEF	EXC	DEF	EXC	DEF	EXC
NOV	67	3	64	10	74	5
DIC	71	5	69	5	71	13
ENE	69	5	74	3	72	5

Ref.: Noviembre (NOV), diciembre (DIC) y enero (ENE)
% de decenas con DH y EXC

Balance hídrico seriado

Del análisis del BHSd se encuentra que en el 64% de las decenas ocurrieron DH, el 29% no presentan DH o EXC y en el 7% restante se producen EXC hídricos.

En todas las decenas de los meses de noviembre, diciembre y enero se destaca un mayor porcentaje de situaciones con DH, respecto de situaciones de EXC (Tabla 1). Si bien durante el período primavera – verano ocurren las mayores PP en la región, las altas temperaturas y la fuerte insolación aumentan la ETo produciendo en forma frecuente DH en el suelo. Coronel et al. (2012) encuentran que en Zavalla durante noviembre a enero ocurren las DH de mayor intensidad, ya que es esperable que en uno de cada cuatro años (p=25%) ocurran DH por debajo de 40 mm. Estas DH de diferente intensidad, tienen efectos más severos cuando mayor es la degradación de los suelos y el manejo del mismo no contribuye a mejorar el almacenamiento de agua (Pedrol et al., 2006).

Determinación del PC

Una vez realizado el BHSd, se analiza estadísticamente la correlación entre las series decádicas de DH y del Rst, con el objetivo de determinar el PC. Del análisis realizado se determina que la 1° decena de enero presentó el mayor valor de correlación: 0,77; seguida por la 3° decena de diciembre y la 2° decena de noviembre, presentando estas últimas una correlación del 0,61; cabe destacar que todas las correlaciones son estadísticamente signi-

Tabla 2: Correlaciones entre DH y Rst. Período 1974-2014.

	1° decena	2° decena	3° decena
NOV	0.40	0.61	0.25
DIC	0.45	0.56	0.61
ENE	0.77	0.37	0.54
FEB	0.27	0.11	0.09

Ref.: Los valores resaltados son estadísticamente significativos al 5%

ficativas con la excepción de la 3° decena de noviembre (Tabla 2). En consecuencia las series de DH de estas decenas explican entre un 14% (2° decena de enero) y un 59% (1° decena de enero) de la variabilidad de los Rst de maíz.

El modelo obtenido a partir de la técnica de regresión lineal múltiple con el método stepwise, tomando como variables regresoras a las DH decádicas de noviembre, diciembre y enero, selecciona las siguientes variables de acuerdo a los criterios de entrada y retención considerados: DH 2° decena de noviembre (DH2N), DH 2° decena de diciembre (DH2D) y DH 1° decena de enero (DH1E). Los valores estadísticos del modelo obtenido se muestran en la Tabla 3.

Debido a que la DH 3° decena de diciembre (DH3D) presenta una correlación significativa con Rst, que está comprendida entre dos de las variables regresoras seleccionadas por el modelo estadístico (2° decena de diciembre y 1° decena de enero), y que junto a estos dos períodos representaría el estadio de floración del cultivo de maíz se toma el criterio de considerar como una cuarta variable regresora a la DH3D. De este modo el modelo obtenido presenta los estadísticos asociados que se muestran en la Tabla 4.

En base a esta metodología se establecen dos períodos críticos: segunda decena de noviembre (PC1) y segunda decena de diciembre a primera decena de enero (PC2). Dickie et al. (2012)

Tabla 3: Parámetros estadísticos modelo de regresión múltiple con tres variables

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	1219,86	183,64	847,43	1592,3	6,64	<0,0001		
DH1E	44,33	8,8	26,48	62,18	5,04	<0,0001	27,71	1,47
DH2N	19,98	11,69	-3,72	43,68	1,71	0,096	5,87	1,56
DH2D	21,66	10,31	0,75	42,58	2,1	0,0428	7,32	1,35
R2= 69								

Tabla 4: Parámetros estadísticos del modelo de regresión múltiple con cuatro variables

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	1208,81	186,47	830,25	1587,37	6,48	<0,0001		
DH2N	20,91	11,92	-3,28	45,11	1,75	0,0881	7,02	1,59
DH2D	24,33	11,46	1,07	47,6	2,12	0,0409	8,41	1,6
DH3D	-6,47	11,6	-30,01	17,07	-0,56	0,5802	4,33	2,65
DH1E	7,76	10,81	25,82	69,7	4,42	0,0001	23,02	2,18
R2=69								

Tabla 5: Parámetros estadísticos del modelo de regresión múltiple con dos variables

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	1172,75	199,36	768,81	1576,69	5,88	<0,0001		
DHPC1	22,8	12,77	-3,08	48,69	1,79	0,0824	5,13	1,59
DHPC2	20,24	4,09	11,96	28,52	4,95	<0,0001	25,92	1,59
R2=62								

Tabla 6: Parámetros estadísticos de los modelos de regresión múltiple con dos y cuatro variables estandarizadas

	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Constante	0	0,1	-0,2	0,2	0	>0,9999		
DHPC1	0,23	0,13	-0,03	0,48	1,79	0,0824	5,13	1,59
DHPC2	0,63	0,13	0,37	0,89	4,95	<0,0001	25,92	1,59
Constante	0	0,09	-0,19	0,19	0	>0,9999		
DH2N	0,21	0,12	-0,03	0,45	1,75	0,0881	7,02	1,59
DH2D	0,26	0,12	0,01	0,5	2,12	0,0409	8,41	1,64
DH3D	-0,09	0,15	-0,4	0,23	-0,56	0,5802	4,33	2,65
DH1E	0,61	0,14	0,33	0,9	4,42	0,0001	23,02	2,18

y Minetti et al. (2007), a partir de series mensuales, detectaron que las mayores correlaciones entre R de maíz y DH o entre R e índice de sequía, respectivamente, ocurren de noviembre a enero. De este modo se observa que al disminuir la escala de análisis, de mensual a decádica, se puede discriminar dos PC a lo largo del período noviembre – enero.

Se suman las DH que corresponden al PC2 y se toma como una variable única (DHPC2) y se recalcula el modelo de regresión con dos variables, cuyos estadísticos se presentan en la Tabla 5. Se observa una disminución del R^2 al sumar las DH, pero este nuevo modelo nos permite determinar que cada mm de DH en el PC1 estaría asociado a una disminución de 22,8 kg.ha⁻¹ del R (considerando cero la DH en el PC2), mientras que si este valor de DH se produce en el PC2 la disminución en el R es de 20,2 kg.ha⁻¹ (asumiendo un valor nulo de la DH en el PC1).

La Tabla 6 presenta los coeficientes de regresión de ambos modelos considerando a las variables estandarizadas. En el caso de considerar las DH durante PC1 y durante PC2 en forma integrada, el efecto esperado de la DHPC2 en el Rst es de 0,4 desvíos estándar más que el cambio esperado por el efecto exclusivo de las DHPC1. Al tomar las DH de cada decena que integra el PC2 se determina que la que tiene mayor efecto es la DH1E.

Para determinar a qué estadio del ciclo corresponde cada PC encontrado, hay que tener en cuenta la fecha de siembra. Dado que no se cuenta con la fecha de siembra de cada campaña analizada se realizarán inferencias a partir de las fechas de siembra más probables según la bibliografía.

Pedrol et al. (2004) exponen que en siembras tempranas (fin de agosto, principios de septiembre) existe un menor riesgo de estrés hídrico durante el período crítico porque la ocurrencia de antesis es más temprana. En siembras más tardías (fin de septiembre, octubre), las temperaturas del suelo son más altas y generalmente se logra una mejor implantación. La floración puede ocurrir hacia fines de diciembre o principios de enero, por lo tanto el éxito del cultivo es muy dependiente de las lluvias del mes de enero. En el caso de fechas normales para la zona núcleo, mediados de septiembre a principios de octubre, el período de floración transcurre en diciembre (Steccone et al., 2013). Por último, se encuentran los maíces tardíos con siembras de fines de noviembre a principios de enero, cuyo período de floración puede ocurrir en febrero.

En consecuencia, para fechas normales de siembra el PC1 ocurriría dentro del estado vegetativo y el PC2 durante el estadio de floración e inicio de llenado de granos. En fechas de siembras muy tempranas el PC1 podría estar asociado a la etapa de floración.

En la Figura 3 para las 19 campañas en las que se produjeron Rst negativos, se presentan los porcentajes de disminución del R respecto del Raj a través del polinomio de segundo grado. Las campañas se ordenaron de manera ascendente respecto al porcentaje de disminución de los R. Las disminuciones superiores a 26% corresponden a disminuciones severas ya que se encuentran en el último tercil de la serie.

Las campañas que cumplen con esta condición son 9, siendo en orden ascendente: 1983/84 (26%), 1999/00 (27%), 2005/06 (30%), 1996/97 (33%), 1989/90 (39%), 1982/83 (43%), 2008/09 (44%), 1988/89 (54%), 1975/76 (56%). En las campañas 1999/00, 2005/06, 2008/09, 1988/89, 1975/76 tanto la DHPC1 como la DHPC2 corresponden a DH severas; en las campañas 1983/84 y 1989/90 ocurren DHPC2 severas y DHPC1 igual a "cero"; mientras que en las campañas restantes (de las 9) se observan DHPC1 severas y DHPC2 moderada para 1982/83 y leve para 1996/97.

Teniendo en cuenta los coeficientes de regresión lineal múltiple con variables estandarizadas para las DH de ambos PC y los resultados señalados en el párrafo anterior, se determina, para fechas normales de siembra, una mayor incidencia de las DH severas ocurridas durante el período de floración e inicio de llenado de granos en la disminución de los R de maíz, respecto a la influencia de las DHPC1 asociado a la etapa vegetativa.

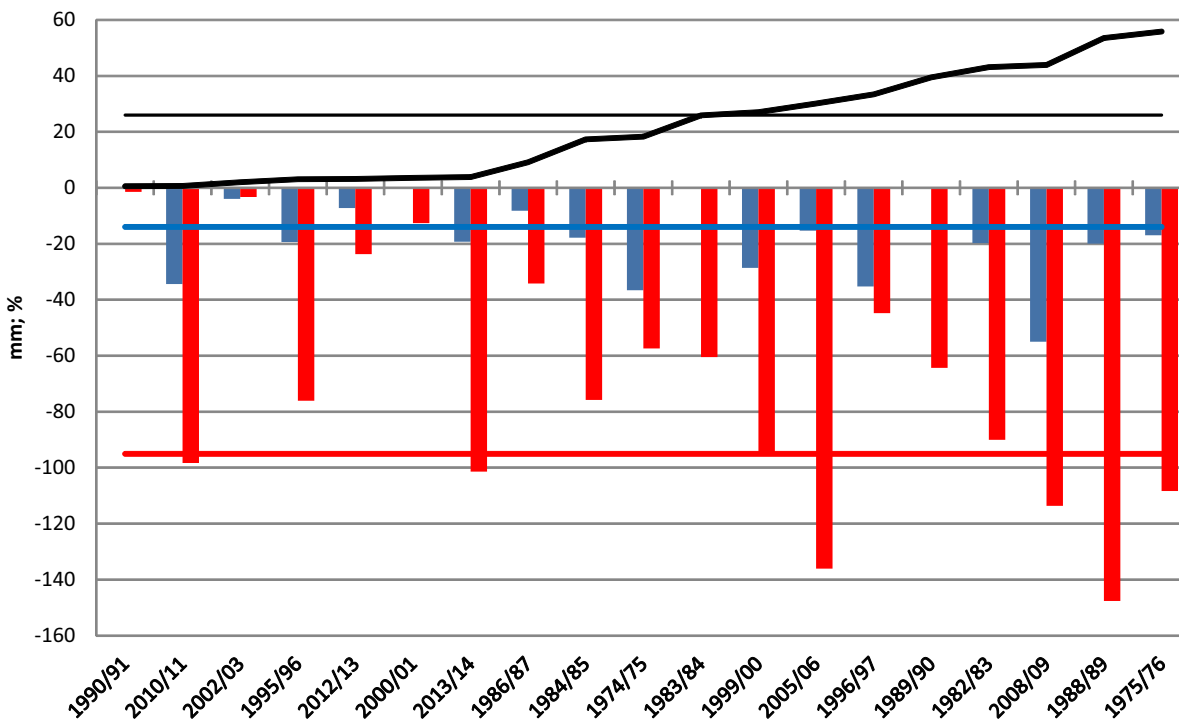
Las 10 campañas restantes presentaron una disminución inferior al 18% en el R, destacándose que en las campañas 2010/11 y 2013/14 en las cuales se produjeron DH severas en ambos PC no se reflejó en una merma severa del R. El resto de las campañas se caracterizan por DH del PC2 leves a moderadas, si bien en 3 campañas la DH del PC1 fueron severas.

El momento de ocurrencia de las DH afecta al cultivo de diferente manera. Una DH durante el estado vegetativo (V6 a V8), período coincidente con el primer PC determinado, para fechas normales de siembra, tiene como consecuencia inmediata la pérdida de turgencia en sus tejidos resultando de este modo una menor tasa de crecimiento y menor tamaño final de los órganos los cuales en el momento de ocurrencia del estrés se encuentran en activo crecimiento. El efecto de las DH sobre la producción del cultivo opera, en gran parte, a través de la reducción de la expansión de las hojas y, en consecuencia, en la eficiencia de captación de radiación, aunque sequías intensas afectan también su eficiencia fotosintética (Dardanelli et al., 2003). En el período estacional de gran crecimiento vegetativo cuando la generación de biomasa es óptima, se produce el mayor aprovechamiento de la energía disponible para la evapotranspiración (energía + agua). En este estadio la demanda de agua del cultivo es mayor, y cualquier DH es de gran impacto en la productividad final (Miretti et al., 2007).

Las reducciones del rendimiento encontradas en situaciones de DHPC1 severas coinciden con los resultados hallados por Avendaño et al. (2008) y Cakir (2004) y se deben a la estrecha relación entre la reducción del área foliar con una reducción del rendimiento (Saini & Westgate 2000, citado por Avendaño et al., 2008).

Frente a situaciones de estrés hídrico, el cultivo de maíz presenta estrategias para posponer la deshidratación limitando la pérdida de agua desde el follaje a través del acartuchamiento de las hojas, el cierre de estomas, la reducción de la expansión foliar y la senescencia foliar. El maíz presenta alta sensibilidad estomática frente al déficit hídrico, cerrando sus estomas para reducir las pérdidas de agua (Cirilo et al., 2012).

Figura 3: Porcentaje de disminución del rendimiento respecto del estimado ordenado de menor a mayor (línea negra), DH de la segunda decena de noviembre (barras azules) y la suma de las DH de las primera y segunda decenas de diciembre y de la primera decena de enero (barras rojas). Línea gris: segundo tercil (66%) de los porcentajes de disminución de los rendimientos observados. Los valores negativos menores a la línea azul corresponden a DHPC1 severas y los menores a la línea roja a DHPC2 severas.



Una DH severa durante el segundo PC encontrado, coincidente con la etapa de floración e inicio de llenado de granos para fechas normales de siembra, produce una pérdida de rendimiento severa ya que se ha podido observar que durante la formación de los gametos la planta es altamente sensible al déficit de agua; siendo el gametofito masculino la estructura más sensible, induciendo principalmente esterilidad (Avendaño et al., 2008). Por otro lado, durante el desarrollo reproductivo el estrés hídrico reduce el número de granos debido a caídas en las tasas de fotosíntesis y en el flujo de asimilados a los órganos en desarrollo (Schussler & Westgate, 1995) e incrementan la asincronía entre la liberación de polen y la emergencia de los estigmas lo cual provoca fallas en la polinización (Hall et al., 1982).

Las disminuciones en los R son mayores cuando ocurren DH severas en ambos PC, llegando esta merma a un 56%, ya que es afectado tanto el crecimiento vegetativo como el número de granos. Estos valores son coincidentes con los hallados por Giménez (2012) para el Departamento de Paysandú (República Oriental del Uruguay).

El menor efecto en la reducción de los Rst de las DHPC1 va a depender de que el cultivo pueda recuperar área foliar una vez superado el estrés y llegar al período crítico (PC) de la floración con una buena cobertura del suelo (Abrecht & Carberry, 1993; Andrade et al., 1996). En el caso en que las DH continúen, especialmente durante el PC2, y el cultivo no pueda recuperar su cobertura entonces sí se afectará fuertemente el crecimiento y por ende el número total de granos.

En el cultivo de maíz, la fecha de siembra (FS) es una de las prácticas más asociada a las variaciones del rendimiento. La elección de la FS depende de la distribución de PP, la temperatura del suelo, riesgo de heladas tardías y el momento de ocurrencia del PC y de la maduración del grano. Por lo tanto, el efecto de la temperatura y de las precipitaciones, durante el ciclo

Conclusiones

Luego de analizarse las DH, analizados mediante el BHSd, y los Rst del cultivo, se puede concluir que se determinaron dos PC de maíz. Por orden de su impacto en la disminución del rendimiento, el primero ocurre entre la 2° decena de diciembre y 1° decena de enero (PC2), cuando se encuentra en floración, R1 (Estado Reproductivo) e inicio de llenado de granos, y el otro momento crítico (PC1) se presenta en la 2° decena de noviembre,

del cultivo, influyen sobre el resultado final. Cirilo (2015) menciona que “en la región, las fechas de siembra temprana presentan los mayores rendimientos potenciales, aunque en años en los que hay carencias hídricas, sumado a temperaturas altas, los rindes pueden caer drásticamente hasta la mitad. A pesar de que la siembra tardía tiene menos potencial, la disponibilidad de agua durante la floración determina mayor estabilidad interanual de los rindes alcanzables. En años secos, el atraso de la fecha de siembra expone a los cultivos a una mejor oferta de agua en floración”.

En las últimas campañas la fecha de siembra comenzó a desplazarse hacia principios y mediados de diciembre y con ello el PC se traslada hacia febrero. Debido a esto, el cultivo se enfrenta a condiciones climáticas que difieren con las esperadas para una FS normal con consecuencias en el rendimiento (Steccone et al., 2013). Si bien en FS tardías las temperaturas y la radiación incidente durante el llenado de granos son menores, su impacto sobre el R es inferior en comparación con el producido por una DHS durante el PC (Steccone et al., 2013).

Borrás & Gambín (2012) plantean que “los maíces tardíos (siembras de fines de noviembre a principios de enero) han adquirido importancia en los últimos años. El buen rendimiento obtenido a pesar de su menor potencialidad respecto a fechas tempranas (Otegui et al., 2002; Maddonni, 2012) ha convertido a las siembras de maíz tardías en una alternativa interesante dentro del sistema productivo”.

Cuando las precipitaciones aumentan desde la primavera la siembra de maíz en fecha tradicional o normal se ve favorecida. En cambio, en años donde las lluvias de primavera disminuyen, la tendencia que se acentúa es la siembra en el mes de diciembre. Las máximas lluvias de verano suelen ocurrir en el período enero-febrero-marzo, coincidiendo con la floración de los maíces tardíos (Ferraris & Couretot, 2014).

en este período ocurre la emergencia y el cambio de estado del meristema apical, dando por finalizada la etapa vegetativa.

Cuando ocurren DH severas en ambos PC los rendimientos de maíz pueden disminuir hasta un 56% respecto de los rendimientos esperados.

Bibliografía

- ABRECHT D & CARBERRY P** (1993). The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Res.*, 31, 55-69.
- ALLEN R, PEREIRA L, RAES B, SMITH M** (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Disponible en: http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140_watres/handouts/FAO_56_Evapotranspiration.pdf. Acceso: 1 de febrero de 2016.
- ANDRADE FH, CIRILO AG, UHART SA, OTEGUI ME** (1996). Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa-EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 p.
- AVENDAÑO-ARRAZATE HC, MOLINA-GALAN J, TREJO-LÓPEZ C, LÓPEZ-CASTAÑEDA, CADENA-ÍÑIGUEZ J** (2008) Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 19(1), 27-37.
- BORRÁS L & GAMBÍN B** (2012) Resultados de la red de ensayos de maíces tardíos 2011/12, Zona Núcleo Pampeana. AAPRESID 2012, 17-22. Disponible en: http://www.aapresid.org.ar/sistemachacras/wpcontent/uploads/sites/6/2013/02/RMT12_001.pdf. Acceso 2 de febrero de 2016.
- BUSSO A & AUSILIO A** (1989) Mapa de suelos del Campo Experimental José F. Villarino. Publicación Técnica N° 5. FCA-UNR.
- CAKIR R** (2004) Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89, 1-16.
- CARCOVA J, BORRÁS L, OTEGUI ME** (2003) Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad del maíz. En: *Producción de Granos: Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía, UBA (ed) BsAs., Arg. 135-157.

9. **CARVALLO MR, SORATTO M, ATHAYDE O, ARF O, DE SÁ M** (2004) Produtividade do milho em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional. *Pesq. Agropc. Brás.*, 39(1), 47-53.
10. **CIRILO A** (2012) ¿Cómo afecta al rendimiento la fecha de siembra? Disponible en <http://www.agritotal.com/0/vnc/nota.vnc?id=2386>. Acceso: 5 de febrero de 2016.
11. **CIRILO A** (2015) Maíz tardío, una elección que aporta estabilidad. *INTAinforma 2015* Disponible en <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=29979>. Acceso: 5 de febrero de 2016.
12. **CORONEL A, SACCHI O, COSTANZO M** (2012) Variabilidad climática de los componentes del balance hídrico seriado en el sur de Santa Fe. *Ciencias Agronómicas*, XIX, 007-011.
13. **DARDANELLI J, COLINO D, OTEGUI E, SADRAS O** (2003) Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En *Producción de Granos: Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía, UBA (ed) Bs As., Arg., 377-434.
14. **DELLA MAGGIORA A, IRIGOYEN A, MALENA L, CAMBARERI MA** (2012) Deficiencias hídricas para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense según fecha de siembra. *Anales XIV Reunión Argentina de Agrometeorología*. Malargüe, Mendoza, 45-46.
15. **DICKIE MJ, SACCHI O, CORONELA** (2012) Relación entre el rendimiento de maíz y variables del balance hídrico seriado en el departamento Rosario, Santa Fe. *Anales XIV Reunión Argentina de Agrometeorología*. Malargüe, Mendoza, 85-86.
16. **ECHARTE L, DELLA MAGGIORA AI, IRIGOYEN AI, DOSIO G** (1998) Disminución del rendimiento en el cultivo de maíz debido a los déficits hídricos ocurridos en la localidad de Balcarce. *X Congreso Brasileiro de Meteorología y VIII Cong. de la Fed. Lat e Ibérica de Soc. de Meteorología*. Brasilia. Brasil.
17. **FERNÁNDEZ-LONG ME, SPESCHA L, HURTADO R, MURPHY G** (2011) Impacto del ENOS sobre los rendimientos de maíz en la región pampeana argentina. *Agriscientia* 28, 31-38.
18. **FERNÁNDEZ-LONG ME, SPESCHA L, BARNATÁN I, MURPHY G** (2012) Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). *REV. Facultad de Agronomía UBA*, 32(1-2), 31-47.
19. **FERRARIS G & COURETOT L** (2014) Elección de ambientes, rendimiento y fertilización de maíz según fecha de siembra. *INTA EEA Pergamino. Informe técnico*. 7 p.
20. **GIMÉNEZ L** (2012) Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de Desarrollo. *Agrociencia Uruguay*, 16(2), 92-102.
21. **HALL AJ, VILELLA F, TRAPANI N, CHIMENTI CA** (1982) The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*, 5, 349 - 363.
22. **HURTADO R, SPECHA L, FERNANDEZ-LONG ME, MURPHY GM** (2003) Evaluación del ENSO como predictor de los rendimientos de maíz en la Región Pampeana (Argentina). *Rev. Fac. de Agronomía*, 23, 131-139.
23. **MADDONNI GA** (2012) Analysis of climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina – a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.*, 107, 325-345.
24. **MANCINI M, CORONELA, SACCHI O, COSTANZO M** (2006) Las heladas en Zavalla: ¿Sufrieron modificaciones en los últimos años? *Agromensajes de la facultad*, 20.
25. **MINETTI JL, VARGAS WM, VEGA B, COSTA MC** (2007) Las sequías en la Pampa Húmeda: impacto en la productividad del maíz. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22, 218-232.
26. **MURPHY GM & HURTADO R** (2011) *Agrometeorología*. Fac. de Agronomía, UBA. 512 p.
27. **OTEGUI ME, MERCAU J, MENÉNDEZ F** (2002) Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. En *Guía Dekalb del cultivo de maíz*, Ed. Satorre, Dekalb, 293 p.
28. **PEDROL H, CASTELLARÍN J, SALVAGIOTTI F** (2004) Importancia del maíz en la rotación de los Cultivos Sustentabilidad y Diversificación de Riesgos Productivos. *Rev. IDIA XXI del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 141-146.
29. **PEDROL HM, CASTELLARÍN JM, ROSSO O** (2006) Las condiciones climáticas y el cultivo de maíz en Oliveros (Dpto. Iriondo) Santa Fe. *Campaña 2005 - 06. Para Mejorar la Producción*, 32, 8-11.
30. **SACCHI O, DALLA MARTA N, COSTANZO M, CORONEL A** (2002) Caracterización de las precipitaciones en la zona de Zavalla. *Rev. de Inv. de la Fac. de Cs. Agrarias-UNR*, 2, 91-103.
31. **SAINI SH & WESTGATE ME** (2000) Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*, 68, 59-96.
32. **SCHUSSLER JR & WESTGATE ME** (1995) Assimilate flux determines kernel set at low water potential in maize. *Crop Science*, 35, 1074-1080.
33. **SIERRA EM & PORFIDO OD** (1980) Factores que afectan los rendimientos en la región maicera Argentina. *Rev.Fac. Agr.*, 1 (2), 49-64.
34. **SISTEMA INTEGRADO DE INFORMACIÓN AGROPECUARIA** (2015) Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Disponible en: <http://www.siaa.gov.ar> Acceso: 2 mayo de 2015.
35. **STECCHONE L, DICKIE MJ, COSTANZO M, CORONELA** (2013) Relación entre las precipitaciones y la fecha de siembra de maíz en Cañada de Gómez. *Jornada de Ciencia y Tecnología de la UNR*. Rosario.
36. **THORNTHWAITE CW & MATHER JR** (1955) The water balance. *Climatology VIII* (1), 104 p. Drexel Inst. of Tech., New Jersey. USA.
37. **TOTIS DE ZELJKOVICH LE** (2012) Requerimientos agroclimáticos del cultivo de maíz (Capítulo 1). En: *Eyherabide, G. (Ed.), Bases para el manejo del cultivo de maíz*. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires Argentina. 7-24.
38. **WESTGATE ME, BOYER JS** (1986) Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Science*. 26, 951-956.