

Comunicación D-11

INFLUENCIA DE LA PREDICCIÓN ESTACIONAL EN EL RENDIMIENTO PREVISTO PARA EL TRIGO, EN LA CAMPIÑA SUR DE EXTREMADURA

Marcelino Núñez Corchero

José A. Sosa Cardo

Adolfo Marroquin Santoña

CMT de Extremadura (INM)

RESUMEN

En zonas bridas y semiáridas la variabilidad interanual de la precipitación implica un riesgo para los cultivos de secano. En este trabajo se intenta evaluar cómo influye la predicción estacional de la precipitación y su error, en el rendimiento final de la cosecha previsto por un modelo agrometeorológico. Una predicción de la cosecha de trigo a varios meses vista, evidentemente, sería muy útil para la toma de decisiones. Para ello se ha comprobado que el rendimiento del trigo en la región bajo estudio depende casi exclusivamente de la precipitación, estableciendo la relación entre el rendimiento y la distribución temporal de la precipitación. El modelo obtenido se basa en la correlación lineal múltiple entre rendimiento de cosechas y precipitaciones quincenales.

1. Introducción

La Campiña Sur extremeña, una de las mejores zonas cerealistas de la provincia de Badajoz, situada en el extremo sureste de la provincia de Badajoz, se enmarca entre las coordenadas: 38° 00' y 38° 30' Norte, y 05° 15' y 06° 15' Oeste. Es una comarca de superficie ondulada con restos poco importantes de Sierra Morena, surcada por los ríos Matachel, Zújar y Bembezar. Su altitud media oscila entre 500 y 600 metros sobre el nivel del mar y su precipitación media entre 400 y 500 litros/m².

Los datos de rendimiento de trigo, *Triticum vulgare* (tipo blando), utilizados se han obtenido del Servicio Nacional de Producción Agraria (SENPA). Este organismo subdivide la Campiña Sur en tres comarcas, asignando a cada comarca un rendimiento medio de trigo por cada campaña. Estas tres comarcas son: la

comarca de Azuaga, que comprende los términos municipales de Azuaga y Granja de Torrehermosa; la comarca de Berlanga, que comprende los términos municipales de Berlanga, Ahillones y Maguilla; la comarca de Llerena, que comprende los términos municipales de Llerena, Casas de la Reina, Reina, Trasierra, Fuente del Arco, Puebla del Maestre, Valencia las Torres, Usagre, Villagarcía de la Torre e Higuera. Disponemos, por lo tanto, de un dato de rendimiento medio de trigo por cada comarca y año. El período que cubren estos datos es el siguiente: en la comarca de Azuaga: 12 años, de 83/84 a 94/95; en la comarca de Berlanga: 7 años, de 83/84 a 89/90; en la comarca de Llerena: 8 años, de 82/83 a 89/90.

La serie más larga de datos de rendimiento de trigo es de doce campañas de cultivo. Para intentar el ajuste de un modelo con estos datos es recomendable no aumentar mucho más el período de los mismos, pues, si bien se mejora la parte estadística del inodelo, se introducen en él influencias del tipo que a continuación se citan: cambios de variedades de los cultivos, mejoras en las técnicas agrícolas, rotaciones en los cultivos, incremento de uso y/o mejoras en los fertilizantes, aumento del control de las malas hierbas y de las plagas, mecanización de los cultivos, etc. Estos factores, que deberían incluirse en el modelo como «ajuste agrotécnico», empiezan a ser importantes si el período de obtención de datos se prolonga en el tiempo, y si bien su ajuste ha sido estudiado por diversos autores, (Lomas y Shashoua, 1970), su parametrización es muy difícil. Mientras que si el número de años no es muy alto, del orden de 10 ó 12 años, su influencia se puede suponer constante, que es la solución aquí adoptada.

2. Datos utilizados

Los datos ineteorológicos se han obtenido de estaciones pluviométricas del CMT de Extremadura, dotadas con pluviómetros convencionales. De todas las estaciones disponibles, situadas en la Campiña Sur, después de un estudio de la calidad de la instalación, del colaborador y de la serie de datos pluviométricos, se han seleccionado para este trabajo las siguientes:

- | | | | |
|----|----------------------------|-------------------------------|---|
| a) | En la comarca de Azuaga: | 4257
5473F | Granja de Torrehermosa
Azuaga «S.E.A.» |
| b) | En la comarca de Berlanga: | 4383
4384 | Berlanga
Maguilla |
| c) | En la comarca de Llerena: | 4381
43851
4387
4389 | Casas de la Reina
Valencia de las Torres «Castillejo»
Villagarcía de la Torre
Usagre |

Se han elegido como variables del modelo las precipitaciones acumuladas en periodos quincenales, al considerarlos como los períodos más acordes con las etapas fenológicas del trigo. Establecimos el seguimiento del cultivo desde el 16 de octubre hasta el 15 de julio. Son, pues, 18 períodos:

Período	Duración	Período	Duración	Período	Duración
1.º	16 Oct-31 Oct	7.º	16 Ene-31 Ene	13.º	16 Abr-30 Abr
2.º	01 Nov-15 Nov	8.º	01 Feb-15 Feb	14.º	01 May-15 May
3.º	16 Nov-30 Nov	9.º	16 Feb-28 Feb	15.º	16 May-31 May
4.º	01 Dic-15 Dic	10.º	01 Mar-15 Mar	16.º	01 Jun-15 Jun
5.º	16 Dic-31 Dic	11.º	16 Mar-31 Mar	17.º	16 Jun-30 Jun
6.º	01 Ene-15 Ene	12.º	01 Abr-15 Abr	18.º	01 Jul-15 Jul

Calculadas las precipitaciones acumuladas para estos períodos quincenales y para las citadas estaciones, se intenta ajustar estos datos mediante correlación lineal múltiple, para obtener un modelo estadístico que nos relacione el rendimiento del trigo con la precipitación. Asumiendo como hipótesis que existe una relación lineal entre el rendimiento del trigo y la distribución de la precipitación.

COMUNICACIÓN D-11

El modelo a obtener sería del tipo:

$$Y = c + \sum_i a_i r_i \quad (1)$$

o del tipo:

$$Y = c + b \cdot R + \sum_i a_i \cdot r_i \quad (2)$$

donde: Y , es el rendimiento del trigo en kg/ha (kilogramos por hectárea), c y b y a_i , son constantes del modelo a ajustar, R , es la precipitación total anual y r_i son las precipitaciones acumuladas quincenalmente.

Los datos de rendimiento del cultivo son:

Cosecha	Rendimiento (kg / ha)		
Año agrícola	Azuaga	Berlanga	Llerena
82/83	—	700	800
83/84	2 200	2 200	2 200
84/85	2 000	1 800	2 000
85/86	2 000	1 300	1 100
86/87	2 600	2 300	1 900
87/88	2 500	1 600	1 600
88/89	2 100	1 900	1 700
89/90	1 800	1 800	1 700
90/91	1 800	—	—
92/93	500	—	—
93/94	2 500	—	—
94/95	400	—	—

Como ya se ha dicho, los datos de rendimiento son datos medios para cada comarca, este rendimiento medio se ha asociado a cada una de las estaciones pluviométricas contenidas en cada comarca. Obteniéndose así ocho series de precipitación y rendimiento de trigo, una por estación.

Para determinar a qué tipo de modelo se iban a ajustar los datos, ecuaciones (1) ó (2), se ha calculado la correlación entre el rendimiento y la precipitación total anual. Los resultados obtenidos, tanto para el año agrícola (septiembre-agosto) como para el año civil (enero-diciembre), muestran una correlación muy baja entre el rendimiento del cultivo y la precipitación anual, entre 0,32 y 0,2, por lo que se intentó ajustar un modelo del tipo de la ecuación (1).

3. Ajuste de los datos

En el modelo de regresión múltiple que se pretende utilizar, descrito por la ecuación (1), r_i son las acumulaciones quincenales de la precipitación, consideradas como variables independientes, a_i son los coeficientes y c la ordenada en el origen que se pretenden determinar mediante regresión múltiple.

Para su determinación, se realizó un ajuste del modelo incluyendo todas las variables y se tuvo en cuenta la matriz de correlación para eliminar del modelo aquellas variables independientes fuertemente correlacionadas con otras. A la vista de dicha matriz de correlación se pudo observar que no había multicolinealidad, es decir que las variables eran independientes entre sí, no pudiendo desestimar ninguna de las variables por este motivo.

Un segundo paso fue eliminar aquellas variables independientes con las que el rendimiento no mostraba dependencia significativa, es decir, aquellas variables cuyo coeficiente (a_i) podía ser nulo. Para ello se repitió varias veces el ajuste del modelo eliminando, cada vez, la variable cuyo coeficiente tenía mayores probabilidades de ser nulo (para cada variable, el valor de su coeficiente dividido por el valor de su desviación

estándar, en valor absoluto, está inversamente relacionado con la probabilidad de que dicho coeficiente sea nulo). Se repitió el proceso hasta optimizar la desviación estándar y el coeficiente de determinación corregido en función de los grados de libertad (Peña Sánchez, 1991).

De este ajuste se obtuvo un modelo cuyos principales parámetros ajustados (coeficientes de las variables y ordenada en el origen) y estadísticos, son los siguientes:

Periodos de precipitación	Variables	Coefficientes	Error Estándar	t-valor	Nivel de significación
01 - 15 Nov	Ord. origen	706,534	150,691	4,6886	0
16 - 30 Nov	2. ^a quincena	0,412443	0,104967	3,9293	0,0002
01 - 15 Ene	3. ^a quincena	0,431103	0,08493	5,0760	0
16 - 31 Ene	6. ^a quincena	1,710255	0,340769	5,0188	0
01 - 15 Feb	7. ^a quincena	0,244068	0,191512	1,2744	0,2076
16 - 28 Feb	8. ^a quincena	-0,771813	0,268144	-2,8784	0,0056
01 - 15 Mar	9. ^a quincena	1,198939	0,321397	3,7304	0,0004
16 - 30 Abr	13. ^a quincena	-0,632644	0,255362	-2,4774	0,0162
01 - 15 May	15. ^a quincena	1,024065	0,387892	2,6401	0,0106
16 - 31 May	18. ^a quincena	0,530293	0,203926	2,6004	0,0118

Otros parámetros del modelo son el coeficiente de correlación corregido en grados de libertad (0,7414), y la desviación estándar (275,4).

En el ajuste se ha obtenido un modelo en el que las variables que intervienen corresponden a los períodos relacionados en la columna de la izquierda de la tabla anterior. Las variables que no aparecen, poseen coeficientes de valor nulo o muy probablemente nulos y que no influyen en el valor del rendimiento. Coeficientes positivos indican relación directa con el rendimiento y coeficientes negativos relación inversa. Del valor de los coeficientes podemos deducir qué períodos fenológicos son influenciados por la precipitación y en qué grado. Este hecho se muestra gráficamente en la Fig. 1.

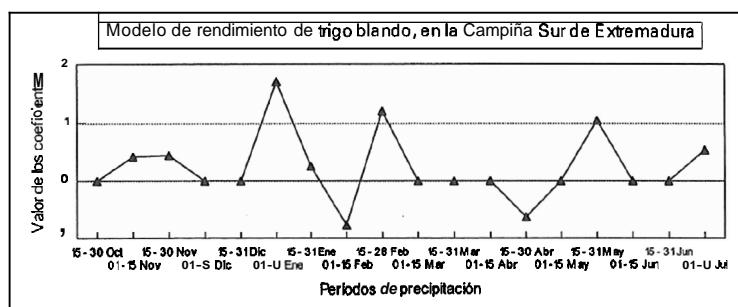


Fig. 1. Coeficientes del modelo agrometeorológico del rendimiento de trigo

Además se realizaron también dos análisis de varianza, uno para el modelo completo y otro detallado para cada una de las variables, que nos confirmaron la dependencia entre el rendimiento de trigo y los distintos valores de la precipitación quincenal.

3.1. Análisis del modelo propuesto

Un buen modelo de regresión lineal múltiple, debe cumplir los siguientes requisitos (Peña Sánchez, 1991):

a) Que no exista multicolinealidad entre las variables. Como ya se ha comentado, se realizó un estudio de la matriz de correlaciones y se pudo observar que no existe ninguna correlación cruzada importante entre variables, por lo que podemos confiar en que nuestras variables son independientes entre sí, es decir, no existe multicolinealidad.

b) Que el modelo sea lineal. Se han realizado representaciones de los residuos de las distintas variables independientes y del análisis de estas figuras se dedujo que el modelo no se aparta de la linealidad en ninguna de las variables con significación para el modelo.

c) Que la distribución de los residuos sea normal. Se han aplicado dos test de normalidad, el de Kolmogorov-Smirnov-Lillieforsy el de la χ^2 , dando como resultado ambos que no se puede rechazar la normalidad al nivel de significación del 5%. Además, el histograma de los residuos del modelo puede ajustarse razonablemente a una distribución normal.

d) Que no exista heterocedasticidad, es decir, desigualdad de la varianza según el rango considerado. Se han representado gráficamente los residuos frente a las variables independientes y se ha observado la homogeneidad de la varianza. Podemos afirmar, por tanto, que nuestro modelo es homeocástico.

e) Que no exista autocorrelación. La autocorrelación de los datos se determina por el estadístico de Durbin-Watson. El valor obtenido del estadístico para un nivel de significación del 5% nos llevó a la conclusión de que el test no es concluyente, si bien nos acercamos a la zona de no autocorrelación. Esto es debido a que nuestro conjunto de datos, formado por el empalme de varias series, no constituye una serie temporal secuencial, si bien está construido con pequeñas series temporales que sí lo son. Por lo tanto no es procedente estudiar la autocorrelación de esa serie.

Podemos afirmar, por todo lo anteriormente expuesto, que es aceptable la utilización del modelo propuesto.

3.2. Errores del modelo

Dado el pequeño tamaño de las series en las que nos hemos basado, no se ha podido prescindir de ningún dato a la hora de construir el modelo, que nos permitiera probarlo frente a datos externos al conjunto de ellos que ha servido para su generación. No siendo posible esto, lo que sí se ha hecho es evaluar cómo se ajusta este modelo a sus propios datos; para ello se ha calculado, para cada estación meteorológica y cada año, el rendimiento teórico previsto por el modelo y se ha comparado con el dato real, obteniendo así los errores absolutos y relativos del modelo, comprobándose que el modelo se ajusta bastante bien a los datos que lo generaron.

Se puede comprobar que los errores relativos oscilan entre el 41%, año 1987188 en la estación 4381, y el 0%, año 1983184 en la misma estación. Presentamos a continuación una tabla en la que se clasifican los errores.

Error relativo	Núm. de casos	% sobre el total
141 %	67	100
140 %	66	99
130 %	63	94
125 %	60	90
520 %	51	76
510 %	34	51
55 %	21	31

Como datos significativos podemos destacar que no existen errores mayores del 41%, que en el 90% de los casos el error es menor del 25% y que en el 51% de los casos el error es menor del 10%.

Otro índice de la bondad del modelo nos lo proporciona la Fig. 2, donde se evidencia que los puntos se alejan poco de la diagonal. Reiteramos que esto no se ha probado extrapolando el modelo frente a otros datos o a otras comarcas, sino simplemente frente a los mismos datos en que nos basamos para ajustar el mismo.

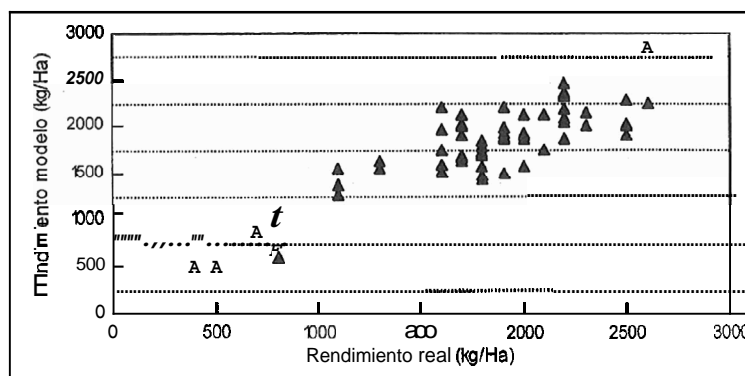


Fig. 2. Gráfica de rendimiento previsto frente a rendimiento real

3.3. Coeficientes del modelo y los estados fenológicos del trigo

Los valores de los coeficientes del modelo reflejan la importancia que, respecto al rendimiento final de la cosecha, tienen las precipitaciones correspondientes a un período determinado. De la Fig. 1, en la que representamos los valores de estos coeficientes, podemos deducir que:

a) Durante el período comprendido entre el 16 de octubre y el 15 de enero, el trigo necesita precipitaciones abundantes (agua presiembra). La precipitación que se produce en este período permite que se realicen labores en el campo y contribuye a una preparación del terreno más uniforme.

Efectivamente durante este período la mayoría de los coeficientes son mayores que cero y concretamente según el ajuste de nuestro modelo el período más influyente es el comprendido entre el 1 y el 15 de enero, ya que la precipitación recogida en este período se multiplica por el mayor coeficiente (1,71). Precipitaciones por encima de la media en este período tienen efectos claramente beneficiosos, pues el trigo tiene en esta época las raíces muy poco profundas y el 75% del agua absorbida entonces proviene de la capa que está entre 0 y 30 cm de profundidad.

b) Según el ajuste obtenido, entre el 16 de enero y el 15 de febrero, las precipitaciones son poco importantes o incluso perjudiciales. Nos encontramos en la 8.^a quincena, correspondiente al período 01-15 de febrero, con el coeficiente más negativo de nuestro modelo (-0,77). En efecto, las precipitaciones excesivas en este período, en el que el trigo se encuentra en fase estacionaria, reducen el nitrógeno del suelo lavándolo y no añaden reservas al suelo.

c) Entre el 16 y el 28 de febrero, las precipitaciones son influyentes. Correspondería este período con la fase fenológica del encañado o la aparición del primer nudo de tallo. Toda precipitación por encima de la media, sería siempre ventajosa.

d) Entre el 1 de marzo y el 15 de mayo, las precipitaciones serían prácticamente indiferentes o incluso perjudiciales al rendimiento. Esto se explica pues el ajuste obtenido adjudica mayor importancia al período anterior, entre el 16 y el 28 de febrero, quizás porque en los datos usados para el ajuste este período fue muy lluvioso, y lógicamente, si el suelo ya tiene reservas la precipitación en los períodos posteriores no es importante.

e) Entre el 16 y el 31 de mayo, las precipitaciones son muy importantes, siendo éste uno de los períodos más sensibles a la precipitación. Durante esta época se produce la maduración de la espiga y el agua es bien recibida, en estos días se producen valores altos de evapotranspiración potencial y la precipitación tendrá efectos ventajosos.

f) El período del 1 al 15 de julio, corresponde a la fase de la recolección, el modelo acusa una relación directa de la precipitación con el rendimiento, pero en realidad esta relación no es con la precipitación sino con la nubosidad, con la ausencia de viento, con pequeñas evapotranspiraciones y con temperaturas frescas, todos estos factores son muy beneficiosos para el rendimiento final del cultivo y evitarían lo que se conoce como el «asurado» (quemado) de la cosecha. De hecho precipitaciones importantes en este período dificultarían la recolección.

4. El error de la **predicción** estacional y las salidas del modelo

Para evaluar la importancia de estos errores en el rendimiento del cultivo, calculamos para cada quincena los valores medios o normales de precipitación de toda la región, promediando todas las estaciones y todos los años.

Periodo	Pcp. normal	Pcp. normal + 1%	Valor abs. coef.	Y (101% pcp. normal)	A Y	Error prom.	% pcp. necesario para acusar variación
2.º	72,3	73,0	0,41	1 725,69	2,98	16,33	5,48
3.º	34,3	34,7	0,43	1 724,19	1,48	17,07	11,53
6.º	25,1	25,4	1,71	1 727,00	4,30	67,72	15,76
7."	27,0	27,2	0,24	1 723,36	0,66	9,66	14,69
8."	21,0	21,2	0,77	1 721,09	-1,62	30,56	-18,87
9."	22,0	22,2	1,20	1 725,34	2,64	47,47	18,00
13.º	28,2	28,5	0,63	1 720,92	-1,79	25,05	-14,02
15."	11,2	11,3	1,02	1 723,85	1,15	40,55	35,36
18."	69,3	70,0	0,53	1 723,07	0,37	21,00	57,15

El valor normal de la precipitación de cada quincena, aparece en la 2.ª columna de la tabla anterior. En la 3.ª el valor normal de la precipitación ha aumentado en un 1%. En la 4.ª columna tenemos el valor absoluto del coeficiente del modelo. En la 5.ª el rendimiento del modelo suponiendo un aumento del 1% en la quincena considerada y manteniendo el resto de las precipitaciones quincenales en sus valores medios. En la 6.ª columna expresamos el aumento del rendimiento debido a ese aumento de la precipitación del 1%, tomando como rendimiento teórico el obtenido de las precipitaciones normales (1 723 kg/ha). Si tomamos como ejemplo la 2.ª quincena, la variación, en tantos por uno, de la precipitación en esta quincena producirá una variación del rendimiento de 2,98 kg/ha.

El error estándar del modelo es de 275,40 kg/ha, en la 7.ª columna de la tabla se presenta este error ponderado según el valor absoluto de los coeficientes del modelo. En la última columna se ha calculado el % de variación de la precipitación, sobre el valor normal de una quincena, necesario para que se produzca una variación significativa del rendimiento pronosticado por el modelo agrometeorológico. Entendiendo por significativa como no atribuida al propio error estadístico del modelo de rendimiento del cultivo. Por ejemplo, para la segunda quincena, la variación de la precipitación quincenal prevista, debe ser mayor del 5,48%, respecto del valor normal de esa quincena, para que se produzca una variación significativa del rendimiento pronosticado por el modelo agrometeorológico. Este porcentaje (5,48%) nos indica el margen en el que se puede mover el predictor estacional sin miedo a modificar la salida del modelo agrometeorológico.

En la Fig. 3, el incremento del rendimiento coincide a grandes rasgos con los valores de los coeficientes del modelo, pero dichos incrementos vienen ponderados por los valores medios de las precipitaciones quincenales.

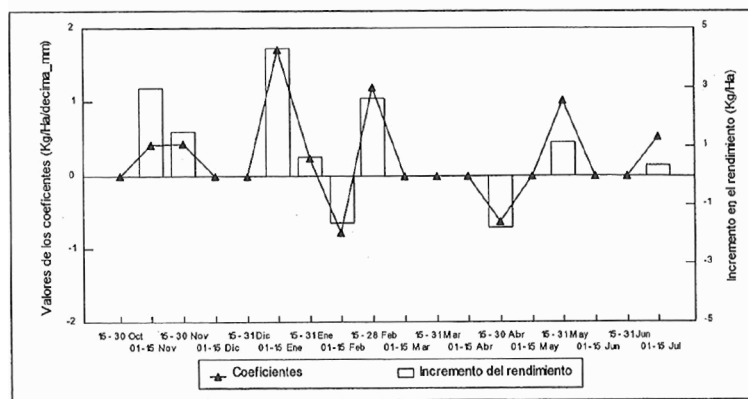


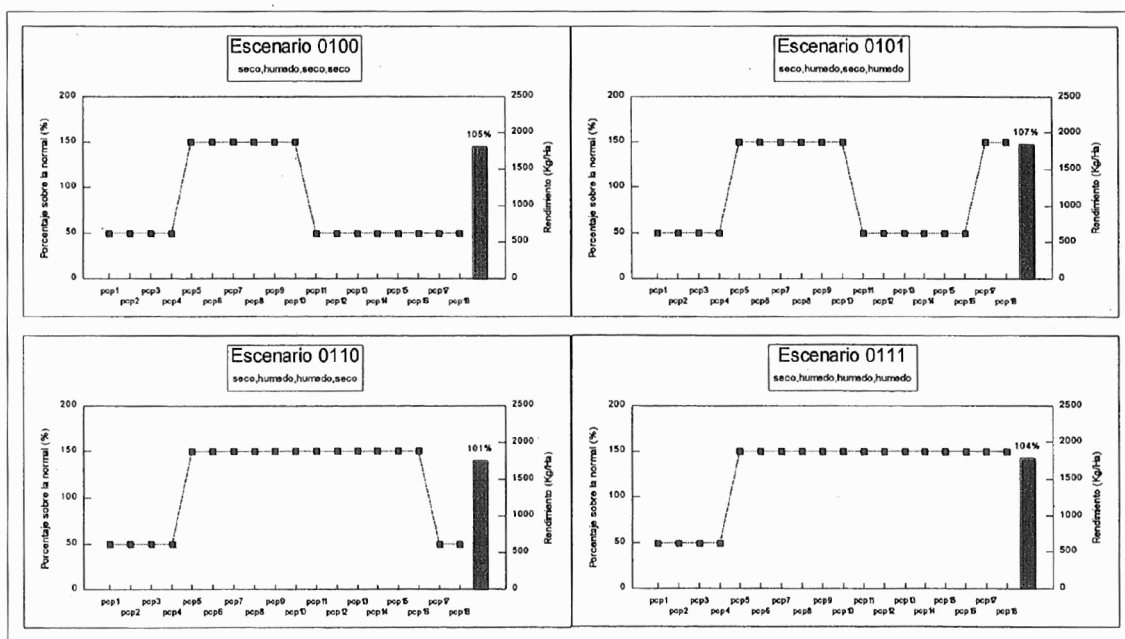
Fig. 3. Incremento del rendimiento del cultivo producido por un aumento de la precipitación del 1% (sobre el valor medio) en cada quincena

5. Escenarios

Consideramos a continuación una serie de escenarios de posibles distribuciones de precipitación, para evaluar la forma en que ésta afecta al rendimiento final.

La distribución base que servirá de referencia es la que en cada período quincenal presenta la precipitación media en ese período. El rendimiento resultante lo denominamos rendimiento de referencia y es de 1 723 kg/ha.

La elección de las distribuciones a estudiar dentro del conjunto de todas las posibles, se ha basado en las estaciones del año. Se ha considerado que dentro de cada estación se registra una precipitación, igual para todos los períodos comprendidos dentro de la misma, que bien es el 50% de la media (estación seca) bien el 150% (estación húmeda). Conjugando las dos posibilidades, seca y húmeda, para las estaciones del año, se tiene un subconjunto de 16 posibles escenarios.



Figs. 4, 5, 6 y 7. En ellas representamos los cuatro escenarios de distribución de precipitación correspondientes a otoño seco e invierno húmedo

Del análisis de estos 16 escenarios se deduce lo siguiente:

a) Las precipitaciones que más afectan al rendimiento total del cultivo son las acaecidas en otoño e invierno.

Las precipitaciones en otoño y en invierno afectan positivamente al rendimiento total, una variación del 50% del valor medio de la precipitación en otoño y en invierno, implica una variación del rendimiento del 13% y del 18% respectivamente.

b) En primavera y verano las precipitaciones contribuyen negativa y positivamente. Una variación del 50% del valor medio de la precipitación en la primavera y en el verano, implica una variación del rendimiento del -2% y del 1% respectivamente. En estas estaciones las precipitaciones afectan en un orden de magnitud menor que en otoño e invierno.

c) Los 16 escenarios se han agrupado en cuatro grupos con cuatro escenarios cada uno. En cada grupo se definen las posibles variaciones, **seco/húmedo** y otoño-invierno. Dentro de cada grupo, fijado el comportamiento del otoño-invierno se **contemplan** las variaciones **seco/húmedo** de la primavera y el verano.

Del análisis de los escenarios en estudio se desprende que el rendimiento obtenido en cada uno de los escenarios contemplados, depende casi totalmente del comportamiento del otoño y el invierno. Cuantitativamente esto se expresa en porcentajes sobre el rendimiento de referencia, en la siguiente tabla:

Rendimiento final	Invierno seco	Invierno húmedo
Otoño seco	70 ± 3%	95 ± 3%
Otoño húmedo	105 ± 3%	130 ± 3%

La variación del rendimiento del ± 3% es debida a las distintas posibilidades **seco/húmedo** de la primavera y el verano.

6. Conclusiones

1. Tras el ajuste y análisis del modelo, se ha establecido para cada período de precipitación quincenal un porcentaje de la precipitación necesaria para que se produzca una variación significativa del rendimiento dado por el modelo para el cultivo. Esto se puede interpretar como un margen de error aceptable para la predicción estacional, este porcentaje oscila entre el 5, 15, 35 y 60%, según el caso.

2. Con una predicción estacional a seis meses vista se podría tener una estimación del rendimiento de la cosecha de un año, pues se ha comprobado que las precipitaciones en otoño e invierno deciden la mayor parte del rendimiento final. Cualitativamente esto se puede deducir del ajuste del modelo, Fig. 3, donde se comprueba que la precipitación en el período noviembre-febrero produce casi todo el rendimiento previsto por el modelo.

3. Con una predicción de precipitación, bien del 50% de la normal, bien del 150%, un tanto burda en principio, se obtienen unas cotas del rendimiento de trigo del 70, 95, 105 y 130% del rendimiento medio, muy aceptables para el agricultor.

Referencias

Lomas, J. and Y. Shashoua, 1970: The effect of rainfall on wheat yields in an arid region. Plant response to climatic factors. Uppsala Symposium, 1970. UNESCO. pp. 531-537.

Fisher, R. A., 1924: The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted. Phil. Trans., ser. B, no. 213, pp. 89-142.

Peña Sánchez de Rivera, D., 1991: Estadística. Modelos y métodos. Alianza Editorial. Madrid.