

ÍNDICE

CAPÍTULO A. Evaluación del rendimiento de cultivos y lixiviado de nitratos

A.1. Contraste y análisis	8
A.1.1. Objetivos.....	8
A.1.2. Las funciones de producción.....	8
A.1.3. Modelos de simulación de cultivos	12
A.1.4. Las funciones de producción y los modelos de simulación.....	14
A.2. Desarrollo de la metodología	14
A.2.1. El modelo EPIC	16
A.2.2. Aplicaciones de EPIC en la literatura.	22
A.2.3. Integración de EPIC con GIS. El modelo GEPIC.	23
A.2.4. Obtención de las funciones de producción mediante GEPIC.	25
A.3. Aplicación a los casos de estudio. Sistema Mancha Oriental (MOS)28	
A.3.1. Meteorología	28
A.3.2. Suelos	30
A.3.3. Regionalización del resultado de las simulaciones. Generación de funciones de producción específicas por zonas.....	31
A.3.4. Funciones de producción ajustadas	38
A.4. Síntesis y Conclusiones	56
A.5. REFERENCIAS:	146

CAPÍTULO B. Aplicación a escenarios de cambio climático

B.1. Revisión y Análisis de Metodologías.....	57
B.1.1. Objetivos.....	57
B.1.2. Necesidades hídricas de los cultivos. Métodos FAO-56. El modelo CROPWAT.	58
B.1.3. Modelos de simulación de cultivos vs CROPWAT.	63

B.1.4. Efectos del cambio climático sobre los cultivos.....	64
B.2. Desarrollo de la Metodología.....	68
B.3. Aplicación a los casos de estudio	69
B.3.1. Meteorología en el escenario de cambio climático	69
B.3.2. Suelos.....	71
B.3.3. Calibración de resultados de rendimiento.....	72
B.3.4. Regionalización del resultado de las simulaciones. Generación de funciones de producción específicas por zonas.....	72
B.3.5. Funciones de producción ajustadas	91
B.4. Síntesis y Conclusiones.....	139

ÍNDICE de FIGURAS

Figura 1. Función de producción tipo.....	9
Figura 2. Procesos incluidos en el balance de Nitrógeno en el suelo.....	19
Figura 3. Esquemas de integración de EPIC en GEPIC.....	23
Figura 4. Estaciones meteorológicas red SIAR. Zonas de influencia por polígonos de Thiessen.....	29
Figura 5. Suelos en MOS según DSMW (FAO).....	30
Figura 6. ANOVA de N-lixiviado en cebada.....	32
Figura 7. ANOVA de Rendimiento en cebada.....	33
Figura 8. ANOVA de N-lixiviado en Trigo.....	34
Figura 9. ANOVA de Rendimiento en Trigo.....	35
Figura 10. ANOVA de N-lixiviado en Maíz.....	36
Figura 11. ANOVA de Rendimiento en Maíz.....	37
Figura 12. Gráfico de Superficie Caso 1-Cebada.....	39
Figura 13. Gráfico de Superficie Caso 2-Cebada.....	41
Figura 14. Gráfico de Superficie Caso 3-Cebada.....	42
Figura 15. Gráfico de Superficie Caso 4-Cebada.....	43
Figura 16. Gráfico de Superficie Caso 5-Cebada.....	44
Figura 17. Gráfico de Superficie Caso 6-Cebada.....	45
Figura 18. Gráfico de Superficie Caso 1-Trigo.....	46
Figura 19. Gráfico de Superficie Caso 2-Trigo.....	47
Figura 20. Gráfico de Superficie Caso 3-Trigo.....	48
Figura 21. Gráfico de Superficie Caso 1-Maíz.....	50
Figura 22. Gráfico de Superficie Caso 2-Maíz.....	51
Figura 23. Gráfico de Superficie Caso 3-Maíz.....	52
Figura 24. Gráfico de Superficie Caso 4-Maíz.....	53
Figura 25. Gráfico de Superficie Caso 5-Maíz.....	54
Figura 26. Gráfico de Superficie Caso 6-Maíz.....	55
Figura 27. Evolución del Kc a lo largo de la vida del cultivo.	60
Figura 28. Datos necesarios para alimentar el modelo CROPWAT.	64
Figura 29. Análisis del efecto del incremento del CO2 en la atmósfera.	66
Figura 30. Cuadrícula correspondiente a los datos meteorológicos de serie futura.....	70
Figura 31. Suelos en MOS según DSMW (FAO)	71
Figura 32. ANOVA de N-lixiviado en trigo CC 697.	74
Figura 33. ANOVA de Rendimiento en trigo.	75
Figura 34. ANOVA de N-lixiviado en Maíz.	77
Figura 35. ANOVA de Rendimiento en Maíz.	78
Figura 36. ANOVA de N-lixiviado en Cebada.	79
Figura 37. ANOVA de Rendimiento en Cebada.	81

Figura 38. ANOVA de N-lixiviado en trigo CC 360.	82
Figura 39. ANOVA de Rendimiento en trigo.	83
Figura 40. ANOVA de N-lixiviado en Maíz.	85
Figura 41. ANOVA de Rendimiento en Maíz.	87
Figura 42. ANOVA de N-lixiviado en Cebada.	89
Figura 43. ANOVA de Rendimiento en Cebada.	90
Figura 44. Gráfico de Superficie Caso 1-Trigo CC 697.....	92
Figura 45. Gráfico de Superficie Caso 2-Trigo.	94
Figura 46. Gráfico de Superficie Caso 3-Trigo.	95
Figura 47. Gráfico de Superficie Caso 4-Trigo.	96
Figura 48. Gráfico de Superficie Caso 5-Trigo.	97
Figura 49. Gráfico de Superficie Caso 6-Trigo.	98
Figura 50. Gráfico de Superficie Caso 1-Maiz.....	99
Figura 51. Gráfico de Superficie Caso 2-Maiz.	100
Figura 52. Gráfico de Superficie Caso 3-Maiz.	101
Figura 53. Gráfico de Superficie Caso 4-Maiz.	102
Figura 54. Gráfico de Superficie Caso 5-Maiz.	103
Figura 55. Gráfico de Superficie Caso 6-Maíz.	104
Figura 56. Gráfico de Superficie Caso 1-Cebada.....	106
Figura 57. Gráfico de Superficie Caso 2-Cebada.....	107
Figura 58. Gráfico de Superficie Caso 3-Cebada.....	107
Figura 59. Gráfico de Superficie Caso 4-Cebada.....	109
Figura 60. Gráfico de Superficie Caso 5-Cebada.....	110
Figura 61. Gráfico de Superficie Caso 6-Cebada.....	111
Figura 62. Gráfico de Superficie Caso 7-Cebada.....	112
Figura 63. Gráfico de Superficie Caso 8-Cebada.....	113
Figura 64. Gráfico de Superficie Caso 1-Trigo CC 360.....	115
Figura 65. Gráfico de Superficie Caso 2-Trigo.....	116
Figura 66. Gráfico de Superficie Caso 3-Trigo.....	117
Figura 67. Gráfico de Superficie Caso 4-Trigo.....	118
Figura 68. Gráfico de Superficie Caso 5-Trigo.....	119
Figura 69. Gráfico de Superficie Caso 6-Trigo.	120
Figura 70. Gráfico de Superficie Caso 7-Trigo.	121
Figura 71. Gráfico de Superficie Caso 1-Maiz.....	123
Figura 72. Gráfico de Superficie Caso 2-Maiz.	124
Figura 73. Gráfico de Superficie Caso 3-Maiz.	125
Figura 74. Gráfico de Superficie Caso 4-Maiz.	126
Figura 75. Gráfico de Superficie Caso 5-Maiz.	127
Figura 76. Gráfico de Superficie Caso 6-Maíz.	128
Figura 77. Gráfico de Superficie Caso 7-Maíz.	129

Figura 78. Gráfico de Superficie Caso 1-Cebada.....	131
Figura 79. Gráfico de Superficie Caso 2-Cebada.....	132
Figura 80. Gráfico de Superficie Caso 3-Cebada.....	133
Figura 81. Gráfico de Superficie Caso 4-Cebada.....	134
Figura 82. Gráfico de Superficie Caso 6-Cebada.....	135
Figura 83. Gráfico de Superficie Caso 7-Cebada.....	137
Figura 84. Gráfico de Superficie Caso 8-Cebada.....	138

ÍNDICE de TABLAS

Tabla 1: Valores usuales de riego y fertilización.....	27
Tabla 2. Red SIAR en MOS.....	29
Tabla 3: Suelos encontrados en MOS.....	30
Tabla 4. Análisis de Varianza para N-lixiviado en cebada- Suma de Cuadrados Tipo III.....	32
Tabla 5. Análisis de Varianza para Rendimiento en cebada - Suma de Cuadrados Tipo III.....	33
Tabla 6. Análisis de Varianza para N-lixiviado en trigo - Suma de Cuadrados Tipo III.....	35
Tabla 7. Análisis de Varianza para rendimiento en trigo - Suma de Cuadrados Tipo III.....	36
Tabla 8. Análisis de Varianza para N-lixiviado en maíz - Suma de Cuadrados Tipo III.....	37
Tabla 9. Análisis de Varianza para Rendimiento en maíz- Suma de Cuadrados Tipo III.....	38
Tabla 10. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Cebada.....	39
Tabla 11. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2- Cebada.....	40
Tabla 12. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3- Cebada.....	41
Tabla 13. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Cebada.....	42
Tabla 14. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5- Cebada.....	43
Tabla 15. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6- Cebada.....	44
Tabla 16. Resumen funciones de producción ajustadas en Cebada.....	45
Tabla 17. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Trigo.....	46
Tabla 18. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Trigo.....	47
Tabla 19. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Trigo.....	48
Tabla 20. Resumen funciones de producción ajustadas en Trigo.....	49
Tabla 21. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1- Maíz.....	50
Tabla 22. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2- Maíz.....	51
Tabla 23. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3- Maíz.....	52
Tabla 24. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Maíz.....	53
Tabla 25. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5- Maíz.....	54
Tabla 26. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6- Maíz.....	55
Tabla 27. Resumen funciones de producción ajustadas en Maíz.....	56
Tabla 28. Escenarios de emisiones y concentración de CO2 en ppmv.....	70
Tabla 29: Suelos encontrados en MOS.	71
Tabla 30. Análisis de Varianza para N-lixiviado trigo 697 CC- Suma de Cuadrados Tipo II.....	73
Tabla 31. Análisis de Varianza para Rendimiento trigo - Suma de Cuadrados Tipo III.....	75

Tabla 32. Análisis de Varianza para N-lixiviado en maíz - Suma de Cuadrados Tipo III.....	76
Tabla 33. Análisis de Varianza para Rendimiento en maíz- Suma de Cuadrados Tipo III.....	77
Tabla 34. Análisis de Varianza para N-lixiviado en cebada- Suma de Cuadrados Tipo III.....	79
Tabla 35. Análisis de Varianza para Rendimiento en cebada - Suma de Cuadrados Tipo III.....	80
Tabla 36. Análisis de Varianza para N-lixiviado trigo 360 CC- Suma de Cuadrados Tipo III	81
Tabla 37. Análisis de Varianza para Rendimiento trigo - Suma de Cuadrados Tipo III.....	83
Tabla 38. Análisis de Varianza para N-lixiviado en maíz - Suma de Cuadrados Tipo III.....	84
Tabla 39. Análisis de Varianza para Rendimiento en maíz- Suma de Cuadrados Tipo III.....	86
Tabla 40. Análisis de Varianza para N-lixiviado en cebada- Suma de Cuadrados Tipo III.....	88
Tabla 41. Análisis de Varianza para Rendimiento en cebada - Suma de Cuadrados Tipo III.....	90
Tabla 42. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Trigo.....	92
Tabla 42bis. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2- Trigo.	93
Tabla 43. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3- Trigo.	94
Tabla 44. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Trigo.	95
Tabla 45. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5- Trigo.	96
Tabla 46. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6- Trigo.	97
Tabla 47 Resumen funciones de producción ajustadas en Trigo, escenario de emisiones 697ppmv.....	98
Tabla 48. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Maiz.....	99
Tabla 49. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Maiz.	100
Tabla 50. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Maiz.	101
Tabla 51. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Maíz.	102
Tabla 52. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Maiz.	103
Tabla 53. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6-Maíz.	104
Tabla 54. Resumen funciones de producción ajustadas en Maíz, escenario de emisiones 697 ppmv.	105
Tabla 55. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Cebada.....	106
Tabla 56. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Cebada.	107
Tabla 57. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Cebada.	108
Tabla 58. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Cebada.	109
Tabla 59. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Cebada.	110
Tabla 60. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6-Cebada.	111
Tabla 61. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 7-Cebada.	112
Tabla 62. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 8-Cebada.	113
Tabla 63. Resumen funciones de producción ajustadas en Cebada, escenario de emisiones 697ppmv.....	114
Tabla 64. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Trigo CC 360.....	115
Tabla 65. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Trigo.....	116
Tabla 66. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Trigo.....	117
Tabla 67. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4-Trigo.....	118
Tabla 68. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Trigo.....	119
Tabla 69. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6 - Trigo.	120
Tabla 70. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 7 - Trigo.	121

Tabla 71. Resumen funciones de producción ajustadas en Trigo, escenario de emisiones 360 ppmv..	122
Tabla 72. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Maíz.....	123
Tabla 73. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Maíz.	124
Tabla 74. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Maíz.	125
Tabla 75. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Maíz.	126
Tabla 76. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Maíz.	127
Tabla 77. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6-Maíz.	128
Tabla 78. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 7-Maíz.	129
Tabla 79. Resumen funciones de producción ajustadas en Maíz, escenario de emisiones 360 ppmv. ...	130
Tabla 80. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Cebada.....	131
Tabla 81. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2- Cebada.	132
Tabla 82. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3- Cebada.	133
Tabla 83. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Cebada.....	134
Tabla 84. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5- Cebada.....	135
Tabla 85. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6- Cebada.	136
Tabla 86. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 7- Cebada.	137
Tabla 87. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 8- Cebada.	138
Tabla 88. Resumen funciones de producción ajustadas en Cebada, escenario de emisiones 360 ppmv. ...	139
Tabla 89. Incrementos de rendimiento en trigo, maíz y cebada según escenario futuro simulado....	140
Tabla 90. Dosis de riego que maximiza los rendimientos.....	141
Tabla 91. Productividad del agua.	141
Tabla 92. Comparativa de temperaturas máximas actuales y futuras.	143
Tabla 93. Comparativa de temperaturas mínimas actuales y futuras.	143
Tabla 94. Comparativa de precipitaciones actuales y futuras.	144
Tabla 95. Comparativa de radiación, humedad relativa y velocidad del viento actuales y futuras....	144.

A. Evaluación del rendimiento de cultivos y lixiviado de nitratos

A.1. Contraste y análisis

A.1.1. Objetivos

En el presente proyecto de investigación se pretende desarrollar una metodología para evaluar el rendimiento de cultivos ante diferentes condiciones de aportación hídrica y fertilización, con el objeto de obtener funciones de producción y de lixiviado en diferentes escenarios de cambio climático. La línea de investigación tiene como objetivo final emplear los resultados de las simulaciones (producto del presente proyecto), acopladas a un modelo hidroeconómico y otro de transporte y flujo de contaminantes.

Este capítulo tiene por objeto analizar el rendimiento de los cultivos a partir de las relaciones funcionales existentes y los factores de producción que los condicionan. Se obtendrá una metodología para la obtención de estas relaciones funcionales que se aplicará en diferentes escenarios de cambio climático, en el capítulo B.

La forma más habitual de conseguir este propósito es a través de las denominadas funciones de producción. Así pues, en el presente capítulo, se analiza el estado del arte en materia de obtención de funciones de producción, definiendo posteriormente una metodología concreta que nos permita dicho propósito. Por último dicha metodología será aplicada al caso del sistema de la Mancha Oriental (MOS).

A.1.2. Las funciones de producción

Las funciones de producción tienen por objetivo el determinar la relación que existe entre el producto obtenido y la combinación de factores que se utilizan en su obtención.

Las funciones de producción teóricas presentan tres fases características, tal y como nos muestra la figura 1. Las tres etapas de la curva de producción se caracterizan por la pendiente y por la

forma de la curva del producto total o rendimiento. La etapa I se caracteriza por una pendiente cada vez más positiva, la etapa II por una pendiente cada vez menos positiva, y la etapa III por una pendiente negativa. La pendiente de la curva del producto total configura el producto marginal. Así estas mismas tres etapas se observan en el producto marginal. En la fase I, el producto marginal es positivo y creciente. En la Etapa II, el producto marginal es positivo, pero decreciente. Y en la fase III, el producto marginal es negativo. En la práctica es interesante observar como determinados procesos se comportan de forma distinta a la teórica aquí presentada.

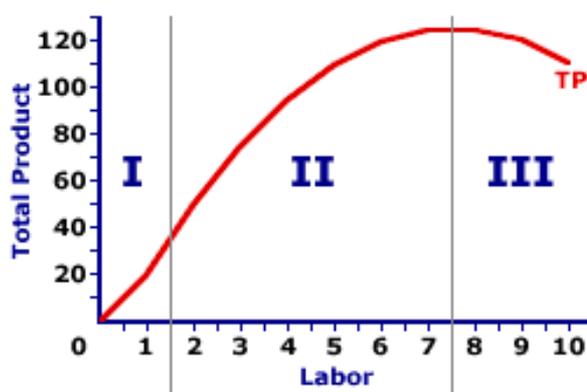


Figura 1. Función de producción tipo.

El empleo de funciones de producción del rendimiento agrícola en la literatura es muy amplio. Esto permite disponer de una relación funcional entre el rendimiento agrícola del cultivo frente a los factores de producción empleados, para posteriormente utilizarlo en multitud de aplicaciones (Ackello-Ogutu et al., 1985; Anderson y Nelson, 1975; Berck y Helfand, 1990; Frank et al., 1990; Fuchs y Lothé, 1996; Heady y Dillon, 1961; Jalota et al. 2007; Llewelyn y Featherstone, 1997; Rajsic Weersink de 2008; Yadav et al., 2003).

Los dos factores de producción que se relacionan en la mayoría de los casos citados en el párrafo anterior son el agua de riego aplicada y la fertilización nitrogenada, por ser determinantes en el rendimiento final. Además, en nuestro caso son también los dos factores que condicionan el objeto de la investigación: el agua de riego es la principal demanda en una cuenca y la fertilización nitrogenada es el causante de la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas, además de un porcentaje importante en los costes de producción.

Varios tipos funcionales de funciones de producción de tipo empírico encontramos en la literatura. A destacar, la función cuadrática, la función raíz cuadrada, la función lineal von Liebig, la no lineal von Liebig y la función Mistscherlich-Baule. A continuación analizamos sus principales propiedades:

Función cuadrática

La función cuadrática se muestra en la ecuación siguiente. Impone una elasticidad de sustitución entre los factores no nulos, sin meseta de crecimiento y una productividad marginal decreciente. Las isocuantas son elípticas, por lo tanto tiene áreas con pendiente positiva, negativa, infinita y nula. Presenta fases I, II y III.

$$Y_{i,j} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot N_{i,j} + \alpha_2 \cdot W_{i,j} + \alpha_3 \cdot N^2_{i,j} + \alpha_4 \cdot W^2_{i,j} + \alpha_5 \cdot N_{i,j} \cdot W_{i,j}$$

Donde Y es el rendimiento del cultivo (kg ha⁻¹), N es la cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado (kg ha⁻¹), W es la dosis de riego aplicada (mm), $\alpha_1, \dots, \alpha_5$, son los coeficientes del ajuste de la ecuación a obtener empíricamente por mínimos cuadrados.

El último término mide la interacción entre factores. Cuando el coeficiente α_5 es < 0 implica que los factores son competitivos, mientras que si es > 0 son complementarios. Si es nulo significa que se trata de factores independientes.

Esta función resulta también adecuada para modelizar la producción de lixiviado. En este caso la ecuación sería:

$$L_{i,j} = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{i,j} + \beta_2 \cdot W_{i,j} + \beta_3 \cdot N^2_{i,j} + \beta_4 \cdot W^2_{i,j} + \beta_5 \cdot N_{i,j} \cdot W_{i,j}$$

L es la cantidad de N-lixiviado producido por unidad de superficie (kg ha⁻¹), β_1, \dots, β_5 , son los coeficientes del ajuste de la ecuación a obtener empíricamente por mínimos cuadrados.

Función raíz cuadrada

La función raíz cuadrada es similar a la ecuación cuadrática. También impone una elasticidad de sustitución entre los factores no nulos, sin meseta de crecimiento y una productividad marginal decreciente. Sin embargo tiene una curvatura más aguda cerca del máximo y un descenso menos rápido en la fase III que la cuadrática.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 N + \alpha_2 N^{1/2} + \alpha_3 W + \alpha_4 W^{1/2} + \alpha_5 N \cdot W$$

Función lineal de von Liebig

La función lineal de von Liebig, contrasta con las funciones polinómicas anteriores en que impone una elasticidad de sustitución cero a priori. Presenta una meseta de crecimiento. Esto implica isocuantas en ángulo recto. La función se puede escribir de la siguiente manera:

$$Y = \min[Y_m, \alpha_1 + \alpha_3 \cdot N, \alpha_2 + \alpha_4 \cdot W]$$

Donde Y_m , es el máximo rendimiento (kg ha⁻¹), cuando ni el nitrógeno ni el agua son limitantes. Esto implica que la planta responde linealmente a un nutriente hasta que otro se convierte en la limitación y permitirá alcanzar una meseta de rendimiento (Y_m), cuando ninguno de los factores utilizados es limitante, es decir, cuando otros factores distintos pasan a ser limitantes. Esta función se corresponde con la formulación matemática más común de la ley del mínimo formulada por Justus von Liebig y es coherente con la idea de que el nitrógeno y el agua realizan diferentes funciones en la planta.

Función de Mitscherlich-Baule

El modelo de Mitscherlich-Baule es similar a la formulación de von Liebig con una diferencia significativa, y es que permite la sustitución de factores. Esta función muestra solamente la fase de producción II presentando una meseta de rendimiento asintótico siendo válida para casos de funciones convexas aunque no necesariamente deben ser isocuantas en ángulo recto como las impuestas por el modelo de von Liebig. Sólo es válida para factores técnicamente complementarios. La función se escribe como sigue:

$$Y = \alpha_1 \cdot (1 - \text{EXP}(-\alpha_2(\alpha_3 + N))) \cdot (1 - \text{EXP}(-\alpha_4(\alpha_5 + W)))$$

Donde α_1 representa la meseta de crecimiento, α_3 y α_5 incluyen el nitrógeno y el agua presentes en el suelo (Beattie & Taylor, 1985), siendo α_2 y α_4 los coeficientes que miden la influencia de estos factores en el rendimiento.

Función no lineal von Liebig

El último modelo es el no lineal von Liebig. París (1992) señala que un amplio espectro de formas funcionales se puede utilizar para articular las funciones de rendimiento potencial bajo la hipótesis de von Liebig, incluyendo la especificación de Mitscherlich.

Utilizando como inputs el nitrógeno (N) y agua (W), el modelo puede ser escrito con la ecuación:

$$Y = \min[m \cdot (1 - k_1 \text{EXP}(-\alpha_1 \cdot N)), m \cdot (1 - k_2 \text{EXP}(-\alpha_2 \cdot W))]]$$

En este caso la meseta de rendimiento asintótica es común a los inputs y se representa a partir de m . Los parámetros de la función de respuesta k_1 , k_2 , α_1 y α_2 se espera que sean todos positivos. Este modelo establece una meseta de rendimiento y no permite la sustitución entre inputs como en la variante lineal, pero permite productividad marginal decreciente y rendimientos decrecientes en relación a la escala de los inputs.

A.1.3. Modelos de simulación de cultivos

Los modelos agrícolas son conjuntos de ecuaciones matemáticas que representan las reacciones que se producen dentro de la planta y las interacciones entre la planta y su entorno. Los modelos están diseñados para propósitos específicos y el nivel de complejidad es consecuentemente con éste. Diferentes modelos pueden ser contruidos para diferentes subsistemas y distintos modelos pueden ser contruidos para simular un cultivo en particular o un aspecto particular de un sistema de producción.

El objetivo principal de la construcción de modelos de cultivos es obtener una estimación del rendimiento. Los modelos podemos clasificarlos en:

Modelos Empíricos

Los modelos empíricos son descripciones directas de los datos observados y se expresan generalmente en forma de ecuaciones de regresión (con uno o varios factores) y se utilizan para estimar el rendimiento final. Ejemplos de estos modelos incluyen la respuesta del rendimiento de los cultivos a la aplicación de fertilizantes, la relación entre el área foliar y el tamaño de la hoja de una especie vegetal.

Modelo mecanicista

Los modelos mecanicistas tienen la capacidad para imitar procesos físicos, químicos o biológicos y describir cómo y por qué los resultados de una determinada respuesta.

Modelos estáticos y modelos dinámicos

Un modelo estático es aquel que no contiene el tiempo como una variable, aunque los productos finales de los sistemas de cultivo se acumulan con el tiempo, por ejemplo, los modelos empíricos. Los modelos dinámicos se programan en base a ecuaciones diferenciales.

Modelos deterministas y estocásticos

Un modelo determinista es aquel que hace predicciones certeras para las cantidades (por ejemplo el rendimiento del cultivo) sin ningún tipo de distribución de probabilidad asociada. Sin embargo, las variaciones debidas a inexactitudes en los datos registrados y la variabilidad en los inputs de que se trate, son inherentes a los sistemas biológicos y agrícolas. En algunos casos, los modelos deterministas pueden ser adecuados a pesar de estas variaciones normales pero en otros puede llegar a ser insuficiente por ejemplo, en la predicción de las precipitaciones. Cuanto mayor es la incertidumbre en el sistema, los modelos deterministas más inadecuado se convierten y aparecen en contraste con éstos los modelos estocásticos.

Modelos de Simulación

Los modelos de simulación forman un grupo de modelos que se ha diseñado con el propósito de imitar el comportamiento de un sistema. Son mecanicistas en aquellos procesos que son bien conocidos y empíricos en los que no se conocen bien. En la mayoría de los casos son deterministas, ya que están diseñados para imitar el sistema en intervalos cortos de tiempo (paso de tiempo diario), el aspecto de la variabilidad relacionada con el cambio diario en condiciones climáticas y del suelo queda integrado. El corto intervalo de tiempo de simulación exige que una gran cantidad de datos de entrada (parámetros climáticos, características del suelo y los parámetros de cultivo) que deberán estar disponibles para la ejecución del modelo. Estos modelos suelen ofrecer la posibilidad de especificar las opciones de gestión y que se puede utilizar para investigar una amplia gama de estrategias de gestión.

Un modelo de simulación de cultivos típico, normalmente incluye los siguientes procesos principales que rigen crecimiento y desarrollo: el desarrollo fenológico, desarrollo del follaje, formación de los órganos, la fotosíntesis, partición de los fotoasimilados, la dinámica del carbono, agua y nitrógeno en el suelo y en la planta. Por lo tanto, un modelo de cultivo puede simular los efectos del clima, suelo, agua y la dinámica del nitrógeno en el suelo sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos.

Entre los modelos que pueden ser utilizados para estas tareas destacamos CERES (Ritchie et al. 1985), CROPSYST (Stockle et al., 1994), EPIC (Williams et al., 1984), SUCROS (Penning de

Vries and Van Laar, 1982), GOSSYM (Reddy et al., 1997). WOFOST (Supit et al., 1994), SWAP (van Dam et al., 1997), SIMULAT (Diekkrüger and Arning, 1995). SPASS (Wang and Engel, 2002) and STICS (Brisson et al., 2003),

A.1.4. Las funciones de producción y los modelos de simulación

Para ajustar funciones de producción son necesarios pares de datos de rendimiento del cultivo frente a nivel de input utilizado. A partir de estos datos es posible construir las funciones de producción antes expuestas, por ejemplo a partir de ajustes estadísticos por mínimos cuadrados.

Estos datos pueden provenir de ensayos realizados en campo ejecutado según un determinado diseño experimental, o pueden provenir de una simulación a partir de los modelos anteriormente señalados. En la literatura encontramos esto como una práctica habitual: Llewelyn y Featherstone (1997) utilizan el modelo CERES para obtener todas las funciones de producción expuestas y compararlas. Fingery Hediger (2007) emplean el modelo CROPSYST con el objeto de comparar los coeficientes obtenidos por distintas técnicas estadísticas. Martínez y Albiac (2004, 2006) emplean el modelo EPIC con el fin de obtener funciones de rendimiento y de producción de lixiviados de nitratos para emplearlas posteriormente en un modelo de transporte de contaminantes.

Para analizar la gestión óptima de la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas se propone el desarrollo de un modelo hidro-económico. El modelo de optimización determina la distribución espacio-temporal de la tasa de aplicación de fertilizantes que maximiza los beneficios netos en la agricultura, limitada por los requerimientos de calidad en el agua subterránea en diferentes puntos de control.

A.2. Desarrollo de la metodología

El objetivo principal de esta tarea es encontrar relaciones funcionales entre el rendimiento de los cultivos y los inputs que se utilizan en su consecución. Dichas relaciones serán empleadas en tareas posteriores del proyecto de investigación. La forma que consideramos más adecuada es la búsqueda de funciones de producción. Los inputs a utilizar son el agua de riego y el fertilizante nitrogenado.

En la zona de estudio (MOS), existen ensayos desarrollados en centros de investigación donde se evalúa la respuesta del cultivo ante distintas dosis de riego y de fertilización. Sin embargo, estos ensayos están realizados en lugares concretos, por lo que extenderlas a zonas amplias será una generalización inadmisibles.

Por esta razón, en lugar de emplear directamente los datos disponibles en ajustar funciones, se recurre al empleo de modelos de simulación. A partir de los datos existentes de ensayos de riego y rendimiento, se procederá al calibrado del modelo en las condiciones donde se realiza el ensayo, extendiéndolo a continuación a toda la superficie estudiada.

Dado que se va a trabajar en casos de estudio que afectan a superficies amplias, es especialmente importante disponer de herramientas que permitan aplicar los modelos de simulación de sistemas agrícolas antes descritos de forma distribuida. En cada punto del territorio el modelo es aplicado de acuerdo a las variables de suelo y clima existentes en ese lugar. Dichas variables previamente serán regionalizadas mediante el empleo de cartografía adecuada. El empleo de modelos no distribuidos o puntuales exige la elaboración de series de simulaciones repetidas con todas las combinaciones de parámetros posibles, lo cual resulta tedioso de ejecutar y difícil de regionalizar e interpretar.

En este sentido es especialmente interesante el trabajo desarrollado por Liu et al., (2007a, 2007b) integrando el modelo EPIC (Environmental Policy Integrated Climate; Williams, 1989 y 1995) en un Sistema de Información Geográfica, concretamente en ArcGis 9, denominado GEPIC.

El modelo GEPIC es un GIS basado en el modelo EPIC y diseñado para simular la dinámica espacial y temporal de los principales procesos que tienen lugar en sistemas agrícolas con manejo del complejo suelo-cultivo-atmósfera.

Por tanto las etapas de trabajo serán:

- aplicación del modelo GEPIC a una localización de la cual disponemos de ensayos empíricos, que den congruencia a los datos obtenidos.
- Aplicación distribuida a todo el territorio.

Una vez aplicado el modelo de forma distribuida deberemos estudiar si los resultados obtenidos son homogéneos en todo el territorio, o si por el contrario encontramos diferencias según el factor clima, el factor suelo o el factor orográfico (altitud). En caso de encontrar diferencias se ajustarán funciones de producción específicas por zonas, siendo funciones genéricas para todo el territorio en caso contrario.

El modelo seleccionado, además de simular el rendimiento del cultivo, genera resultados relacionados con el balance de agua en el suelo. Un resultado generado de especial interés es el lixiviado de nitratos hacia el subsuelo. Esto a su vez nos permitirá el ajuste de funciones de lixiviado de nitratos en función de los mismos inputs empleados en la función de rendimiento.

A.2.1. El modelo EPIC

Desarrollado por el USDA-ARS (U.S. Agricultural Research Service) y TAES (Texas Agricultural Experiment Station), el modelo EPIC (conocido originalmente como Erosion Productivity Impact Calculator), utiliza un paso de tiempo diario para simular los principales procesos que ocurren en un sistema agrícola con manejo del suelo-cultivo-atmósfera, tales como clima, hidrología, ciclo de nutrientes, labores de cultivo, control ambiental de la planta y demás cuestiones agronómicas.

Rendimiento de los cultivos

EPIC simula el rendimiento posible de los cultivos basándose de la interceptación de la radiación solar, parámetros ecofisiológicos del cultivo, índice de área foliar (*LAI*) e índice de cosecha (*HI*). El potencial de aumento diario de biomasa se reduce por el estrés hídrico, estrés de nitrógeno y fósforo, estrés por temperaturas extremas, o por falta de aireación del suelo. Para ello realiza el correspondiente balance de agua en el suelo así como de nutrientes.

EPIC simula el desarrollo y crecimiento del cultivo a partir de la acumulación de unidades de calor, concepto similar a los grados día. Una unidad de calor es la diferencia entre la temperatura media del día y la temperatura basal del cultivo, por debajo de la cual no se produce crecimiento. Las unidades de calor se van acumulando diariamente. Las etapas fenológicas del cultivo se van cubriendo a medida que se alcanza un determinado número de unidades de calor acumuladas.

EPIC utiliza la eficiencia en el uso de la radiación para el cálculo de la producción

fotosíntesis de biomasa. La radiación fotosintéticamente activa interceptada se calcula con la ecuación de la ley de Beer (Monsi y Saeki, 1953):

$$PAR_i = 0.02092 \cdot (RA_i) \cdot (1.0 - E^{-0.65 \cdot LAI})_i$$

Donde PAR es la radiación fotosintéticamente activa interceptada ($MJ\ m^{-2}$), RA es la radiación solar (Langley), LAI es el índice de área foliar, y el subíndice i es el día del año.

El incremento potencial de biomasa en un día se calcula utilizando el enfoque de Monteith (Monteith, 1977).

$$\Delta BP_i = 0.0001 \cdot (BE_j) \cdot (PAR_i)$$

Donde ΔBP_i es el incremento potencial de biomasa en un día i ($kg\ m^{-2}$), y BE_j es el parámetro de conversión de energía en biomasa para el cultivo j ($kg\ MJ^{-1}$). BE es un parámetro de entrada que depende del cultivo y que no cambia a lo largo del ciclo de vida del mismo.

La acumulación real de biomasa diaria se determina aplicando la ley del mínimo de Leibig. La biomasa potencial simulada se ajusta mensualmente según los cinco factores de estrés (agua, temperatura, nitrógeno, fósforo y aireación del suelo) en proporción al alcance del más severo de ellos durante el día usando la ecuación:

$$\Delta B_i = \Delta PB_i \cdot REG$$

Donde REG es el factor que regula el crecimiento del cultivo (el mínimo de los 5) calculado para el día i . La producción de biomasa diaria ajustada ΔB_i es acumulada a lo largo de la temporada de crecimiento (B_{AG}).

$$B_{AG} = \sum_{i=1}^N \Delta B_i$$

El rendimiento del cultivo se define como la parte comercial de la biomasa aérea total producido. Se calcula multiplicando la biomasa por encima del suelo en la madurez del cultivo por un índice de cosecha ajustado (HIA) por el estrés hídrico según la ecuación:

$$HIA_i = HIA_{i-1} - HI \left(1 - \frac{1}{1 + WSYE \cdot FHU(0.9 - WS_i)} \right)$$

Donde HI es el índice de cosecha potencial en el día de la cosecha, $WSYE$ es un parámetro que expresa la sensibilidad del índice de cosecha a la sequía, FHU es un factor de etapa de crecimiento, WS es el factor de estrés hídrico, y el subíndice i e $i-1$ son los días Julianos del año.

El modelo da como resultado la producción de materia seca. La producción fresca se calcula teniendo en cuenta un contenido de humedad habitual para cada producto (grano de trigo, de maíz, cebada, etc).

EPIC ofrece cinco métodos para estimar evapotranspiración potencial: Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), Penman (Penman, 1948), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972), Penman-Monteith (Monteith, 1965), y Baier-Robertson (Baier y Robertson, 1965). Cuando no disponemos de datos de la velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar se emplean Hargreaves o Priestley-Taylor.

El modelo EPIC calcula la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas por separado empleando un enfoque similar al de Ritchie (1972).

La evapotranspiración de referencia ET_o es calculada inicialmente, a partir de alguno de los métodos descritos. La transpiración potencial de las plantas T_p se simula como una función lineal de ET_o y del índice de área foliar LAI :

$$T_p = \frac{ET_o \cdot LAI}{3}; \quad 0 < LAI < 3$$

$$T_p = ET_o; \quad LAI \geq 3$$

La evaporación potencial del suelo E_p se calcula sobre la base de ET_o y un índice de cobertura del suelo EA :

$$E_p = ET_o \cdot EA$$

El valor de EA varía desde 0 a 1 de acuerdo con la ecuación:

$$EA = e^{-0.05 \cdot CV}$$

Donde CV es la suma de la biomasa producida por encima del suelo y el residuo del cultivo ($t\ ha^{-1}$).

La transpiración real de las plantas es igual a T_p cuando no hay escasez de agua en el suelo. De lo contrario, la transpiración de las plantas se reduce en respuesta a las deficiencias de agua. La evaporación de agua del suelo real se estima sobre la base de que tiene lugar en la parte superior del suelo de 0,2 m de profundidad.

Lixiviado de Nitratos (N)

EPIC considera como fuentes de pérdidas de nitratos la lixiviación, la escorrentía superficial y el flujo subsuperficial lateral. Por otro lado considera las transformaciones que se producen en el suelo como son la desnitrificación, la mineralización, inmovilización, nitrificación y volatilización. Finalmente considera como entrada el aporte de N de la lluvia.

En la Figura 2 podemos ver un esquema del balance de nitrógeno en el suelo que nos permite cuantificar el lixiviado de nitratos hacia el acuífero.

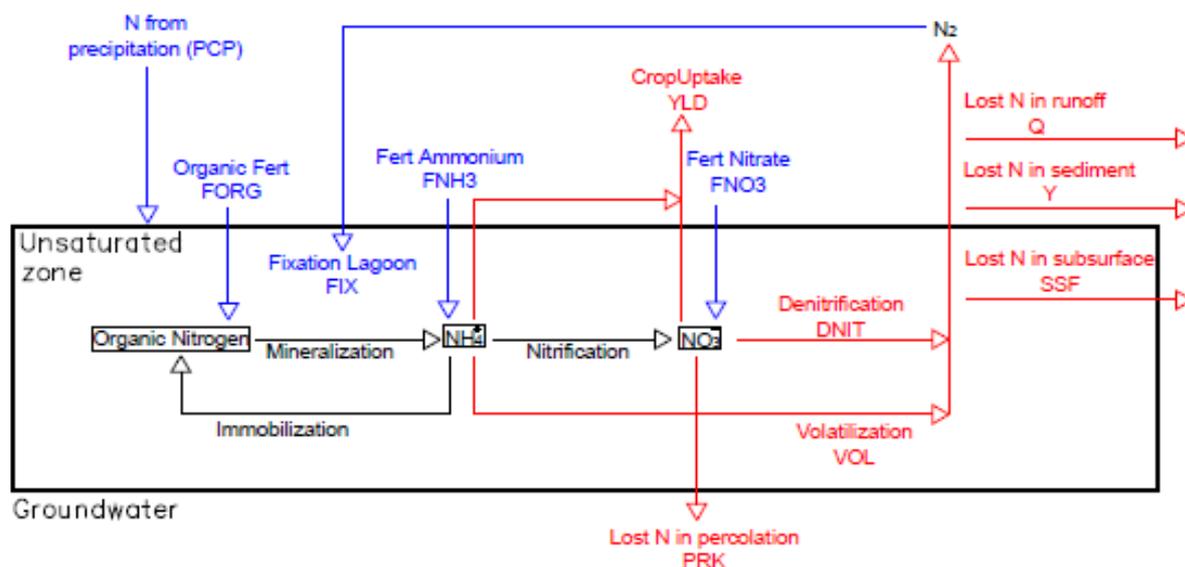


Figura 2. Procesos incluidos en el balance de Nitrógeno en el suelo

La desnitrificación es una función de la temperatura y del contenido de agua del suelo. La ecuación utilizada para estimar la tasa de desnitrificación es (Williams, 1995):

$$DN_l = WNO_3_l [1 - \exp(-1.4(TF_{NI} \cdot C_l))] \quad SWF \geq 0.95$$

$$DN_l = 0, \quad SWF < 0.95$$

Donde DN_l es la tasa de desnitrificación en una capa de suelo en $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$, TF_{NI} es el factor de temperatura del ciclo de nutrientes, C_l es contenido en carbono orgánico en %, y SWF es factor de agua en el suelo.

El modelo considera dos fuentes de mineralización: la reserva de nitrógeno orgánico fresco asociado al residuo del cultivo y la biomasa microbiana, y la reserva estable de nitrógeno orgánico asociado con el humus del suelo. La mineralización de materia orgánica fresca es estimada con la ecuación:

$$RMN_l = (DCR_l)(FON_l)$$

Donde, RMN_l es la tasa de mineralización del N en $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ para el nitrógeno orgánico fresco en la capa l , DCR_l es la tasa de decrecimiento constante para el nitrógeno orgánico fresco, y FON_l es la cantidad de nitrógeno orgánico fresco presente en $kg\ ha^{-1}$. La tasa de decaimiento constante es una función de la relación C/N, de la relación C/P, de la composición del residuo del cultivo, temperatura y contenido de agua en el suelo.

La cantidad diaria de inmovilización es calculada restando la cantidad de N contenida en el residuo del cultivo de la cantidad asimilada por los microorganismos:

$$WIM_l = (DCR_l)(FR_l)(0.0016 - C_{NFR})$$

Donde WIM_l es la tasa de inmovilización de N inmovilización en la capa l en $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$; 0.016 es el resultado de asumir que $C=0.4\ FR$, que la relación C/N de la biomasa microbiana y sus productos lábiles es = 10, y que 0.4 de C es asimilado en el residuo; y C_{NFR} es la concentración de N en el residuo del cultivo en g/g. La inmovilización podría ser limitada por la disponibilidad de N ó P.

La nitrificación se estima usando la ecuación del ratio cinético de primer orden:

$$RBV_l = WNH3_l(1 - \exp(-AKN_l - AKV_l))$$

Donde RBV_l es la volatilización y nitrificación combinadas en $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$, $WNH3_l$ es el peso de NH_3 en kg ha^{-1} , AKN_l es el regulador de nitrificación, y AKV_l es el regulador de la volatilización para la capa de suelo l . El regulador de la nitrificación es una función de la temperatura, contenido de agua en el suelo, y pH del suelo.

La volatilización del amonio aplicado en la superficie del suelo es una función de la temperatura y velocidad del viento. Empleando la ecuación: (Williams, 1995):

$$AKV_l = (TF_l)(WNF)$$

Donde: AKV_l es el regulador de volatilización y WNF es el factor de velocidad del viento para la superficie de aplicación (capa de suelo número 1)

La profundidad del amonio dentro del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y la temperatura del suelo son utilizados en la estimación de la volatilización en las capas siguientes del suelo.

El lixiviado de nitratos es simulado utilizando una función exponencial que describe el decrecimiento de la concentración de nitratos causado por el flujo del agua a través del perfil del suelo. La cantidad de nitratos $\text{NO}_3\text{-N}$ perdida cuando el flujo de agua atraviesa el suelo se estima teniendo en cuenta el cambio en la concentración como:

$$VNO3 = QT \cdot C_{NO3}$$

donde $VNO3$ es la cantidad de nitratos $\text{NO}_3\text{-N}$ perdida desde una capa de suelo y C_{NO3} es el promedio de concentración de nitratos $\text{NO}_3\text{-N}$ en la capa durante la percolación del volumen

QT a través de la capa. Al final del día, la cantidad de $\text{NO}_3\text{-N}$ perdido en la capa es:

$$WNO3 = WNO3_0 - QT \cdot C_{NO3}$$

Donde $WNO3_o$ y $WNO3$ son los pesos de NO₃-N contenidos en la capa al principio y final del día. La concentración de NO₃-N puede ser calculada dividiendo el peso de NO₃-N por el volumen de agua almacenada:

$$C'_{NO3} = C_{NO3} \cdot e^{\left(\frac{-QT}{bl \cdot PO}\right)}$$

Donde C'_{NO3} es la concentración de NO₃-N al final del día, PO es la porosidad del suelo, y bl es la fracción de almacenamiento de PO ocupada por el agua percolada. El promedio de concentración durante la percolación de QT :

$$C_{NO3} = \frac{VNO3}{QT}$$

Las cantidades de NO₃-N contenidas en la escorrentía, flujo lateral y percolación son estimadas como productos del volumen de agua por la concentración obtenida en la ecuación anterior.

En este epígrafe se han reflejado los procedimientos del modelo EPIC más significativos dentro de la metodología aplicada. Una descripción completa del modelo puede encontrarse en Williams 1989 y 1995.

A.2.2. Aplicaciones de EPIC en la literatura.

En la literatura encontramos múltiples estudios en donde se ha aplicado EPIC con éxito. Desde su creación en 1989 hasta la actualidad, el modelo EPIC lo podemos encontrar en 272 estudios publicados en artículos en revistas científicas. Aparte las citas que podemos encontrar de libros, capítulos de libros, manuales de usuario y manuales técnicos del modelo, etc.

Carece de sentido citarlos todos aquí. Algunos de ellos ya han sido citados a lo largo del presente documento. La lista completa podemos encontrarla en http://www.card.iastate.edu/environment/items/EPIC_reference_list.pdf. Al final del documento se reproduce la lista integra, actualizada hasta noviembre de 2010.

En cualquier caso podemos ver como se trata de uno de los modelos de simulación de mayor difusión a nivel mundial.

A.2.3. Integración de EPIC con GIS. El modelo GEPIC.

Los pasos del desarrollo del modelo con GEPIC se ilustra en la Figura 3. Los datos de entrada se añaden por primera vez en GEPIC en términos de conjuntos de datos SIG ráster. El conjunto de capas ráster de entradas básicas para poder ejecutar GEPIC incluyen un modelo digital del terreno DEM (Digital Elevation Model), la pendiente, el tipo suelo, el clima, los uso del suelo, la cantidad de riego y la cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado.

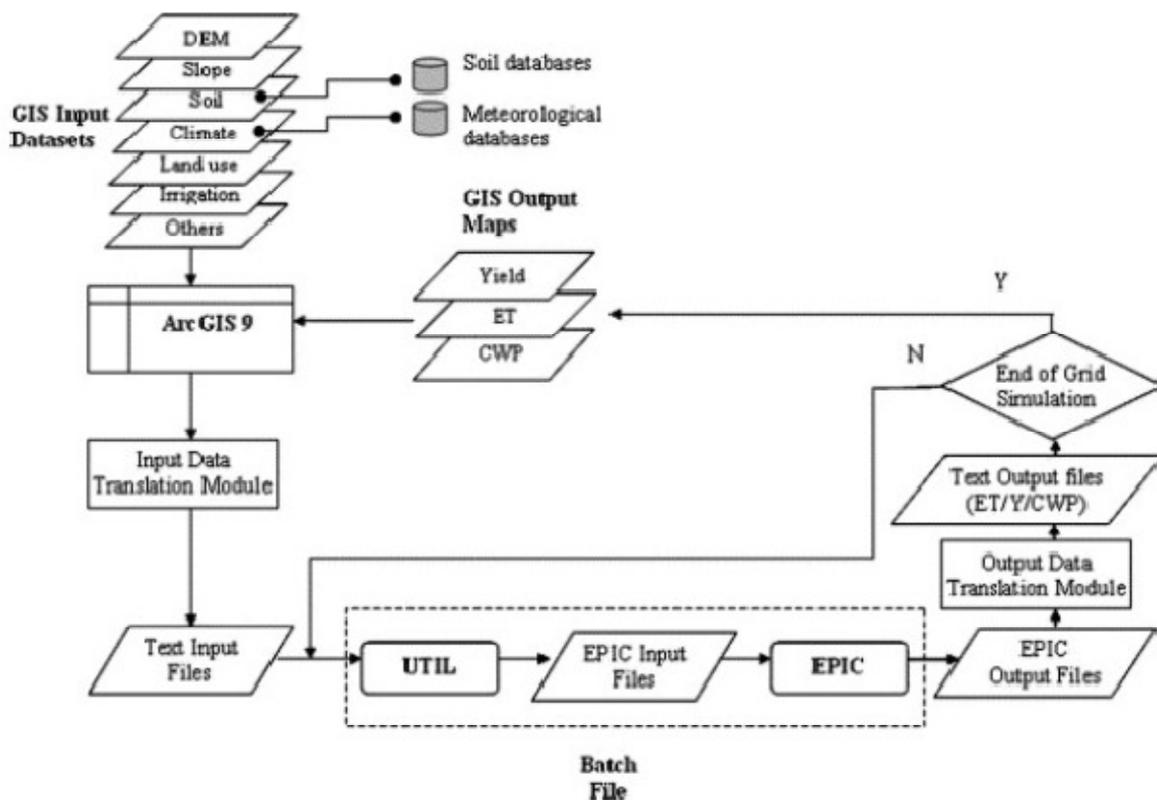


Figura 3. Esquemas de integración de EPIC en GEPIC

Los mapas de clima y suelo indican simplemente un código numérico que dirige al programa a un fichero donde están los datos meteorológicos y la caracterización del suelo para cada pixel. El mapa de usos del suelo discretiza el territorio en los diferentes tipos de uso de la tierra, incluidos los de regadío y la agricultura de secano. El mapa DEM, el de pendiente, el de riego, y el de fertilizante muestran los valores reales de elevación (m), pendiente (adimensional), el riego máximo anual (mm), y la máxima aplicación de fertilizantes anual (kg ha⁻¹) respectivamente.

Después de agregar los conjuntos de datos SIG ráster en el módulo de entrada GEPIC, el módulo de traducción de datos de entrada la lee y escribe un archivo de texto. En el texto de este archivo de entrada, cada línea representa un pixel de la malla simulada y contiene la información de todas las capas ráster antes descritas. La información entonces se utiliza para generar archivos de entrada específicos de EPIC con la ayuda del programa UTIL (Universal Text Integration Language). UTIL es pues usado en el proceso de transferir datos de entrada en bruto a EPIC.

Este proceso se logra mediante la escritura de líneas de comandos en un archivo por lotes. El archivo por lotes se compone de dos tipos de líneas de comandos: línea de comandos UTIL, y líneas de comandos de control de la ejecución de EPIC. Las líneas de comando de UTIL se utilizan para editar archivos de entrada específicos de EPIC y añadirles la información deseada, mientras que las otras controlan la ejecución del modelo EPIC.

Al ejecutar el archivo por lotes, GEPIC corre el modelo EPIC modelo para cada malla, simulando uno por uno cada celda. Después de una simulación, EPIC se generan un conjunto de archivos de salida. Con el módulo de traducción de la salida de resultados, se genera un archivo de texto donde se ordenan 61 variables de salida de resultados (rendimiento, evapotranspiración potencial , evapotranspiración real, transpiración, etc, etc..) Cada línea del fichero de texto del archivo de salida representa una celda de la malla simulada.

El modelo GEPIC tiene una ventaja que lo hace especialmente interesante frente a otros modelos de simulación de sistemas agrícolas. Al igual que cualquier otro, puede estimar el rendimiento del cultivo, el consumo de agua o el balance de fertilizantes en el suelo considerando los factores que influyen en cada ubicación. Sin embargo GEPIC lo hace en una escala espacial flexible, pues eso se decide con el tamaño de las celdas ráster empleadas. Disponiendo de las variables de entrada regionalizadas, GEPIC realiza una simulación por cada celda de la malla, por lo que automáticamente el resultado queda regionalizado o distribuido espacialmente.

En nuestro caso esto es especialmente interesante pues el objetivo final es emplear los resultados de las simulaciones acopladas a un modelo hidroeconómico y otro de transporte y flujo de contaminantes. Realizar una simulación puntual y extenderla a la totalidad del territorio analizado (e.g. la Mancha Oriental) sería excesivamente simplista.

A.2.4. Obtención de las funciones de producción mediante GEPIC.

Datos de entrada

Nuestro objetivo es modelizar el comportamiento de los principales cultivos existentes en una zona a través de la confección de funciones de producción y funciones de generación de N-Lixiviados que posteriormente puedan ser empleadas en el posterior modelo hidroeconómico y de flujo y transporte de contaminantes.

Para ello utilizaremos el modelo distribuido GEPIC. La información de entrada en formato ráster regionalizada la obtendremos de distintas fuentes. El modelo digital de elevaciones ha sido obtenido de la base de datos mundial GTOPO30 desarrollada por el United States Geological Survey (USGS) con una resolución de 10 km (5') (Eros Data Center, 1998). El mapa de pendientes ha sido obtenido de la base de datos mundial HYDRO1K Digital Slope Raster Map (USGS, 2000) con un tamaño de celda también de 10 Km (5').

Los datos de suelo han sido obtenidos de la base de datos mundial Digital Soil Map of the World DSMW (FAO, 1990). Esta base de datos establece una serie de unidades de suelo. La información de suelo está en formato SIG vectorial, el cual ha sido transformado a ráster con un tamaño de celda de 10 Km (5') en concordancia con los dos conjuntos de datos ráster descritos anteriormente. Cada unidad de suelo está codificada con un número. Este número tiene su correspondencia con un fichero de la base de de datos mundial ISRIC-WISE International Soil Profile Data Set (Batjes, 1995, 2006). Allí podemos encontrar la información necesaria para la ejecución del modelo.

La información meteorológica ha sido obtenida del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM). Para ello se parte de la ubicación espacial de las estaciones disponibles dentro de la zona de estudio y se asigna un área de influencia de cada estación mediante la técnica de los polígonos de Thiessen.

Este mapa de polígonos se transforma a ráster con el mismo tamaño de celda que los empleados anteriormente. Cada celda cuenta con un código que informa de la estación meteorológica de influencia. La información alfanumérica con los datos meteorológicos se organiza en ficheros de texto codificados con el mismo número que ha sido utilizado en el mapa ráster. De esta forma

cada celda empleará en la simulación los datos meteorológicos de la estación que le ha sido asignada por el método de los polígonos de Thiessen.

Si bien es posible realizar simulaciones sin disponer de datos meteorológicos completos, no es recomendable. Se dispone de la red SIAR de datos completos (precipitación, temperaturas máximas, medias y mínimas, humedad relativa máximas, medias y mínimas, velocidad del viento y radiación solar) del periodo 2000 – 2009, siendo estos los datos empleados en las simulaciones.

Finalmente los mapas ráster de cantidad de riego máxima y dosis de fertilizante máximo son dos mallas uniformes en cuyas celdas está la misma información: la máxima cantidad de agua de riego aplicada a lo largo de todo el cultivo (mm) y la máxima cantidad de fertilizante nitrogenado (kg ha⁻¹). Ambas son generadas con el mismo tamaño de celda que los anteriores. Ambas celdas deben ir cambiando de valor en cada simulación con el objeto de generar las funciones de producción.

Obtención de las funciones de producción

De las distintas funciones de producción existentes en la literatura, la ecuación polinómica de tipo cuadrático ha sido la elegida para modelizar la respuesta del cultivo. Dos funciones serán construidas, una de respuesta del cultivo en forma de rendimiento, y otra de contaminación en forma de lixiviado de nitratos. Como factores o variables dependientes emplearemos la dosis de riego y la fertilización nitrogenada. La forma cuadrática consiste en una composición aditiva de los factores, de sus cuadrados así como un término adicional con la interacción entre ellos. La estructura de las funciones de producción será:

$$Y_{i,j} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot N_{i,j} + \alpha_2 \cdot W_{i,j} + \alpha_3 \cdot N_{i,j}^2 + \alpha_4 \cdot W_{i,j}^2 + \alpha_5 \cdot N_{i,j} \cdot W_{i,j}$$

$$L_{i,j} = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{i,j} + \beta_2 \cdot W_{i,j} + \beta_3 \cdot N_{i,j}^2 + \beta_4 \cdot W_{i,j}^2 + \beta_5 \cdot N_{i,j} \cdot W_{i,j}$$

Donde $Y_{i,j}$ es el rendimiento del cultivo en la celda i de la malla y en el año j de simulación (kg ha⁻¹), $N_{i,j}$ es la cantidad de fertilizante aplicado al cultivo a lo largo de todo el ciclo, en la celda i de la malla y en el año j de simulación (kg ha⁻¹), $W_{i,j}$ es la dosis de riego aplicada al cultivo a lo largo de todo el ciclo, en la celda i de la malla y en el año j de simulación (mm), $\alpha_1, \dots, \alpha_5$, y β_1, \dots, β_5 , son los coeficientes del ajuste de mínimos cuadrados realizado.

Para obtener las funciones de producción se procede a realizar una serie de simulaciones empleando el método *ceteris paribus*. Para ello, se buscan las cantidades máximas de factor que se utilizan habitualmente en la zona y que podemos encontrar en la Tabla 1. A continuación uno de los factores se mantiene fijo en una cantidad adecuada para que no interfiera en los resultados mientras que el otro se va variando. Terminado el conjunto de simulaciones relativas a un factor se procede a realizar lo mismo con el otro. El resultado final son un conjunto de simulaciones del cultivo en donde se han ido variando todos los factores implicados.

Tabla 1: Valores usuales de riego y fertilización

CULTIVO	RIEGO (mm)	FERTILIZANTE N (kg ha-1)
Alfalfa	9691	20
Maíz	7320	300
Cebolla	6350	215
Trigo	4580	150
Cebada	3650	125
Remolacha	8375	250

Fuente: ITAP (2005). Montoro (2008).

Por otro lado, como las simulaciones se realizan de forma distribuida empleando GEPIC, todas estas simulaciones están extendidas a la totalidad de las celdas de la zona en estudio y a la totalidad de los años disponibles (2000-2009). Esto nos produce una nube de varios miles de puntos equivalentes a otros tantos ensayos puntuales, donde tenemos codificado no solo el resultado, sino los inputs que lo generan.

Además de los factores empleados en la construcción de las funciones, otros factores externos al ensayo pueden condicionar el resultado. Entre ellos destacamos el factor clima, la altitud o el factor tipo de suelo. Por ello mediante un análisis de la varianza (ANOVA) y la covarianza (ANCOVA) se buscará si aparecen diferencias significativas entre los rendimientos o la producción de N-lixiviados por tipo de suelo, estación meteorológica de influencia o altitud sobre el nivel del mar, de forma que, caso de existir tales diferencias podamos construir funciones específicas por zonas del territorio y no una única curva para la totalidad.

Los resultados de las simulaciones deberán de ser coherentes con los ensayos reales existentes en la finca y publicados por el Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP) rendimiento de los cultivos habituales de la zona realizados en la finca experimental “Las Tiesas” (Albacete) situada en las coordenadas geográficas 2° 5’ 10” de longitud oeste y 39°14’30” de latitud norte, y una altitud de 695 m.

A.3. Aplicación a los casos de estudio.

Sistema Mancha Oriental (MOS)

En este apartado se desarrolla la metodología descrita en el apartado anterior, la obtención de las funciones de rendimiento y N-lixiviado de 3 cultivos: **maíz**, **trigo** y **cebada** en el sistema de la Mancha Oriental (MOS).

A.3.1. Meteorología

Se trata de datos completos de precipitación, temperaturas máximas, medias y mínimas, humedad relativa máximas, medias y mínimas, velocidad del viento y radiación solar obtenidos de la red SIAR para el periodo 2000-2009.

La Figura 3 nos muestra las estaciones meteorológicas de la red SIAR y el área de influencia asignada a cada una de ellas mediante los polígonos de Thiessen.

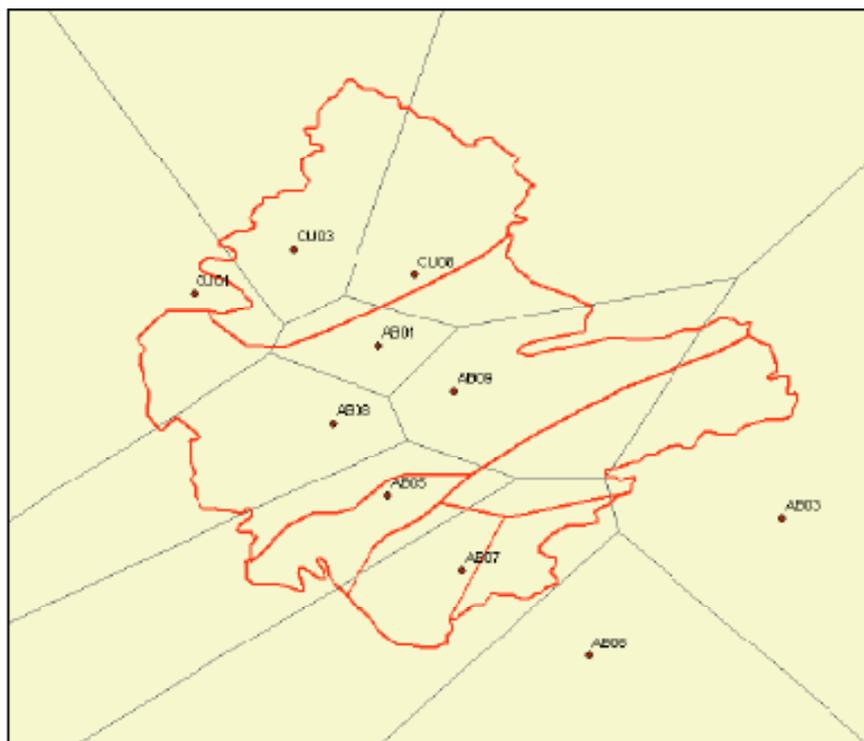


Figura 4. Estaciones meteorológicas red SIAR. Zonas de influencia por polígonos de Thiessen.

En la Tabla 2 quedan reflejados los datos de localización de las estaciones meteorológicas de la red SIAR dentro de la zona de estudio.

Tabla 2. Red SIAR en MOS.

ESTACIÓN	TÉRMINO MUNICIPAL	XUTM	YUTM	ALTITUD
TARAZONA – AB01	Tarazona de la Mancha	593280	4345926	722
ALMANSA – AB03	Almansa	664184	4307954	698
ALBACETE- AB05	Albacete	595314	4311962	677
ONTUR- AB06	Ontur	630940	4276220	682
POZO CAÑADA AB-07	Pozocañada	608291	4295449	872
LA GINETA - AB08	La Gineta	585335	4328526	722
MOTILLEJA - AB09	Motilleja	606389	4336016	695
EL SANCHÓN – CU01	Vara de Rey	560784	4357796	698
EL PICAZO – CU03	El Picazo	578256	4367851	728
VILLANUEVA DE LA JARA – CU08	Villanueva de la Jara	599384	4362528	820

Nota: AB06 Ontur tiene su área de influencia fuera del perímetro de MOS, por lo que no volverá a aparecer.

A.3.2. Suelos

Los tipos de suelos encontrados en la zona podemos verlos en la Figura 5.

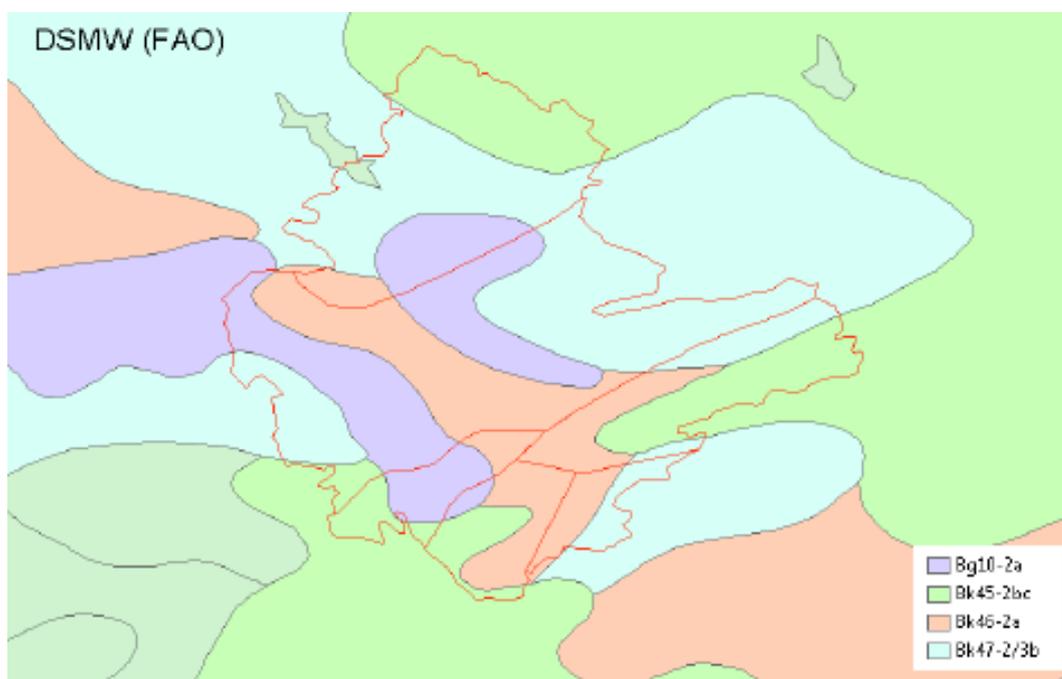


Figura 5. Suelos en MOS según DSMW (FAO)

Las dos primeras letras del código indican el tipo de suelo mayoritario en la unidad según la clasificación de suelos de la FAO. El número que le sigue es un número de unidad de suelo para localizarlo en la base de datos y conocer si dentro de la unidad aparecen mezclados otros tipos de suelos en menor proporción. En una unidad de suelo cartografiada siempre el predominante (el que le da el nombre) está presente con más de un 40% de la superficie ocupada. El número tras el guión indica la clase de textura, siendo 1 suelos gruesos, 2 medios y 3 finos. Finalmente las letras últimas son un indicador de pendiente, con la siguiente equivalencia: a = 0-8% de pendiente, b=8-30% y c=>30%.

Tabla 3: Suelos encontrados en MOS.

SMU N	SMUS	DS U	% DSU	FIAS U	%FIAS U	SAS U	%SAS U	TAS U	%TAS U	FOAS U	%FOA S U
6461	Bg10-2a	Bg	60	Bk	30	Lc	10	-	-	-	-
6468	Bk45-2bc	Bk	40	E	20	I	20	Hc	10	K	10
6470	Bk46-2a	Bk	90	Lc	10	-	-	-	-	-	-
6471	Bk47-2/3b	Bk	40	B	20	Rc	20	E	10	L	10

SMUN: Número de la unidad de suelo mapeada

SMUS: Símbolo de unidad de suelo mapeada

DSU: Unidad de suelo dominante

FIASU: Primera unidad de suelo asociado (símbolo)

SASU: Segunda unidad de suelo asociado (símbolo)

TASU: Tercera unidad de suelo asociado (símbolo)

FOASU: Cuarta unidad de suelo asociado (símbolo)

Los suelos encontrados son por un lado una unidad de Cambisol gleyco (Bg) y por otro lado 3 unidades de Cambisol Cálcico (Bk). Los suelos mezclados entre estas unidades son Luvisol (L), Rendzinas (E), Litosoles (I), Kastanozems (K) Regosoles (Rc) y Phaeozems (H).

La caracterización de dichos suelos la encontramos en Batjes (1995, 2006). Los parámetros del suelo básicos que emplea el modelo son número de capas de suelo y su profundidad, porcentaje de arena y limo, densidad aparente, pH, contenido en carbono orgánico y capacidad de intercambio catiónico. Todo ello para 5 capas de suelo a 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, 80-100 cm de profundidad.

A.3.3. Regionalización del resultado de las simulaciones. Generación de funciones de producción específicas por zonas

Para evaluar si es posible realizar funciones de producción distintas por zonas o si por el contrario una sola función de producción describe adecuadamente toda la zona de estudio se desarrolla un análisis de la varianza multifactorial (ANOVA) y de la covarianza (ANCOVA). Las variables explicadas son el rendimiento de los cultivos y el lixiviado de nitrógeno (kg ha^{-1}). Los factores entre los que buscamos diferencias significativas son la altitud (covariante), la estación meteorológica de influencia (factor clima) o el tipo de suelo (factor suelo). El análisis estadístico se desarrolla mediante el concurso de Statgraphics Centurion XVI.

En el caso de encontrar diferencias significativas en algún cultivo, se realizarán funciones específicas para ese factor, aunque en otros cultivos no las encontremos. Lo único que ocurrirá es que en los cultivos donde esas diferencias no se aprecien, los coeficientes de las funciones serán casi idénticos. No hacerlo así podría complicar la utilización posterior de las funciones en los modelos hidroeconómico y de transporte.

Cebada:

En la Figura 6 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos en el ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. Encontramos que los resultados de N-lixiviado son distintos para las unidades de suelo Bk (6468, 6470 6472) de la unidad de suelo Bg (6461), siendo mucho más intenso en esta última unidad. En cuanto a las estaciones meteorológicas, vemos que claramente hay dos grupos: uno formado por las estaciones de Albacete (AB05), Pozo Cañada (AB07) y La Gineta (AB08), y otro con el resto de estaciones (AB01, AB03, AB09, CU01, CU03, CU08), presentando el segundo grupo un N-lixiviado mucho más intenso.

En la Tabla 4 encontramos los resultados del ANOVA. La Altitud no es un factor que influya en el N-lixiviado para este cultivo. Tampoco encontramos interacción entre las variables.

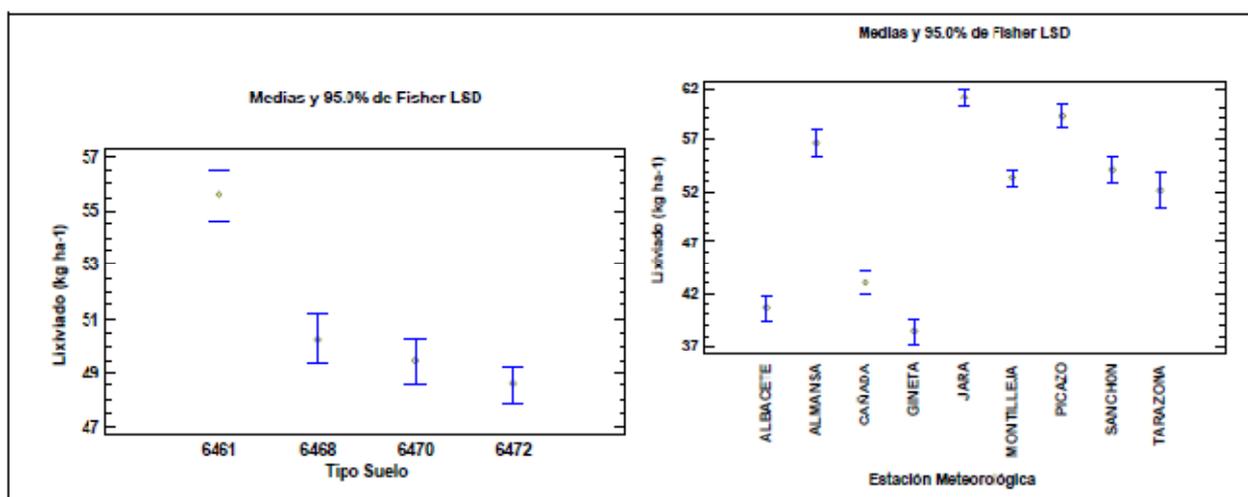


Figura 6. ANOVA de N-lixiviado en cebada.

Tabla 4. Análisis de Varianza para N-lixiviado en cebada- Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
cota	0.352968	1	0.352968	0.00	0.9517
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Suelo	7439.44	3	2479.81	25.76	0.0000

B: Estación	79195.2	8	9899.41	102.84	0.0000
RESIDUOS	136407.	1417	96.2648		
TOTAL (CORREGIDO)	226777.	1429			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Operando de la misma forma se realiza un ANOVA de Rendimiento del cultivo por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 7 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 5 se muestran los resultados del ANOVA. Se observa que si bien hay un tipo de suelo menos productivo, las diferencias no son estadísticamente significativas. Sin embargo, desde el punto de vista climático, podemos ver como las 3 estaciones de la provincia de Cuenca presentan menor rendimiento que las estaciones de la provincia de Albacete. La zona de influencia de la estación de Tarazona (AB01), colindante con las anteriores, está en un punto intermedio entre ambos grupos, con producciones más cercanas al primer grupo que al segundo.

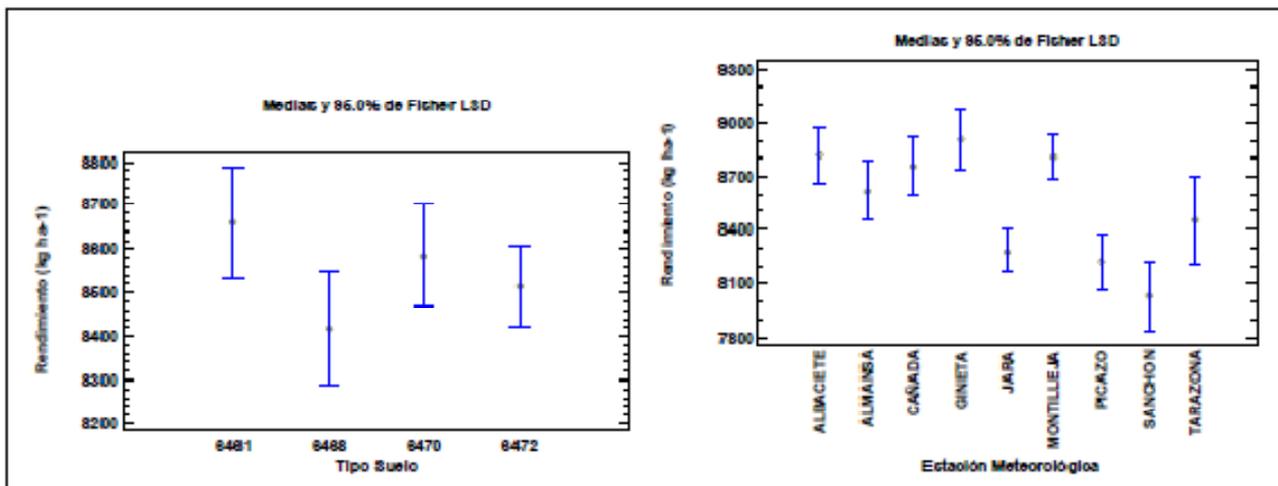


Figura 7. ANOVA de Rendimiento en cebada.

Tabla 5. Análisis de Varianza para Rendimiento en cebada - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					

cota	5.02454E6	1	5.02454E6	2.53	0.1120
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Suelo	6.17747E6	3	2.05916E6	1.03	0.3761
B: Estación	1.14171E8	8	1.42714E7	7.17	0.0000
RESIDUOS	3.08198E9	1549	1.98965E6		
TOTAL (CORREGIDO)	3.20833E9	1561			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Trigo

Se realiza un ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 8 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 6 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como el trigo si presenta diferencias estadísticamente significativas de N-lixiviado por tipo de suelo, al igual que ocurría con la cebada. De nuevo el suelo 6461 (Bg) difiere de los otros tres suelos (Tipo Bk). Además de cumplirse el mismo patrón, en valor absoluto las diferencias son muy superiores. Sin embargo no encontramos diferencias significativas por zona climática (Estación Meteorológica).

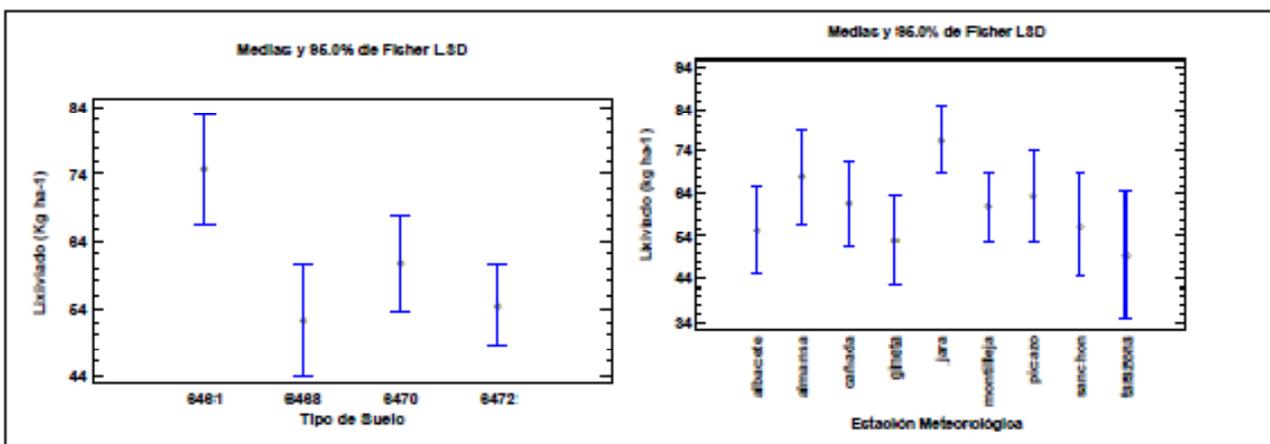


Figura 8. ANOVA de N-lixiviado en Trigo.

Tabla 6. Análisis de Varianza para N-lixiviado en trigo - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
cota	99.6993	1	99.6993	0.02	0.8997
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Estación	62761.7	8	7845.22	1.25	0.2662
B: Suelo	51989.8	3	17329.9	2.76	0.0410
RESIDUOS	7.42505E6	1183	6276.46		
TOTAL (CORREGIDO)	7.52393E6	1195			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

También se realiza un ANOVA de Rendimiento del cultivo por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 9 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 7 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como el trigo es una especie que se adapta mucho mejor a las distintas condiciones de clima y suelo, no apreciándose diferencias de rendimiento estadísticamente significativas ni por zona climática ni por tipo de suelo.

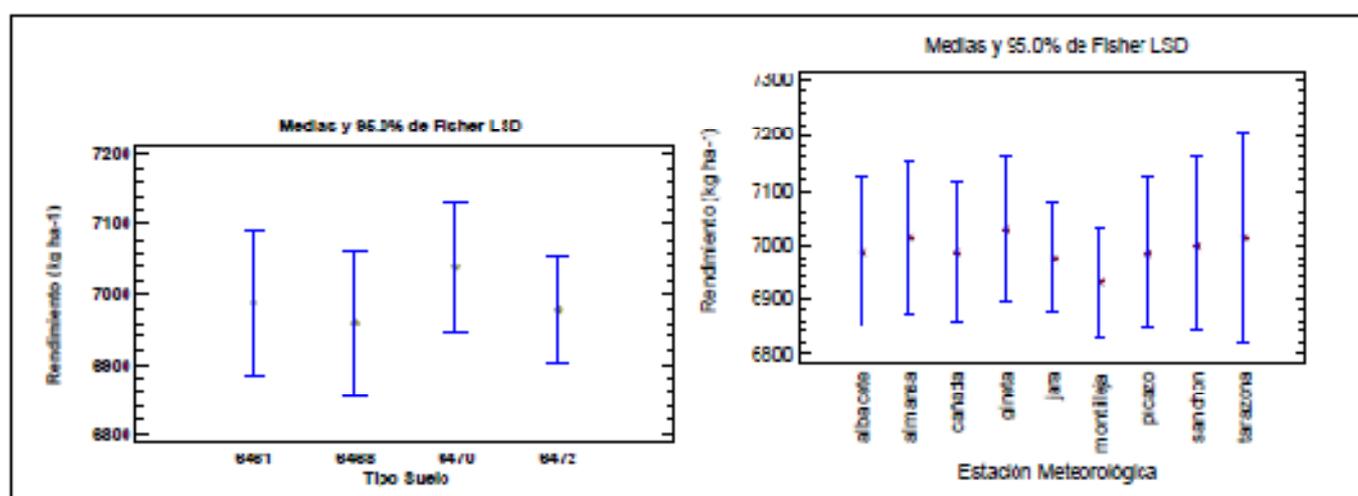


Figura 9. ANOVA de Rendimiento en Trigo.

Tabla 7. Análisis de Varianza para rendimiento en trigo - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
cota	222329.	1	222329.	0.022	0.6419
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Suelo	684007.	3	228002.	0.22	0.8813
B: Estación	981827.	8	122728.	0.12	0.9985
RESIDUOS	1.21651E9	1183	1.02833E6		
TOTAL (CORREGIDO)	1.21855E9	1195			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Maiz

Se realiza un ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 10 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 8 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como el maíz repite para N-lixiviado los resultados encontrados en Cebada. Por tipo de suelo aparece el tipo Bg (6461) con un N-lixiviado muy superior al resto de suelos de tipo Bk. Por estación Meteorológica de nuevo nos aparecen dos grupos. La única diferencia con la cebada es que al grupo que menor N-lixiviado produce, formado por las estaciones AB05, AB07 y AB08, se le ha sumado la AB09 (Motilleja) que allí formaba parte del grupo que genera un mayor N-lixiviado.

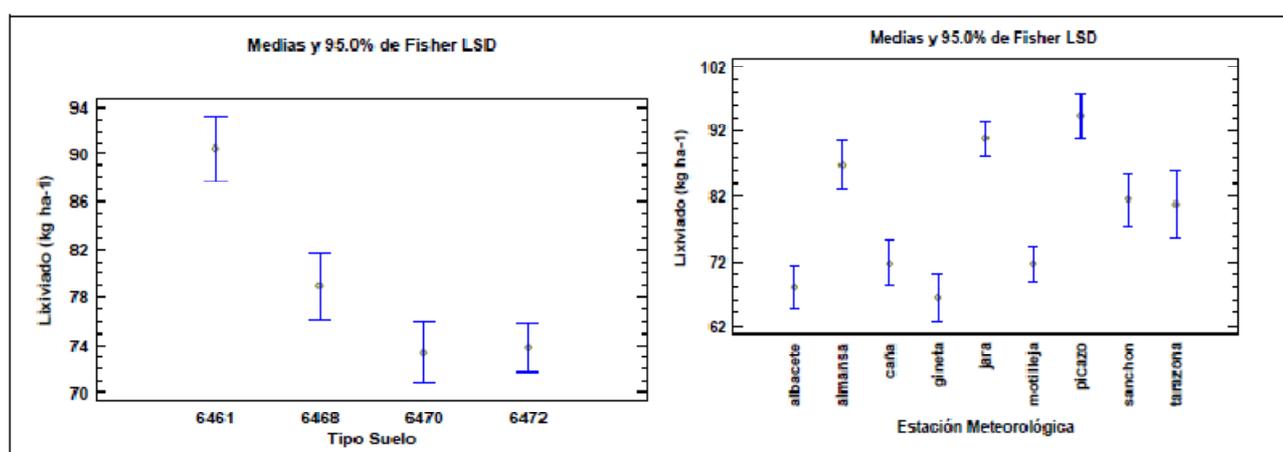


Figura 10. ANOVA de N-lixiviado en Maiz.

Tabla 8. Análisis de Varianza para N-lixiviado en maíz - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
cota	2199.38	1	2199.38	1.63	0.2020
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Estación	184847.	8	23105.8	17.10	0.0000
B: Suelo	76580.6	3	25526.9	18.89	0.0000
RESIDUOS	3.0088E6	2227	1351.06		
TOTAL (CORREGIDO)	3.29708E6	2239			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Finalmente se realiza un ANOVA de Rendimiento por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 11 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 9 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como para Maíz no aparecen diferencias significativas de rendimiento por tipo de suelo. Sin embargo si aparecen diferencias entre zonas climáticas, donde una zona destaca por su especial rendimiento que es la estación de Monilleja AB09.

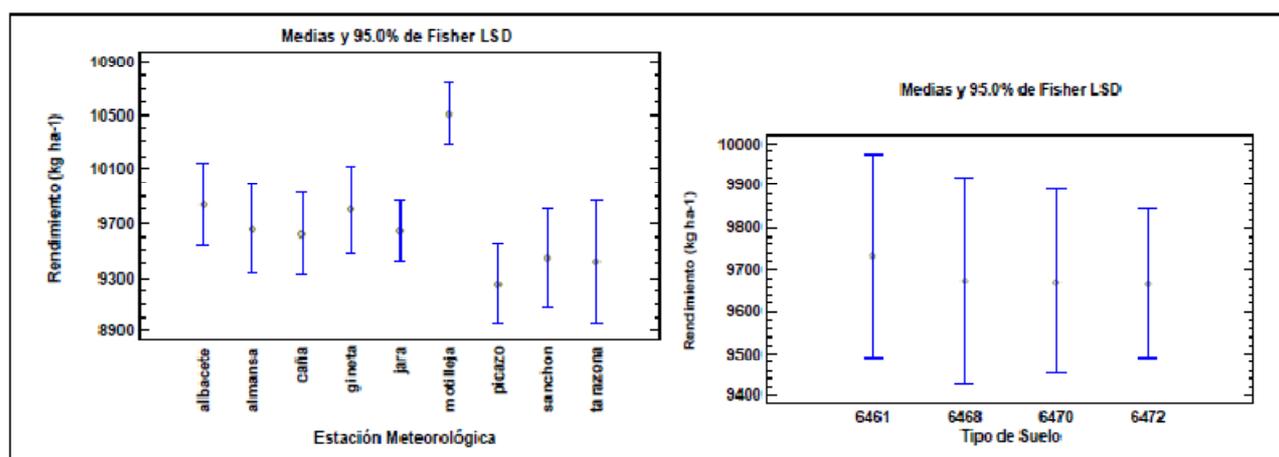


Figura 11. ANOVA de Rendimiento en Maíz.

Tabla 9. Análisis de Varianza para Rendimiento en maíz- Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
cota	721303.	1	721303.	0.07	0.7902
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Suelo	1.0287E6	3	342901.	0.03	0.9917
B: Estación	2.88724E8	8	3.60905E7	3.54	0.0004
RESIDUOS	2.27049E10	2227	1.02833E6		
TOTAL (CORREGIDO)	2.3032E10	2239			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

A.3.4. Funciones de producción ajustadas

Tras el análisis de la varianza desarrollado en el epígrafe anterior se procede al ajuste de las funciones de producción que describan tanto el rendimiento del cultivo como la producción de N-lixiviado de nitrógeno para aquellos subgrupos que han demostrado presentar diferencias significativas.

Tal y como se indicó en la descripción de la metodología, se procede al ajuste de funciones de tipo cuadrático, siendo su estructura matemática:

$$Y_{i,j} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot N_{i,j} + \alpha_2 \cdot N_{i,j}^2 + \alpha_3 \cdot W_{i,j} + \alpha_4 \cdot W_{i,j}^2 + \alpha_5 \cdot N_{i,j} \cdot W_{i,j}$$

$$L_{i,j} = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{i,j} + \beta_2 \cdot N_{i,j}^2 + \beta_3 \cdot W_{i,j} + \beta_4 \cdot W_{i,j}^2 + \beta_5 \cdot N_{i,j} \cdot W_{i,j}$$

Donde $Y_{i,j}$ es el rendimiento del cultivo en la celda i de la malla y en el año j de simulación(kg·ha⁻¹), $L_{i,j}$ es el N-lixiviado en la celda i de la malla y en el año j de simulación(kg·ha⁻¹) $N_{i,j}$ es la cantidad de fertilizante aplicado al cultivo a lo largo de todo el ciclo, en la celda i de la malla y en el año j de simulación (kg ha⁻¹), $W_{i,j}$ es la dosis de riego aplicada al cultivo a lo largo de todo el ciclo, en la celda i de la malla y en el año j de simulación (mm), $\alpha_1, \dots, \alpha_5$, y β_1, \dots, β_5 , son los coeficientes del ajuste de mínimos cuadrados realizado. Los coeficientes de ajuste se obtienen mediante el empleo de Statgraphics Centurion XVI, realizando una regresión múltiple por el método de los mínimos cuadrados.

Cebada

Caso 1-Cebada: N-lixiviado en suelo tipo 6461 (Bg)

Tabla 10. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Cebada

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_1	-0.0728704	0.0337663	-2.15808	0.0319
α_2	0.474562	0.0421027	11.2715	0.0000
α_3	0.000787222	0.000109779	7.171	0.0000
α_4	0.000712829	0.000238203	2.99253	0.0030
α_5	-0.00158485	0.00013645	-11.6149	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	783410.	5	156682.	1366.02	0.0000
Residuo	29019.0	253	114.7		
Total	812429.	258			

R-cuadrada = 96.4281 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96.3716 por ciento

Error estándar del est. = 10.7098

Error absoluto medio = 8.51075

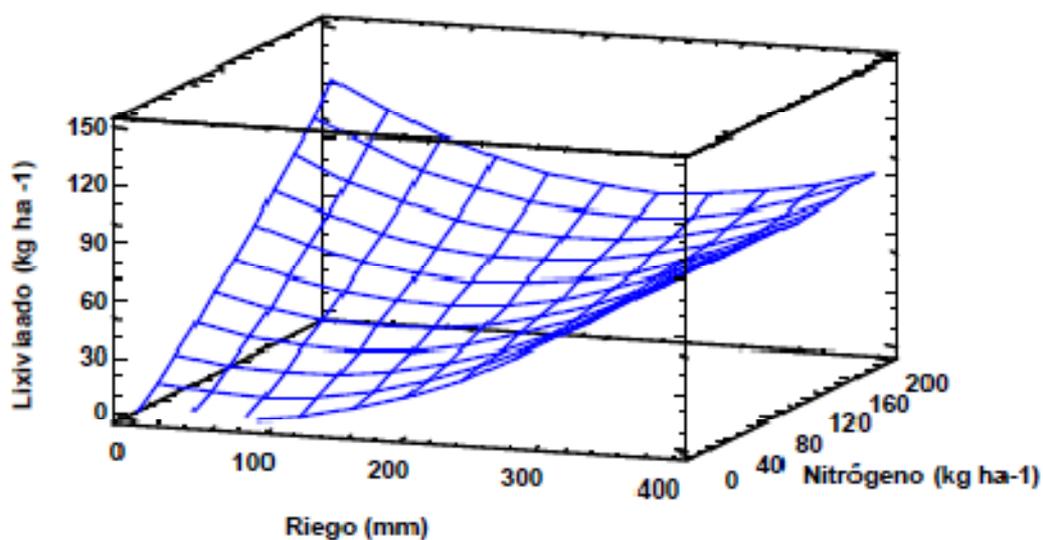


Figura 12. Gráfico de Superficie Caso 1-Cebada.

Caso 2 - Cebada: N-lixiviado en suelo \diamond 6461. (Suelos Bk)

Tabla 11. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2- Cebada.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_1	0.0984335	0.0147957	6.65285	0.0000
α_2	0.356069	0.0187419	18.9986	0.0000
α_3	0.000187385	0.0000483935	3.87211	0.0001
α_4	0.000289546	0.000109153	2.65267	0.0080
α_5	-0.0010784	0.0000588038	-18.339	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3.08148E6	5	616297.	5593.06	0.0000
Residuo	128591.	1167	110.19		
Total	812429.	1172			

R-cuadrada = 95.9941 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95.9804 por ciento

Error estándar del est. = 10.4971

Error absoluto medio = 8.8097

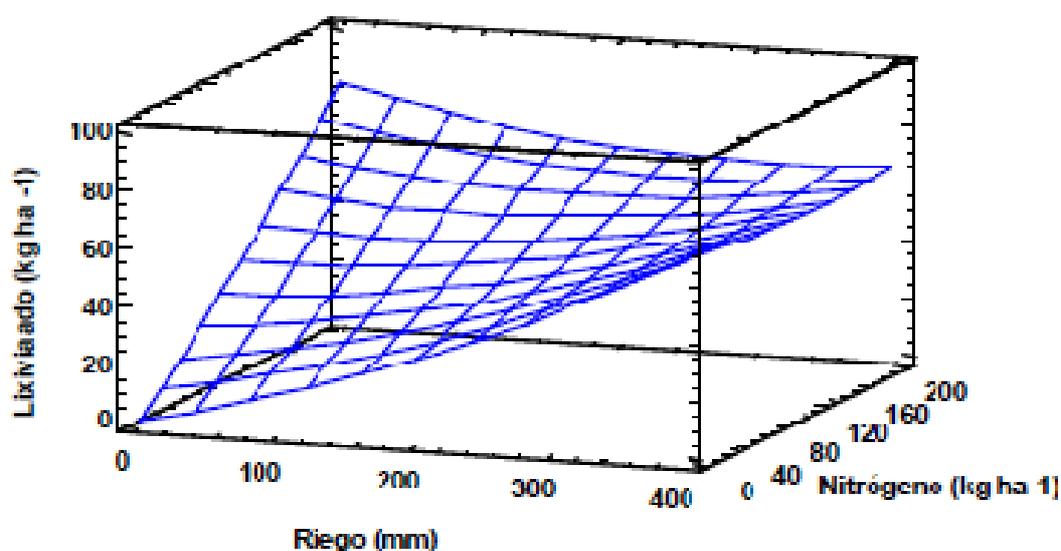


Figura 13. Gráfico de Superficie Caso 2-Cebada.

Caso 3-Cebada. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas "CAÑADA", "ALBACETE", "GINETA".

Tabla 12. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3- Cebada.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_1	0.12367	0.00444287	27.8355	0.0000
α_2	0.223924	0.0151907	14.7409	0.0000
α_4	0.000649428	0.000123028	5.27872	0.0000
α_5	-0.000888912	0.0000596748	-14.8959	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	724437.	4	181109.	3441.12	0.0000
Residuo	22420.8	426	52.6309		
Total	746858.	430			

R-cuadrada = 96.998 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96.9768 porciento

Error estándar del est. = 7.25472

Error absoluto medio = 5.91764

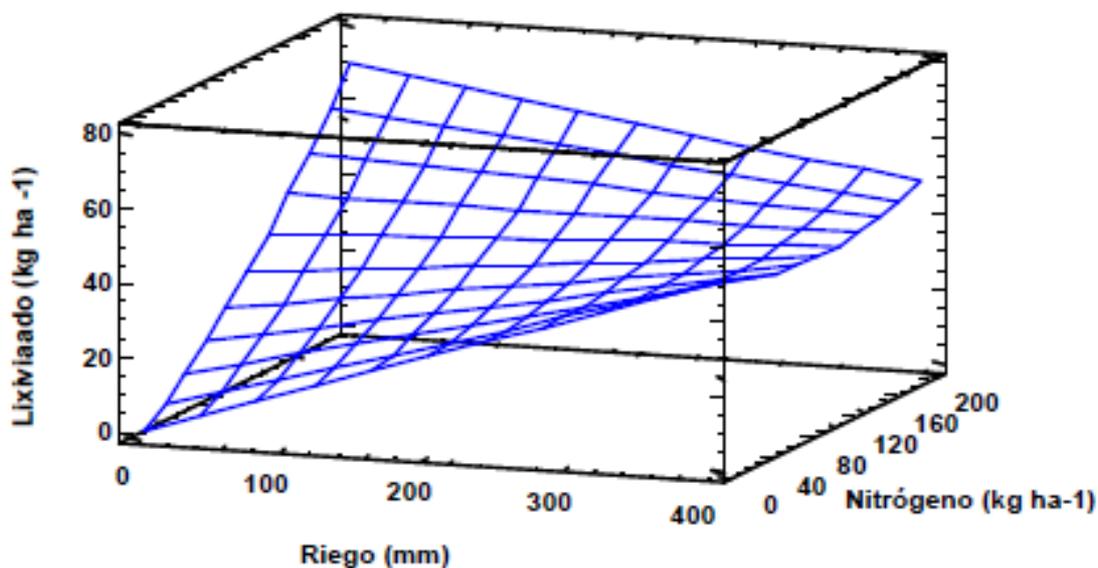


Figura 14. Gráfico de Superficie Caso 3-Cebada.

Caso 4-Cebada. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas <> "CAÑADA", "ALBACETE", "GINETA".

Tabla 13. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Cebada.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_1	0.0696268	0.0138312	5.03403	0.0000
α_2	0.374571	0.0174777	21.4314	0.0000
α_3	0.000288718	0.0000451728	6.3914	0.0000
α_4	0.000349314	0.000101316	3.44777	0.0006
α_5	-0.00115	0.0000550751	-20.8805	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3.85745E6	5	771491.	6660.81	0.0000
Residuo	165051.	1425	115.825		
Total	4.0225E	1430			

R-cuadrada = 95.8968 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95.8853 por ciento

Error estándar del est. = 10.7622

Error absoluto medio = 8.94576

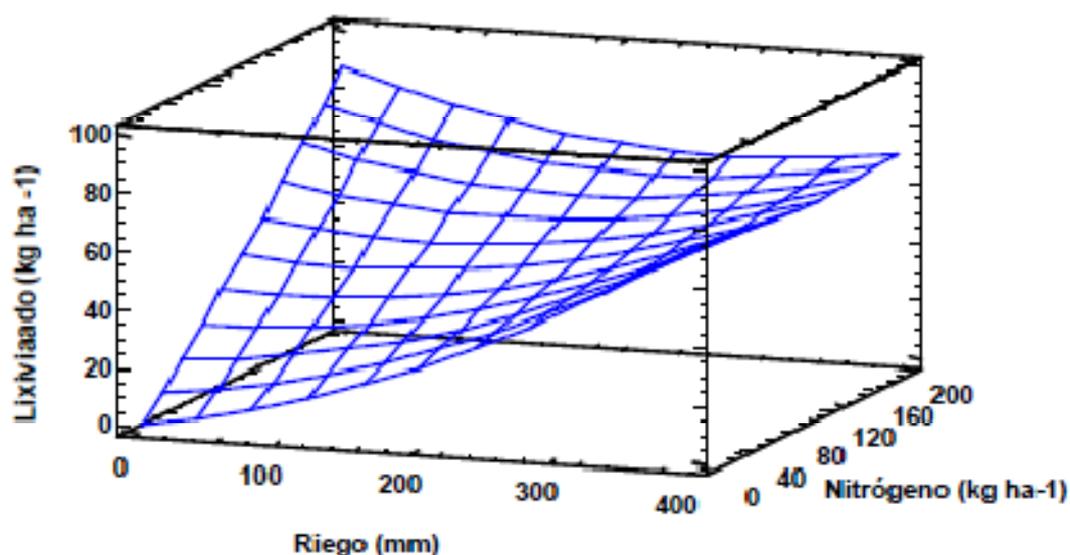


Figura 15. Gráfico de Superficie Caso 4-Cebada.

Caso 5-Cebada. Rendimiento para las estaciones meteorológicas "JARA", "PICAZO" y "SANCHON".

Tabla 14. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5- Cebada.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_0	-2732.32	482.361	-5.66446	0.0000
α_1	45.5136	1.7907	25.4167	0.0000
α_2	71.7157	3.80428	18.8513	0.0000
α_3	-0.0679186	0.00211828	-32.0631	0.0000
α_4	-0.117822	0.00502229	-23.4599	0.0000
α_5	-0.0716592	0.0132246	-5.41862	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1.25857E9	5	2.51715E8	2335.31	0.0000
Residuo	6.33785E7	588	107787.		
Total	1.32195E9	593			

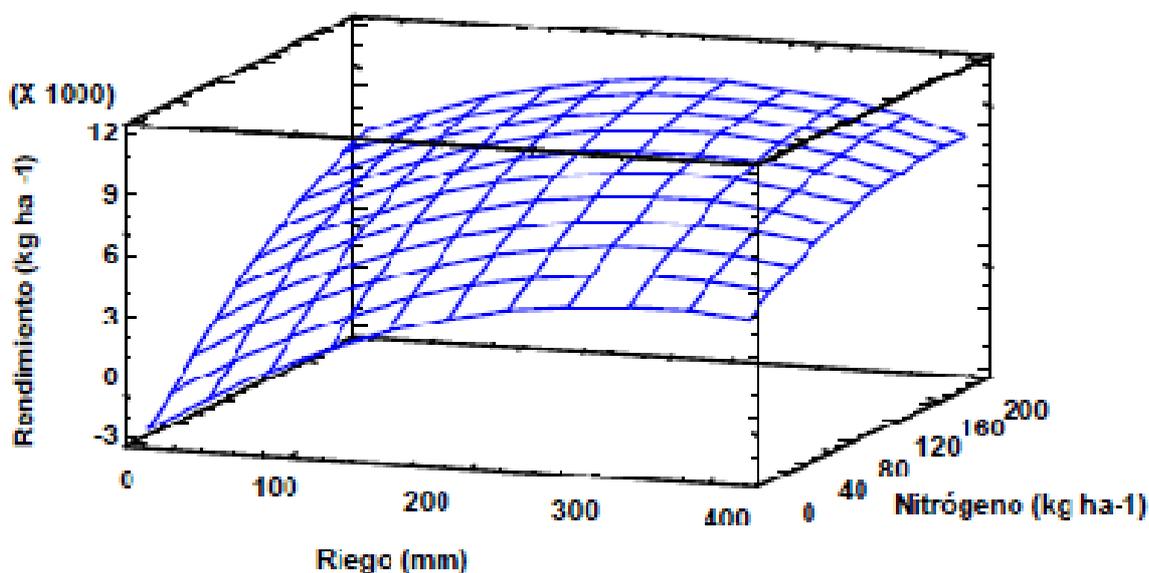


Figura 16. Gráfico de Superficie Caso 5-Cebada.

Caso 6-Cebada. Rendimiento para las estaciones meteorológicas <> "JARA", "PICAZO" y "SANCHON".

Tabla 15. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6- Cebada.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_0	1390.17	293.087	4.74321	0.0000
α_1	33.9013	1.18765	28.5448	0.0000
α_2	41.4054	2.4166	17.1338	0.0000
α_3	-0.0688448	0.00179447	-38.365	0.0000
α_4	-0.128171	0.003917	-32.7217	0.0000
α_5	0.0266125	0.00839769	3.16902	0.0015

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2.91386E9	5	5.82773E8	3079.49	0.0000
Residuo	2.94462E8	1556	189243.		
Total	812429.	1561			

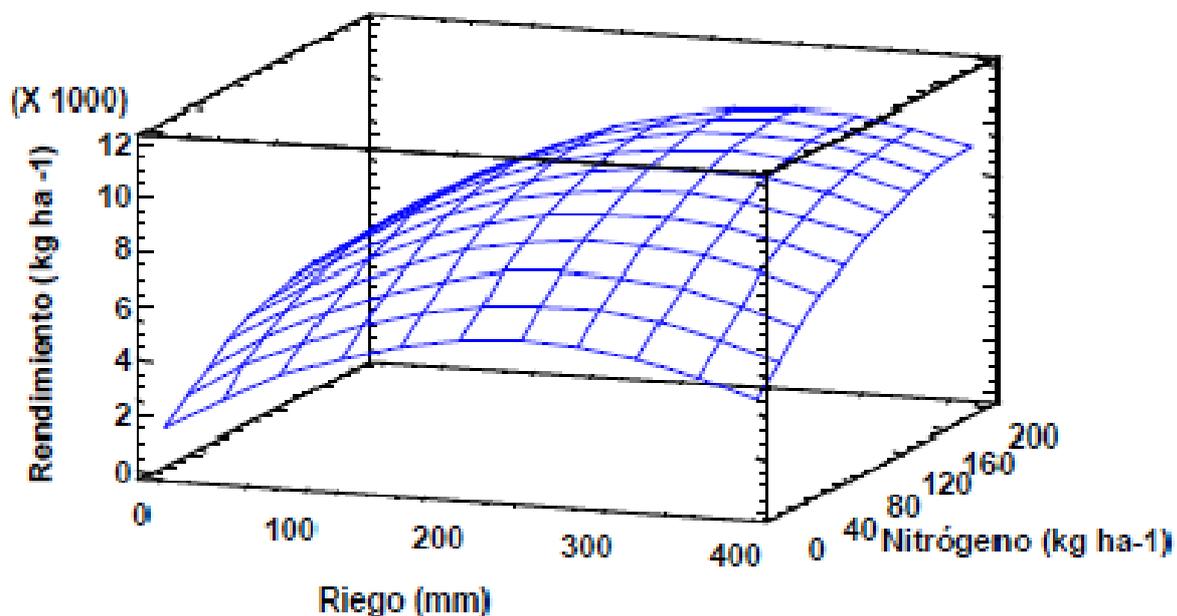


Figura 17. Gráfico de Superficie Caso 6-Cebada.

Finalmente en la Tabla 16 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción ajustadas en Cebada.

Tabla 16. Resumen funciones de producción ajustadas en Cebada

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
α_0	0	0	0	0	-2732.32	1390.17
α_1	-0.0728704	0.0984335	0.0696268	0.12367	45.5136	33.9013
α_2	0.474562	0.356069	0.374571	0.223924	71.7157	41.4054
α_3	0.00078722	0.00018739	0.00028872	0	-0.0679186	-0.0688448
α_4	0.00071283	0.00028955	0.00034931	0.00064943	-0.117822	-0.128171
α_5	-0.00158485	-0.0010784	-0.00115	-0.00088891	-0.0716592	0.0266125

Trigo

Caso 1-Trigo. N-lixiviado en suelo tipo 6461 (Bg)

Tabla 17. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Trigo.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_1	0.102569	0.0460557	2.22706	0.0270
α_2	0.255106	0.0429566	5.9387	0.0000
α_3	0.000471356	0.000207089	2.27611	0.0238
α_4	0.00158775	0.000244719	6.48805	0.0000
α_5	-0.00164072	0.000175313	-9.3588	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	802531.	5	160506.	1595.63	0.0000
Residuo	21526.5	214	100.591		
Total	824058.	219			

R-cuadrada = 97.3877 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.3389 por ciento

Error estándar del est. = 10.0295

Error absoluto medio = 7.82061

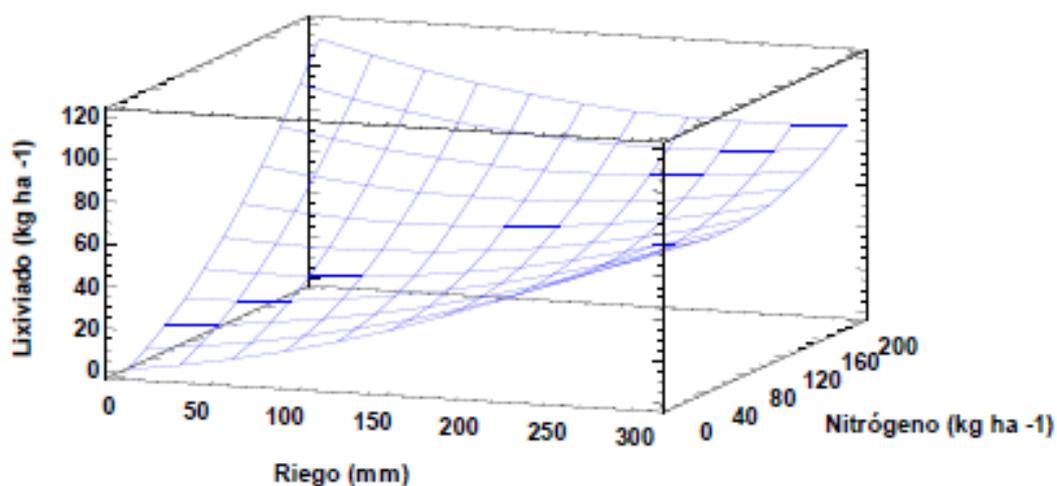


Figura 18. Gráfico de Superficie Caso 1-Trigo.

Caso 2-Trigo. N-lixiviado en suelos \leftrightarrow 6461 (Suelos Bk)

Tabla 18. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Trigo.

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P	
α_1	0.0525347	0.0236433	2.22197	0.0263	
α_2	0.25978	0.021993	11.8119	0.0000	
α_3	0.000759914	0.000104459	7.27473	0.0000	
α_4	0.00170457	0.000119543	14.259	0.0000	
α_5	-0.00189705	0.000090183	-21.0356	0.0000	

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3.40233E6	5	680466.	6239.01	0.0000
Residuo	106012.	972	109.066		
Total	3.50834E6	977			

R-cuadrada = 96.9783 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96.9658 por ciento

Error estándar del est. = 10.4435

Error absoluto medio = 8.48307

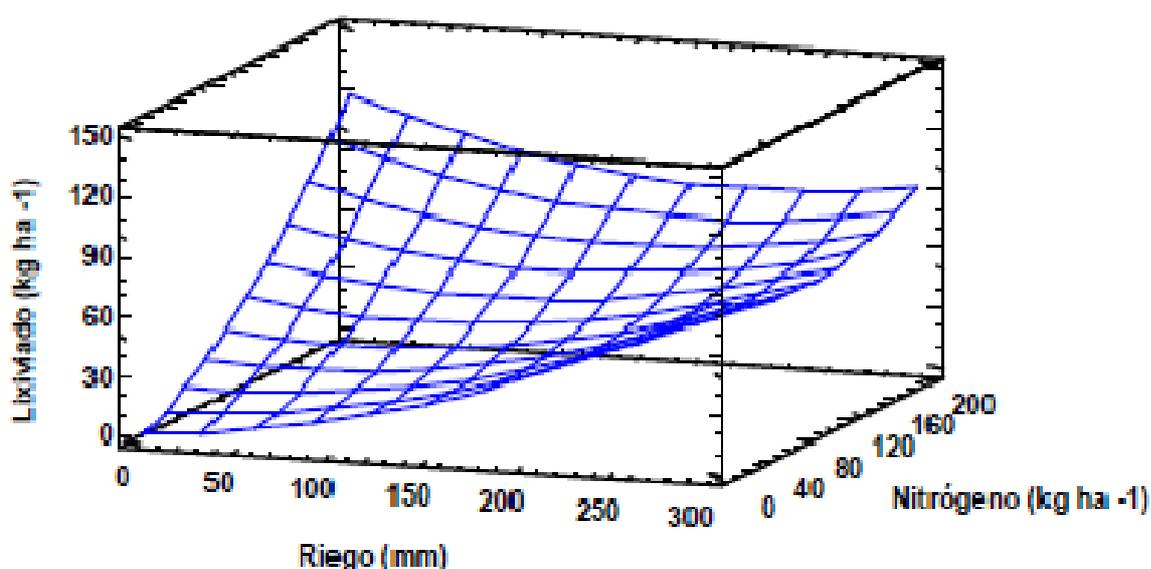


Figura 19. Gráfico de Superficie Caso 2-Trigo.

Caso 3- Trigo. Rendimiento Trigo (homogénea para todo el territorio MOS)

Tabla 19. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Trigo.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_0	1.74766	0.0803379	21.7539	0.0000
α_1	0.0269413	0.000981734	27.4426	0.0000
α_2	0.0381964	0.000773913	49.3549	0.0000
α_3	-0.000065532	0.00000321016	-20.4139	0.0006
α_4	-0.000109037	0.00000372939	-29.2373	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1070.97	4	267.743	2160.73	0.0000
Residuo	147.581	1191	0.123913		
Total	1218.55	1195			

R-cuadrada = 87.8889 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 87.8482 por ciento

Error estándar del est. = 0.352013

Error absoluto medio = 0.270133

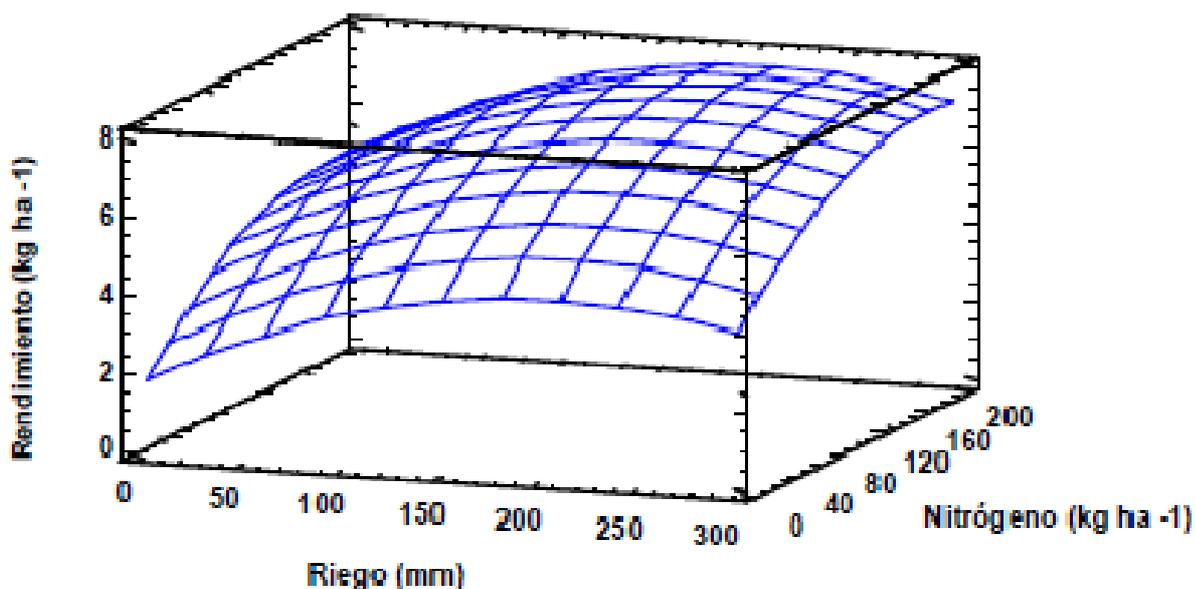


Figura 20. Gráfico de Superficie Caso 3-Trigo.

Finalmente en la Tabla 20 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción ajustadas en Trigo.

Tabla 20. Resumen funciones de producción ajustadas en Trigo

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
α_0	0	0	1.74766
α_1	0.0525347	0.102569	0.0269413
α_2	0.25978	0.255106	0.0381964
α_3	0.00075991	0.00047136	-6.5532E-05
α_4	0.00170457	0.00158775	-0.00010904
α_5	-0.00189705	-0.00164072	0

Maíz

Caso 1-Maíz. N-lixiviado para suelo tipo 6461 (Bg)

Tabla 21. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1- Maíz.

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P	
α_0	87.8104	5.33318	16.4649	0.0000	
α_1	-0.461055	0.0303474	-15.1926	0.0000	
α_2	0.00064088	0.0000470094	13.633	0.0000	
α_3	0.708534	0.0527853	13.4229	0.0006	
α_4	0.0013782	0.0000873632	15.7756	0.0000	
α_5	-0.00154368	0.0000857334	-18.0056	0.0000	

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	492736.	5	98547.2	540.64	0.0000
Residuo	73275.8	402	182.278		
Total	566012.	407			

R-cuadrada = 87.054 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 86.893 porciento

Error estándar del est. = 13.501

Error absoluto medio = 10.4068

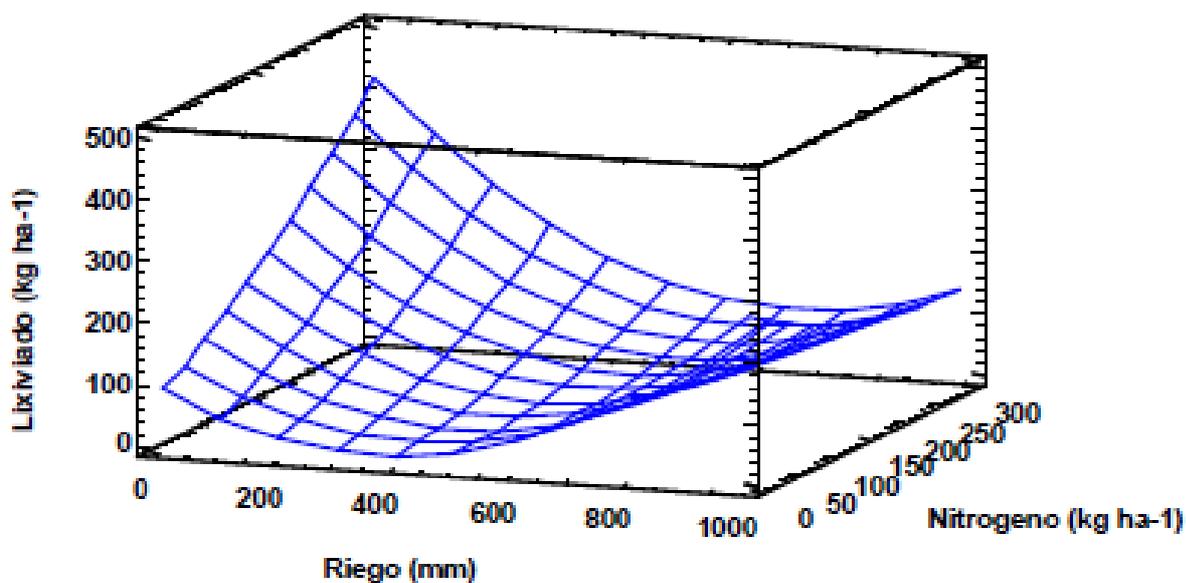


Figura 21. Gráfico de Superficie Caso 1-Maíz.

Caso 2-Maíz. N-lixiviado en suelos \diamond 6461 (Suelos Bk)

Tabla 22. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2- Maíz.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_0	56.9529	3.03078	18.7915	0.0000
α_1	-0.38434	0.0114176	-33.6619	0.0000
α_2	0.000576957	0.0000168785	34.1829	0.0000
α_3	0.736404	0.0220333	33.4224	0.0006
α_4	0.000964912	0.0000420545	22.9443	0.0000
α_5	-0.00148044	0.0000324312	-45.6485	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2.32788E6	5	465575.	2461.68	0.0000
Residuo	345350.	1826	189.129		
Total	2.67323E6	1831			

R-cuadrada = 87.0811 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 87.0458 porciento

Error estándar del est. = 13.7524

Error absoluto medio = 10.7642

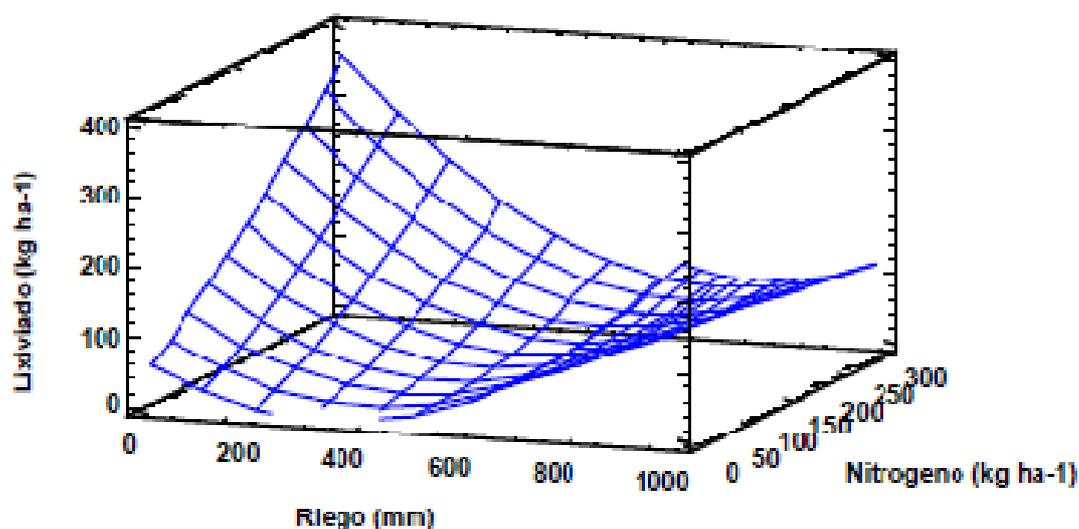


Figura 22. Gráfico de Superficie Caso 2-Maíz.

Caso 3-Maíz. N-lixiviado en estaciones meteorológicas "ALBACETE", "GINETA", "CAÑADA", "JARA".

Tabla 23. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3- Maíz.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_0	57.3226	3.60475	15.902	0.0000
α_1	-0.387603	0.0178117	-21.7612	0.0000
α_2	0.000581039	0.0000269881	21.5295	0.0000
α_3	0.767351	0.0301839	25.4225	0.0006
α_4	0.0010964	0.0000550201	19.9273	0.0000
α_5	-0.00157063	0.000046667	-33.6562	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1.38522E6	5	277043.	1415.24	0.0000
Residuo	215333.	1100	195.757		
Total	1.60055E6	1105			

R-cuadrada = 86.5463 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 86.4851 por ciento

Error estándar del est. = 13.9913

Error absoluto medio = 10.3438

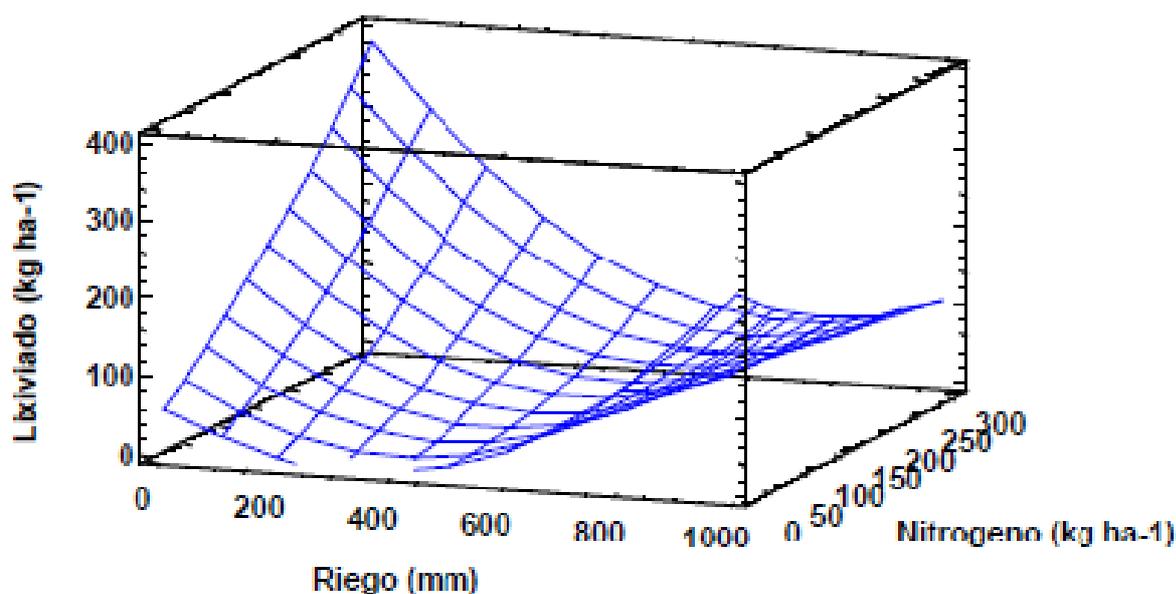


Figura 23. Gráfico de Superficie Caso 3-Maíz.

Caso 4-Maíz. N-lixiviado en estaciones meteorológicas <> "ALBACETE", "GINETA", "CAÑADA", "JARA".

Tabla 24. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Maíz.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_0	68.0054	3.06939	22.156	0.0000
α_1	-0.378063	0.0123214	-30.6834	0.0000
α_2	0.000540166	0.0000182732	29.5606	0.0000
α_3	0.672516	0.0231707	29.0244	0.0000
α_4	0.000980542	0.0000440486	22.2604	0.0000
α_5	-0.00136373	0.0000343914	-39.6533	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2.72391E6	5	544782.	2123.36	0.0000
Residuo	573169.	2234	256.566		
Total	3.29708E6	2239			

R-cuadrada = 82.6158 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 82.5769 porciento

Error estándar del est. = 16.0177

Error absoluto medio = 12.2034

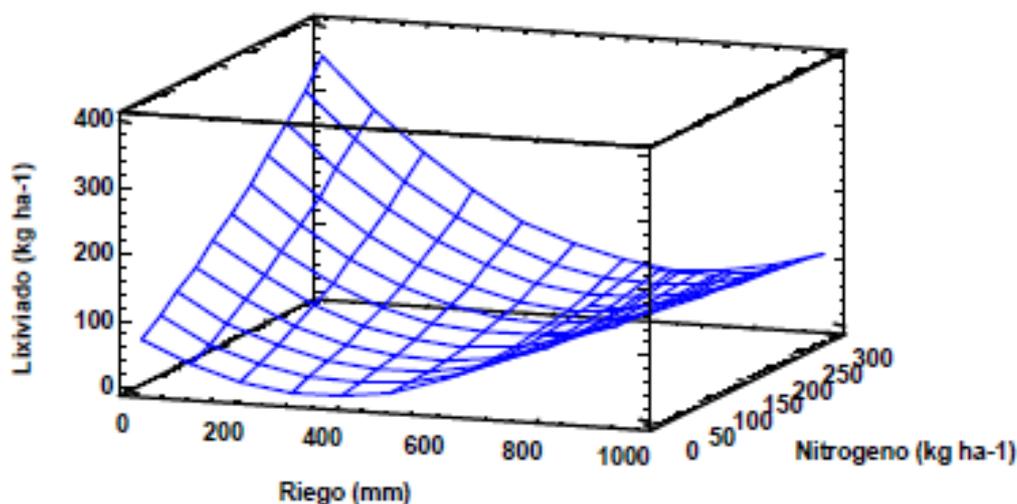


Figura 24. Gráfico de Superficie Caso 4-Maíz.

Caso 5-Maíz. Rendimiento en estación meteorológica “MOTILLEJA”.

Tabla 25. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5- Maíz.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
α_1	0.0217484	0.000828805	26.2406	0.0000
α_2	-0.0000239939	0.00000143199	-16.7556	0.0000
α_3	0.0147487	0.000882048	16.721	0.0000
α_4	-0.0000802387	0.00000245165	-32.7285	0.0000
α_5	0.0000665996	0.00000191909	34.7037	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	49724.1	4	9944.82	69695.09	0.0000
Residuo	57.5042	403	0.14269		
Total	49781.6	408			

R-cuadrada = 99.8845 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.8833 porciento

Error estándar del est. = 0.377744

Error absoluto medio = 0.299357

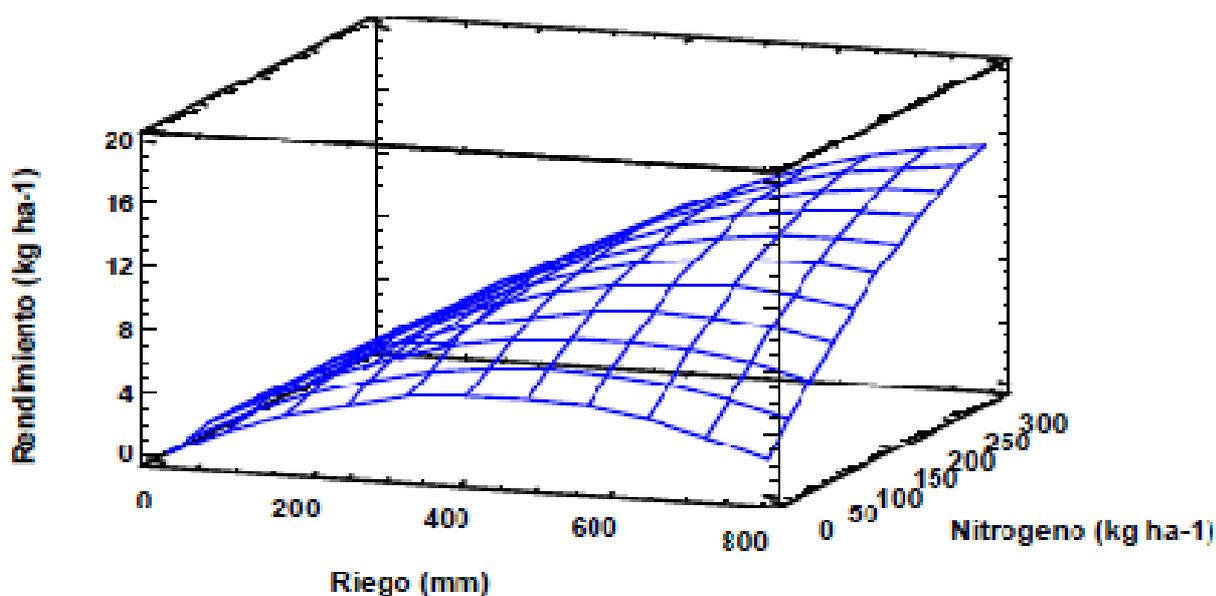


Figura 25. Gráfico de Superficie Caso 5-Maíz.

Caso 6-Maíz. Rendimiento para estaciones meteorológicas <>"MOTILLEJA"

Tabla 26. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6- Maíz.

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico	
α_0	-0.41267	0.10421	-3.96	0.0001
α_1	0.0217958	0.000442222	49.287	0.0000
α_2	-0.0000218739	6.52075E-7	-33.5451	0.0000
α_3	0.0168206	0.00081341	20.6792	0.0000
α_4	-0.0000883062	0.00000154666	-57.0949	0.0000
α_5	0.0000554404	0.0000012057	45.982	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	17380.7	5	3476.15	13358.05	0.0000
Residuo	475.177	1826	0.260228		
Total	17855.9	1831			

R-cuadrada = 97.3388 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.3315 porciento

Error estándar del est. = 0.510126

Error absoluto medio = 0.411196

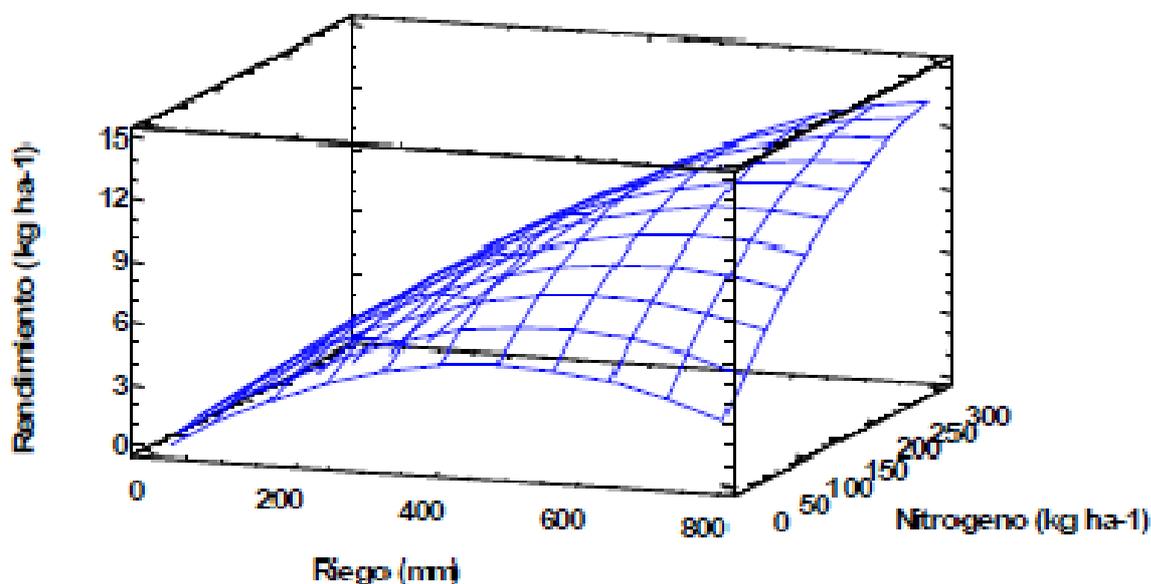


Figura 26. Gráfico de Superficie Caso 6-Maíz.

Finalmente en la Tabla 27 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción ajustadas en Trigo.

Tabla 27. Resumen funciones de producción ajustadas en Maíz

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
α_0	87.8104	56.9529	57.3226	68.0054	0	-0.41267
α_1	-0.461055	-0.38434	-0.387603	-0.378063	0.0217484	0.0217958
α_2	0.00064088	0.00057696	0.00058104	0.00054017	-2.3994E-05	-2.1874E-05
α_3	0.00078722	0.00018739	0.00028872	0	-0.0679186	0.0688448
α_4	0.00071283	0.00028955	0.00034931	0.00064943	-0.117822	-0.128171
α_5	-0.00158485	-0.0010784	-0.00115	-0.00088891	0.0716592	0.0266125

A.4. Síntesis y Conclusiones

Este Capítulo tenía por objeto el análisis del rendimiento de los cultivos. Para ello encontramos que las funciones de producción son un método que nos permite encontrar la relación existente entre rendimiento del cultivo y la cantidad de inputs utilizada, de forma que dicha relación puede ser empleada posteriormente en otros procedimientos del proyecto. Se ha analizado el estado del arte al respecto y encontramos distintos tipos funcionales de funciones de producción, entre los que se ha seleccionado el tipo cuadrático. Los inputs seleccionados para el ajuste de las funciones han sido el agua de riego y la fertilización nitrogenada. A la hora de buscar pares de valores rendimiento vs input, encontramos en la literatura que una forma de obtener suficiente información es el empleo de modelos de simulación agronómica. Dado que las zonas de estudio son grandes, no podemos adoptar una única función de producción genérica para todo el estudio por lo que se decide emplear un modelo distribuido. El modelo EPIC y su versión distribuida GEPIC permiten aplicar simulaciones extendidas a la totalidad del territorio. Los resultados son regionalizados buscando zonas con diferentes respuestas en función del factor clima, suelo y topográfico (altitud). En aquellos casos en los que encontramos diferencias significativas en la respuesta del cultivo se preparan funciones de producción específicas por zonas. Además el modelo evalúa el lixiviado de nitratos por percolación profunda por lo que también es posible ajustar funciones de producción de N-lixiviados o funciones de contaminación.

La metodología descrita se aplica al sistema de la Mancha Oriental (MOS) para los cultivos Trigo, Cebada y Maíz, obteniendo las correspondientes funciones de rendimiento y de lixiviado regionalizadas.

B. Aplicación a escenarios de cambio climático.

B.1. Revisión y Análisis de Metodologías

B.1.1. Objetivos

Ante los posibles efectos del cambio climático, cada vez se requieren más herramientas de simulación que integren la incertidumbre del cambio climático sobre la planificación y gestión de los recursos hídricos. El uso de los modelos hidroeconómicos de forma distribuida puede simplificar la toma de decisiones ante políticas regionales que se adapten a las perspectivas de disponibilidad, maximizando los beneficios sociales y minimizando los costes ambientales. Se podrán tomar las decisiones más precisas ante escenarios futuros de disponibilidad hídrica:

- Acciones sobre la gestión del recurso hídrico: inversiones en infraestructura, modificar las reglas de operación en embalses, etc.
- Acciones sobre la demanda: mejorar la eficiencia en la distribución, la elección de cultivos, extensión de los mismos, dosis de fertilización y riego. Políticas sobre la ordenación del territorio, tipos de suelo, etc.
- Optimización en el uso del agua: suministros urbanos, industriales, agrícolas, reutilización, etc.

Este capítulo del proyecto tiene por objeto analizar las necesidades hídricas de los cultivos bajo los escenarios de cambio climático.

Para ello se analiza previamente el estado del arte en materia de cálculo de necesidades hídricas, haciendo especial énfasis en los métodos recomendados por la FAO en su documento FAO-56 (Allen et al, 1998) de la serie de riego y drenaje denominado “Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.”

Seguidamente se analizará el efecto que tiene el cambio climático sobre la fisiología de los cultivos y como afecta esto al uso del agua y a las necesidades hídricas. Ninguno de los métodos

recomendados en el documento FAO-56 están adaptados para el análisis de las necesidades de agua de los cultivos bajo cambio climático por lo que recurriremos a los modelos de simulación descritos y utilizados en el Capítulo anterior. Análogamente a como se hizo allí, se ejecutarán distintas series de simulaciones con el objeto de obtener funciones de producción y lixiviado en situación de cambio climático. Estas funciones de producción pueden ser comparadas con las obtenidas en el Capítulo A para el clima actual.

B.1.2. Necesidades hídricas de los cultivos. Métodos FAO-56. El modelo CROPWAT.

La metodología más ampliamente difundida en la determinación de las necesidades hídricas podemos encontrarla en la publicación FAO-56 de la serie de riego y drenaje denominada “Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.”. Allí se establecen los pasos para obtener los requerimientos hídricos de un cultivo. La aplicación práctica del modelo puede llevarse a la práctica empleando la aplicación informática CROPWAT (Smith, 1992).

Evapotranspiración de referencia ETo

El primero paso en la determinación de las necesidades hídricas de las plantas es la obtención de la evapotranspiración de un cultivo denominado de referencia. Allen et al, (1998) lo definen como un cultivo hipotético con una altura de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 m·s⁻¹, un albedo de 0,23 asemejándose su evapotranspiración en gran medida a una extensa superficie de pasto verde, de altura uniforme con crecimiento activo y con suficiente aporte de agua. Como el cultivo está suficientemente abastecido de agua, el factor suelo no es influyente en ningún aspecto. Al emplear de forma generalizada el mismo cultivo de referencia en la estimación de la ETo únicamente influyen parámetros climáticos a medir en cada lugar. De esta forma es posible determinar de forma homogénea en cualquier lugar geográfico la ET de un cultivo hipotético o de referencia.

Para la estimación de la ETo analizaron los distintos métodos existentes y establecieron como método más adecuado el denominado método combinado o método de Penman-Monteith.

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

donde U_2 = velocidad del viento a 2 m de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); T = temperatura media diaria del aire ($^{\circ}\text{C}$), Δ = pendiente de la curva de saturación de vapor ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); R_n radiación neta en la superficie de cultivo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$); G = densidad de flujo de calor del suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$); e_s = presión de vapor de saturación (kPa); e_a = presión real de vapor (kPa); $(e_s - e_a)$ = déficit de saturación de presión de vapor (kPa); γ = constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Evapotranspiración del cultivo (ETc)

El segundo paso es convertir la evapotranspiración del cultivo de referencia en evapotranspiración de un cultivo real ó ETc. La ETc (mm) es la evapotranspiración de un cultivo concreto bien fertilizado, libre de enfermedades, bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, y que alcanzan la plena producción en las condiciones actuales del clima.

Experimentalmente, por ejemplo mediante el empleo de lisímetros en campo, debe determinarse la relación entre ETc / ET_o. El resultado son los denominados coeficientes de cultivo (Kc), los cuales se utilizan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$ETc = Kc \cdot ET_o$$

El coeficiente de cultivo Kc (Doorenbos and Pruitt, 1977) integra las características principales que distinguen al cultivo del cultivo de referencia, siendo la ET_o un indicador de la demanda del clima:

- Altura del cultivo. Afecta principalmente a la resistencia aerodinámica (r_a) de la ecuación de Penman Monteith y a la transferencia turbulenta de vapor desde el cultivo a la atmósfera.
- Albedo del complejo suelo-cultivo (reflexión de la radiación). El albedo afecta básicamente a la fracción de suelo cubierto por el cultivo y la superficie de suelo que es desecada por lo que afecta a la radiación neta (R_n), fuente energética de la ET.

- Resistencia de la cubierta vegetal a transferir vapor a la atmósfera. Básicamente depende de la superficie y foliar y por tanto de la densidad de estomas, edad, condición y control estomático de las mismas. Influye por tanto en la resistencia superficial (r_s).
- Evaporación desde el suelo. Depende básicamente de la superficie sombreada por el cultivo o expuesta a la radiación solar.

El coeficiente K_c evoluciona con el desarrollo del cultivo, siguiendo una curva típica:

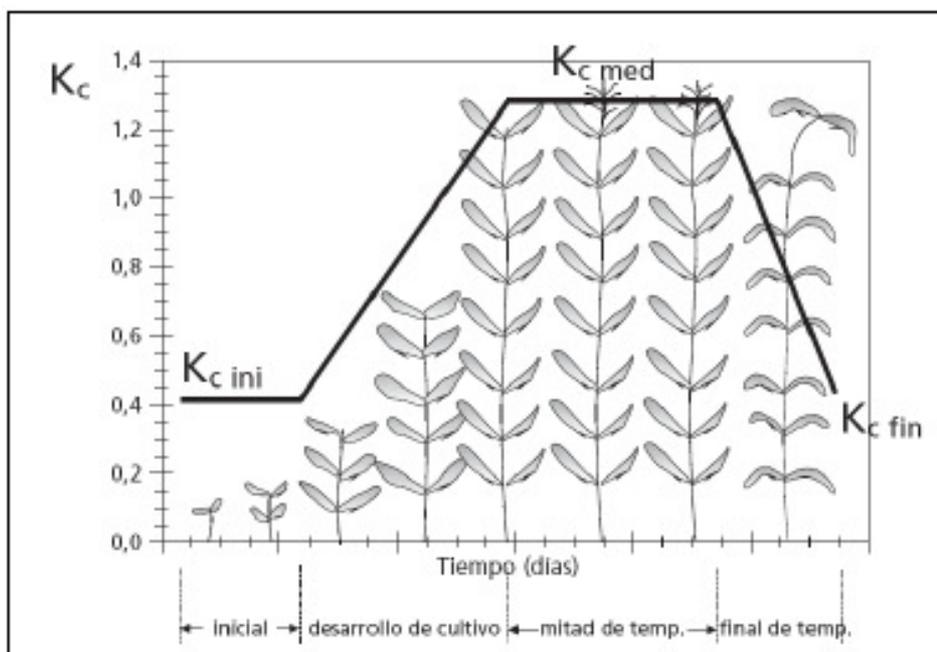


Figura 27. Evolución del K_c a lo largo de la vida del cultivo.

Disponibilidad de agua del suelo

Agua total disponible (TAW)

El agua total disponible es la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona de raíces. TAW es la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y en punto de marchitez permanente:

$$TAW = 1000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \cdot Z_r$$

donde TAW = agua total disponible del suelo en la zona de las raíces (mm); FC = contenido de agua a capacidad de campo ($m^3 \cdot m^{-3}$); WP = contenido de agua en el punto de marchitez permanente ($m^3 \cdot m^{-3}$); Z_r = profundidad de las raíces (m).

Agua fácilmente disponible (RAW)

A medida que disminuye el contenido de agua del suelo, el agua se vuelve más fuertemente ligada a la matriz del suelo y por lo tanto es más difícil de extraer. La fracción de TAW que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico es el agua del suelo disponible:

$$RAW = p \cdot TAW$$

Donde p = fracción de TAW que pueden ser extraída de la zona de las raíces antes de llegar a una situación de estrés hídrico.

Coefficiente de estrés hídrico (K_s)

El contenido de agua en la zona radicular también se puede expresar a través del nivel de agotamiento del agua en la zona radicular respecto de la capacidad de campo (D_r). A capacidad de campo, el agotamiento es $D_r=0$. A medida que se va consumiendo agua del suelo, D_r va creciendo hasta llegar a ser $D_r= RAW$. Estamos en el límite antes de iniciarse el estrés hídrico.

En ese momento $K_s= 1$. Si se sigue perdiendo agua, $D_r.> RAW$, y entonces K_s es igual a:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW}$$

donde K_s = factor adimensional de reducción de la transpiración dependiente del agua disponible del suelo; D_r = agotamiento en la zona radicular (mm).

Evapotranspiración real ($ET_{c,adj}$)

Para cada día, la evapotranspiración real ($ET_{c,adj}$) se encuentra de la siguiente manera:

$$ET_{c,adj} = \begin{cases} 0; \theta_i \leq \theta_{WP} \\ ET_c \cdot K_s; \theta_{WP} < \theta_i \leq \theta_{RAW} \\ ET_c; \theta_i \geq \theta_{RAW} \end{cases}$$

donde θ_{RAW} = contenido en humedad del suelo correspondiente a RAW ; θ_i = contenido real de humedad del suelo ($m^3 \cdot m^{-3}$).

Balance de humedad en el suelo

La estimación de K_s requiere un cálculo del balance hídrico diario para la zona radicular. El balance de agua en el suelo se expresa en términos de altura de agua. Las lluvias, el riego, y el

ascenso capilar del agua subterránea hacia la zona de la raíz aportan agua y disminuyen el agotamiento. Las pérdidas por evapotranspiración y percolación eliminan agua de la zona de las raíces y aumentan el agotamiento.

La precipitación efectiva ($P_{e,i}$) puede calcularse por distintos métodos. Por ejemplo el método del SCS (SCS, 1993). Debido a que el nivel freático habitualmente está lejos de la zona radicular, el ascenso capilar suele despreciarse. El balance hídrico diario (Allen et al, 1998), expresado en términos de agotamiento al final del día es:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_{e,i} - I_i + ET_{c,adj,i} + DP_i$$

donde $D_{r,i}$ = agotamiento en la zona radicular al final del día i (mm), $D_{r,i-1}$ = agotamiento en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ (mm), $P_{e,i}$ = precipitación efectiva en el día i (mm), I_i = lámina neta de riego en el día i (mm); $ET_{c,adj,i}$ = evapotranspiración real en el día i (mm); DP_i = pérdida de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i (mm).

Asignación de riego

Cuando el agotamiento en la zona radicular es $D_{r,i-1} \geq RAW$, se precisa asignar una cierta cantidad de agua de riego I_i para evitar el estrés hídrico. La lámina de riego neta en el día i es igual a la $D_{r,i-1}$, de forma que el contenido de agua en el suelo es repuesto a capacidad de campo.

Efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento

El modelo funcional que (Stewart et al., 1975; Doorenbos and Kassam, 1979) describe la relación entre el estrés hídrico y el rendimiento esperado es lineal. El resultado en descenso del rendimiento estacional puede ser estimado a partir del empleo de factores de respuesta al estrés hídrico con la ecuación:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{ET_{c,adj}}{ET_c} \right)$$

Donde Y_a/Y_m = rendimiento relativo; $1-(Y_a/Y_m)$ = descenso del rendimiento relativo; $ET_{c,adj}/ET_c$ = evapotranspiración relativa; $1-(ET_{c,adj}/ET_c)$ estrés hídrico o déficit de evapotranspiración relativo.

El factor de respuesta al estrés hídrico para un ambiente determinado es cuantificado mediante el factor de estrés K_y .

El modelo CROPWAT

El método descrito puede ser aplicado directamente a partir del empleo de la aplicación informática CROPWAT (Smith, 1992), la cual nos permite realizar una programación del riego en función de los datos climáticos y de las propiedades hidráulicas del suelo. Los datos necesarios para alimentar el modelo son:

Table 1 – Inputs required by CROPWAT	
Parameter or variable	Unit
Location data	
Country	
Station	
Latitude	°
Longitude	°
Altitude	m
Monthly climatic data	
Mean maximum temperature	°C
Mean minimum temperature	°C
Mean air humidity	%
Mean wind speed	$m s^{-1}$
Precipitation	mm
Soil data	
Total available soil water	$mm m^{-1}$ depth
Maximum rain infiltration rate	$mm d^{-1}$
Maximum rooting depth	m
Initial soil water depletion	%
Crop data	
Planting date	day/month
Harvesting date	day/month
Irrigation	
Date	day/month
Amount	mm

Figura 28. Datos necesarios para alimentar el modelo CROPWAT.

B.1.3. Modelos de simulación de cultivos vs CROPWAT.

Los modelos que simulan los efectos del estrés hídrico sobre el rendimiento de los cultivos son una adecuada herramienta para el manejo del riego. Entre los modelos que podemos emplear para ello debemos distinguir entre modelos de simulación del crecimiento, capaces de simular a su vez los principales procesos implicados como el aumento de área foliar, la producción de biomasa, la

fotosíntesis, la partición de fotoasimilados, etc., de aquellos que no simulan explícitamente el desarrollo del cultivo.

En el Capítulo A se realizó un profundo estudio acerca de los modelos de simulación de sistemas agronómicos. La mayoría de estos modelos son mecanicistas y se basan en la descripción de principios científicos establecidos mediante ecuaciones matemáticas que simulan los procesos que tienen lugar en el sistema simulado. Estos modelos diferencian entre el efecto que el estrés hídrico tiene en los diferentes procesos simulados, diferenciando así el efecto sobre la fotosíntesis, del efecto sobre el índice de cosecha o el desarrollo del área foliar.

CROPWAT es un modelo específico para el manejo del riego, por lo que el desarrollo del cultivo se evalúa en base a una curva de K_c empírica que el usuario debe introducir previamente (Doorenbos and Pruitt, 1977). El efecto del estrés hídrico en el cultivo se evalúa a partir de los factores de respuesta (Stewart et al., 1975) derivados de los experimentos de Doorenbos y Kassam (1979). Por tanto no es capaz de obtener la biomasa que el cultivo genera, al no disponer de un módulo de crecimiento.

En la literatura podemos encontrar algunos ejemplos en los que se comparan el funcionamiento de CROPWAT frente a otros modelos de simulación de tipo mecanicista más complejos. En Kang et al. (2009) comparan la ET del cultivo que se obtiene de la aplicación de CROPWAT frente a dos modelos de simulación, MODWht y CERES. Cavero et al. (2000) comparan el resultado de emplear EPIC y CROPWAT en el cálculo de la reducción del rendimiento en maíz por estrés hídrico.

Finalmente, si a esto le añadimos que en nuestro caso deseamos simular los efectos del cambio climático en las necesidades hídricas de los cultivos, nos topamos con la obligatoriedad de utilizar un modelo de simulación del crecimiento que incluya simulación de la fotosíntesis. Esto nos va a permitir modificar la concentración de CO_2 y evaluar su efecto sobre el rendimiento, debiendo descartar el uso de CROPWAT.

B.1.4. Efectos del cambio climático sobre los cultivos.

La tercera revisión del informe del Panel Intergubernamental por el cambio climático (IPCC 2001) concluye que las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la actividad humana aumentará la temperatura global causando el conocido “calentamiento global”. Las consecuencias

del calentamiento global tienen un impacto considerable en la agricultura. Un aumento del CO₂ atmosférico, un aumento de las temperaturas medias, una variación en la cantidad y la intensidad de las lluvias en los periodos de crecimiento vegetativo afectarán la fisiología de los principales cultivos. La capacidad de la atmósfera a albergar agua aumenta exponencialmente con la temperatura. Por lo tanto, las tasas de evaporación y transpiración aumentarán. El aumento en la temperatura también afectará a los cultivos aumentando la duración del periodo de crecimiento (Alward et al. 1999) y avanzando la floración en primavera (Mones et al, 2001).

Los aumentos en la temperatura previstos y los cambios en los patrones de lluvia disminuirán la humedad del suelo, lo que a priori producirá un descenso en el rendimiento de los cultivos y un aumento en la demanda de riego. Estos efectos serán directos en los cultivos de secano e indirectos para los cultivos de regadío, ya sea por el descenso de los niveles piezométricos (disminución y salinización de las reservas de acuíferos, Zhou et al, 2010) o por el descenso en el agua almacenada y, por consiguiente en las dotaciones agrícolas.

Según el IPCC 2007, el hábitat potencial para los diferentes cultivos tenderá a expandirse hacia latitudes norte en el hemisferio norte. En Europa, se producirá un aumento del rendimiento de los cultivos en las zonas del norte, mientras que en el sur las tendencias dependerán en gran medida del cultivo, del ecosistema y del escenario de cambio climático simulado.

En la literatura se analizan los impactos que el cambio climático puede tener sobre el rendimiento de los cultivos en distintas zonas del mundo. En general suelen coincidir en que se producirá un descenso de la producción en condiciones de secano cuando no se tiene en cuenta el incremento de la concentración de CO₂, sin embargo en aquellos escenarios de emisiones en donde se simula con estos incrementos, parece compensar el efecto negativo de las variables climáticas futuras. En regadío se suelen producir siempre incrementos. (Chavas et al., 2009); (Guo et al.,2010). Algunos de estos estudios son específicos de la Península Ibérica, como el de Mínguez et al. (2004).

Efecto del incremento del CO₂ en los cultivos

El efecto del incremento de la concentración de CO₂ atmosférico ha sido ampliamente estudiado en la literatura. En 2002 Tubiello y Ewert realizan una profunda revisión del estado del arte en la materia y ya encuentran aproximadamente 40 referencias, tal y como podemos ver en la Figura 29.

Table 1
Example of studies in which crop simulation models were used to predict effects of elevated CO₂ on wheat

Study/Model	Country/Region ^a	Reference
<i>Impact assessment studies</i>		
AFRCWHEAT2	United Kingdom, France	Semenov et al. (1993)
CropSyst	Italy	Tubiello et al. (2000)
CERES	Argentina	Magrin et al. (1997)
	Bangladesh	Karim et al. (1996)
	Bulgaria	Alexandrov and Hoogenboom (2000)
	Canada	Brklacich and Stewart (1995)
		El Maayar et al. (1997)
	China	Shi et al. (2001)
	Commonwealth of Independent States	Menzhulin et al. (1995)
	India	Lal et al. (1998)
	France	Delecotte et al. (1995)
	Romania	Cuculeanu et al. (1999)
	Uruguay, Argentina	Baethgen and Magrin (1995)
	USA	Adams et al. (1990)
		Tubiello et al. (2002)
EPIC	USA	Easterling et al. (1992a)
		Easterling et al. (1992b)
		McKenney et al. (1992)
		Easterling et al. (1993)
		Brown and Rosenberg (1999)
		Brown et al. (2000)
		Easterling et al. (2001)
EuroWheat	Europe	Harrison and Butterfield (1996)
GAEZ	Global	Fischer et al. (2001)
SUCROS87	Europe	Nonhebel (1996)
WOFOST	Europe	Wolf (1993)
APSIM	Australia	Reyenga et al. (1999)
<i>Other studies^b</i>		
AFRCWHEAT2, LINTULCC2, Sirius	Spain	Ewert et al. (2002)
AFRCWHEAT2, AFRCWHEAT3S	United Kingdom	Porter et al. (1995)
AFRCWHEAT2, CERES, NWHEAT, Sirius, SOILN	United Kingdom, Spain	Semenov et al. (1996), Wolf et al. (1996)
AFRCWHEAT2-03, LINTLCC	Europe	van Oijen and Ewert (1999)
CENTURY	USA	Paustian et al. (1996)
CERES	USA	Rosenzweig and Tubiello (1996)
CERES, EPIC, Steward and Sinclair models	Canada	Touré et al. (1995)
CLIMCROP	Denmark	Olesen et al. (2000)
EPIC	USA	Stöckle et al. (1992)
		Brown and Rosenberg (1997)
SOIL/SOILN	USA	Eckersten et al. (2001)
Wheat model	Sweden	
	Australia	Wang and Connor (1996)

^a Simulations were performed either for selected sites or entire regions, or countries.

^b Studies with more focus on sensitivity analysis (e.g., model components, input data), model inter-comparison etc.

Figura 29. Análisis del efecto del incremento del CO₂ en la atmósfera.

Las concentraciones de CO₂ estimulan la fotosíntesis, sobre todo en cultivos C3, ya que la ribulosa 1-5 bifosfato carboxilasa/oxigenasa del ciclo de Calvin, no está saturada de CO₂ a las concentraciones actuales y porque el CO₂ inhibe la fotorespiración (Bowes, 1991). El alto contenido en CO₂ disminuye la apertura estomática reduciendo la tasa de transpiración por unidad de hoja.

En general parecen coincidir en que, en condiciones de no estrés, una concentración de 550 ppm de CO₂, aumentaría la producción de los principales cultivos C3 entre un 10-20% y C4 entre un 0-

10% respecto a la concentración media actual (IPCC, 2007). Sin embargo, este aumento será diferente según el cultivo y la zona de cultivo.

A partir de ensayos FACE (“Free air CO₂ enrichment”) realizados para evaluar la respuesta de un cultivo en términos de rendimiento, teniendo en cuenta el entorno de cultivo (Ainsworth et al, 2008), dan como resultado que los efectos del CO₂ dependen de los niveles de agua y nutrientes (Derner et al, 2003).

Guo et al. (2010) encuentran incrementos de rendimiento del 9.8% y 3.2% en trigo y maíz respectivamente si no tiene en cuenta el incremento de CO₂, y del 38% y 12% si cuando tiene en cuenta las emisiones de CO₂ (600 ppmv). Chavas et al (2008) un 18.6% en maíz y un 24.9% en trigo de invierno teniendo en cuenta la fertilización carbónica, pero disminuyen entre un 2.5% y un 12% cuando no se tiene en cuenta.

Modelos de simulación y estudios del efecto del cambio climático. El modelo EPIC.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la única forma de evaluar los impactos del cambio climático (considerando el CO₂) en los cultivos es a través de modelos de simulación. En la literatura podemos encontrar cientos de referencias en este sentido, pues todos los estudios implican la utilización de un modelo. Dado que nosotros empleamos el modelo EPIC en su versión distribuida GEPIC por los motivos esgrimidos en el Capítulo A, nos centraremos en él.

Así podemos encontrar estudios en distintas zonas del mundo, en distintos climas, para múltiples cultivos, incluso comparando entre distintos modelos. Destacamos Adejuwon (2005), Brown y Rosenberg (1999), Brown et al.(2000), Dhakhwa y Campbell (1998), Díaz et al (1997), Easterling et al.(1992a, 1992b, 1992c, 1992d, 1993, 1996, 1997, 1998, 2001, 2003), Eheart y Tornil (1999), Faeth y Greenhalgh (2002), Izaurralde et al. (2002), Lee et al. (1999), Mckenney et al. (1992), Mearns et al. (1999, 2001), Mestre-Sanchís y Feijóo-Bello (2009), Phillips et al.(1996), Rosenberg et al. (1992), Sands y Edmonds (2005), Schneider et al.(2000), Steduto et al. (1995), Stockle et al. (1992), Thomson et al. (2002, 2005a, 2005b, 2005c, 2005d), Touré et al(1995).

Los cultivos más estudiados han sido el trigo, el maíz y la soja. Los incrementos de rendimientos oscilan entre -20% a +5% para el maíz y -76% a +18% para el trigo.

B.2. Desarrollo de la Metodología

El objetivo de la tarea desarrollada en el presente Capítulo es la de evaluar el efecto del cambio climático sobre las necesidades de riego de los cultivos. Para ello se empleará exactamente la misma metodología descrita en el Capítulo A para la obtención del rendimiento de los cultivos.

Mediante el empleo del modelo de simulación GEPIC se realizarán una serie de simulaciones de forma distribuida a lo largo del territorio. Con el resultado de dichas simulaciones se construirán funciones de producción, tanto de rendimiento como de N-lixiviado en función de los inputs empleados en su consecución. Esta metodología ha sido perfectamente descrita en el Capítulo A. A diferencia de lo realizado en el Capítulo anterior, aquí deberemos emplear series climáticas futuras para escenarios de cambio climático en lugar de series de datos meteorológicos reales.

El cambio climático y en los usos del suelo está inexorablemente conectado con el ciclo hidrológico. Es por tanto evidente la importancia de abordar dichos cambios de manera rigurosa para la sustentabilidad futura de los recursos hídricos. Las series climáticas del escenario de cambio climático se obtuvieron a partir de aplicar una perturbación a las series históricas (del periodo 1967-1990) a través del incremento relativo (en media y desviación estándar) obtenido de las series mensuales de P, T y ET. Se generaron series futuras para el periodo 2071-2100 por modelación con SWAT de los procesos lluvia-escorrentía en el ámbito de la Mancha Oriental.

La simulación se llevó a cabo suponiendo un escenario de emisiones A1B (línea evolutiva A1: globalización tecnológica-energética con utilización mixta y equilibrada de combustibles fósiles y no fósiles) a escala diaria de las variables requeridas (temperatura media, máxima y mínima; humedad media, máxima y mínima, velocidad y dirección media y máxima del viento; precipitación, temperatura, radiación y evapotranspiración) para alimentar el modelo agronómico EPIC-GEPIC. El modelo de circulación general usado es el METO-HC GCM, siendo el modelo SMHI el modelo climático regional usado para proyectar las variables.

Se utilizó un reescalado para hacer coincidir las celdas y generar las series futuras. Se trata de datos completos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa máximas y mínimas, velocidad del viento y radiación solar.

Finalmente, y dado que en la literatura hemos encontrado que es habitual estudiar los escenarios de cambio climático con y sin incremento de emisiones de CO₂, ya que se trata de un elemento que por sí mismo es capaz de compensar los efectos climáticos negativos sobre el rendimiento, se planteará el análisis por duplicado. Por un lado se correrá el modelo de simulación con las series de datos meteorológicos futuros generados y un escenario de emisiones similar al actual (360 ppmv de CO₂) y por otro lado, estos mismos datos bajo un escenario de emisiones A1B (697 ppmv de CO₂).

B.3. Aplicación a los casos de estudio

En este apartado se desarrolla, con la metodología descrita en el apartado anterior, la obtención de las funciones de rendimiento y N-lixiviado de 3 cultivos, **maíz, trigo y cebada** en el sistema de la Mancha Oriental (MOS) bajo los escenarios de cambio climático. Dado que los escenarios de cambio climático actúan bajo el supuesto de posibles incrementos en la concentración de CO₂, se ha seleccionado para esta primera fase dos cultivos tipo C3 (trigo y cebada) y otro C4 (maíz), puesto que presentan distinto comportamiento ante la fertilización carbónica (Tubiello y Ewert, 2002).

B.3.1. Meteorología en el escenario de cambio climático

Tal como se ha indicado en el epígrafe anterior, se generaron series futuras para el periodo 2071-2100 y suponiendo un escenario de emisiones A1B a escala diaria de las variables requeridas (temperatura media, máxima y mínima; humedad media, máxima y mínima, velocidad y dirección media y máxima del viento; precipitación, temperatura, radiación y evapotranspiración) para alimentar el modelo agronómico EPIC-GEPIC. Dichas series fueron obtenidos perturbando las series históricas disponibles para el sistema con base a las predicciones de cambio en media y desviación estándar mensual obtenidas con el modelo climático regional SMHI en el marco del proyecto ENSEMBLES (2008). Se trata de datos completos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa máximas y mínimas, velocidad del viento y radiación solar. Los cambios en la media y varianza se discuten en el apartado B.4 del presenta Capítulo. La Figura 30 nos la cuadrícula de datos meteorológicos de series futuras.

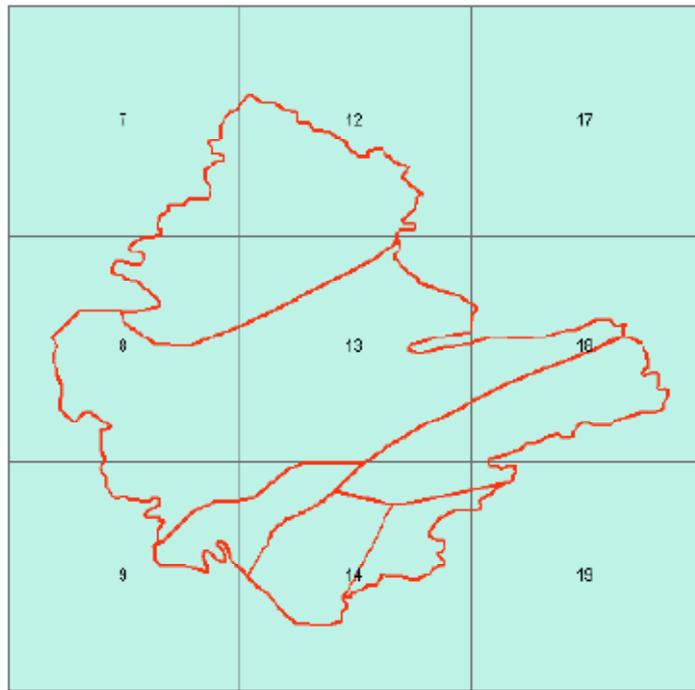


Figura 30. Cuadrícula correspondiente a los datos meteorológicos de serie futura.

ESTACIÓN	Correspondencia Celda serie futura
TARAZONA – AB01	8, 13
ALMANSA – AB03	18, 19
ALBACETE- AB05	14, 9
ONTUR- AB06	19
POZO CAÑADA AB-07	14
LA GINETA - AB08	8, 9, 13
MOTILLEJA - AB09	13, 18
EL SANCHÓN – CU01	8, 7
EL PICAZO – CU03	8, 7, 12
VILLANUEVA DE LAJARA – CU08	12, 13

El escenario de emisiones A1B contempla las concentraciones de CO₂ que se muestran en la tabla 28 (IPCC, 2001), (Guo et al., 2010).

Tabla 28. Escenarios de emisiones y concentración de CO₂ en ppmv

	A2A	B2A	A1B
2030s	488	445	479
2060s	632	521	588
2090s	775	597	697

Las series meteorológicas generadas son para el último periodo mostrado en la tabla (2070- 2100) por lo que la concentración de CO₂ en las simulaciones del modelo agronómico deberá ser 697

ppmv. No obstante, se correrá el modelo agronómico con las series de datos meteorológicos futuros, bajo el supuesto de concentración de CO₂ actual (360 ppmv) y con el escenario A1B de 697 ppmv.

B.3.2. Suelos

En la Figura 31 se muestran los tipos de suelo considerados en la zona (idem al capítulo anterior).

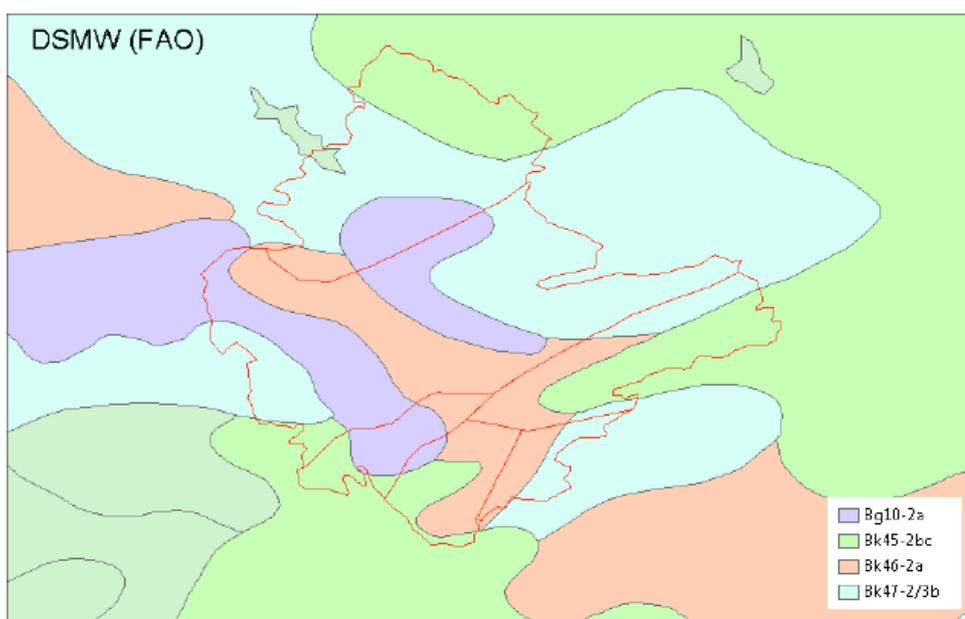


Figura 31. Suelos en MOS según DSMW (FAO)

Las dos primeras letras del código indican el tipo de suelo mayoritario en la unidad según la clasificación de suelos de la FAO. El número que le sigue es un número de unidad de suelo para localizarlo en la base de datos y conocer si dentro de la unidad aparecen mezclados otros tipos de suelos en menor proporción. En una unidad de suelo cartografiada siempre el predominante (el que le da el nombre) está presente con más de un 40% de la superficie ocupada. El número tras el guión indica la clase de textura, siendo 1 suelos gruesos, 2 medios y 3 finos. Finalmente las letras últimas son un indicador de pendiente, con la siguiente equivalencia: a = 0-8% de pendiente, b=8-30% y c=>30%.

Tabla 29: Suelos encontrados en MOS.

SMUN	SMUS	DSU	%DSU	FIASU	%FIASU	SASU	%SASU	TASU	%TASU	FOASU	%FOASU
6461	Bg10-2a	Bg	60	Bk	30	Lc	10	-	-	-	-
6468	Bk45-2bc	Bk	40	E	20	I	20	Hc	10	K	10
6470	Bk46-2a	Bk	90	Lc	10	-	-	-	-	-	-
6471	Bk472/3b	Bk	40	B	20	Re	20	E	10	L	10

SMUN: Número de la unidad de suelo mapeada

SMUS: Símbolo de unidad de suelo mapeada

DSU: Unidad de suelo dominante

FIASU: Primera unidad de suelo asociado (símbolo)

SASU: Segunda unidad de suelo asociado (símbolo)

TASU: Tercera unidad de suelo asociado (símbolo)

FOASU: Cuarta unidad de suelo asociado (símbolo).

Los suelos encontrados son por un lado una unidad de Cambisol gleyco (Bg) y por otro lado 3 unidades de Cambisol Cálculo (Bk). Los suelos mezclados entre estas unidades son Luvisol (L), Rendzinas (E), Litosoles (I), Kastanozems (K) Regosoles (Rc) y Phaeozems (H).

La caracterización de dichos suelos la encontramos en Batjes (1995, 2006). Los parámetros del suelo básicos que emplea el modelo son número de capas de suelo y su profundidad, porcentaje de arena y limo, densidad aparente, pH, contenido en carbono orgánico y capacidad de intercambio catiónico. Todo ello para 5 capas de suelo a 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, 80-100 cm de profundidad.

B.3.3. Calibración de resultados de rendimiento

Como se mencionó en el Capítulo A, las simulaciones en el escenario de clima actual fueron calibradas a partir de ensayos reales que se encuentran publicados. Así, para el caso de la Mancha Oriental, el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) tiene publicados ensayos de rendimiento de los cultivos habituales de la zona realizados en la finca experimental “Las Tiesas” (Albacete) situada en las coordenadas geográficas 2° 5’ 10” de longitud oeste y 39°14’30” de latitud norte, con una altitud de 695 m.

B.3.4. Regionalización del resultado de las simulaciones. Generación de funciones de producción específicas por zonas

Para evaluar si es posible realizar funciones de producción distintas por zonas o si por el contrario una sola función de producción describe adecuadamente toda la zona de estudio se desarrolla un análisis de la varianza multifactorial (ANOVA) y de la covarianza (ANCOVA). Las variables explicadas son el rendimiento de los cultivos y el lixiviado de nitrógeno (kg ha⁻¹). Los factores entre los que buscamos diferencias significativas son la altitud (covariante), la estación meteorológica de influencia (factor clima) o el tipo de suelo (factor suelo). El análisis estadístico se desarrolla mediante el concurso de Statgraphics Centurion XVI. Idem al Capítulo anterior.

Trigo. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones A1B (697 ppmv)

En la Figura 32 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos en el ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. Encontramos que los resultados de N-lixiviado son distintos para las unidades de suelo Bk (6468, 6470 6472) de la unidad de suelo Bg (6461), siendo mucho más intenso en esta última unidad. En cuanto a las estaciones meteorológicas, vemos que claramente hay dos grupos: uno formado por las estaciones de 7, 8 y 12, y otro con el resto de estaciones 9, 13, 14, 18 y 19, presentando el primer grupo un N-lixiviado mucho más intenso.

En la Tabla 30 encontramos los resultados del ANOVA. La Altitud no es un factor que influya en el N-lixiviado para este cultivo. Tampoco encontramos interacción entre las variables.

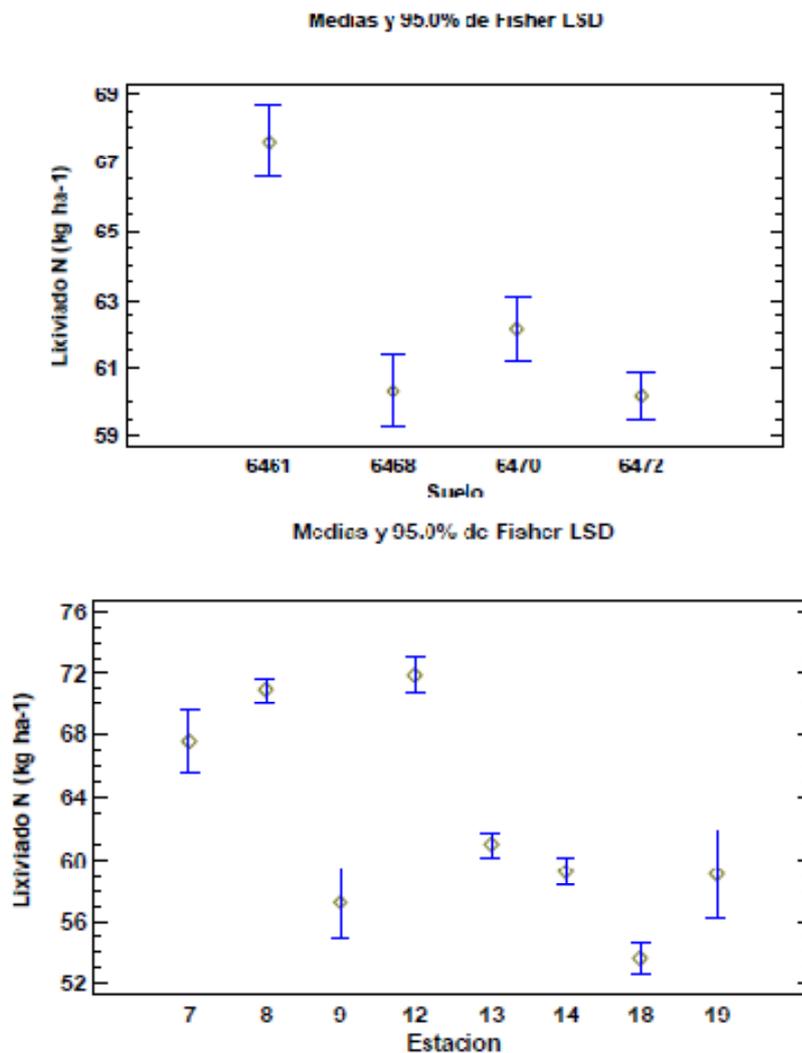


Figura 32. ANOVA de N-lixiviado en trigo.

Tabla 30. Análisis de Varianza para N-lixiviado trigo- Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Sumade Cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
cota	9.36841	1	9.36841	0.12	0.7313
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	7680.59	3	2560.2	32.23	0.0000
B:estacion	49296.1	7	7042.3	88.66	0.0000
RESIDUOS	102546.	1291	79.4315		
TOTAL (CORREGIDO)	170419.	1302			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Operando de la misma forma se realiza un ANOVA de Rendimiento del cultivo por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 33 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 31 se muestran los resultados del ANOVA. Se observa que todos los tipos de suelo son igualmente productivos, no siendo las diferencias entre las medias estadísticamente significativas. Sin embargo, desde el punto de vista climático, podemos ver como las estaciones más al oeste -7, 8 y 9- son menos productivas que las situadas más al este -12, 13, 14, 18, y 19-..

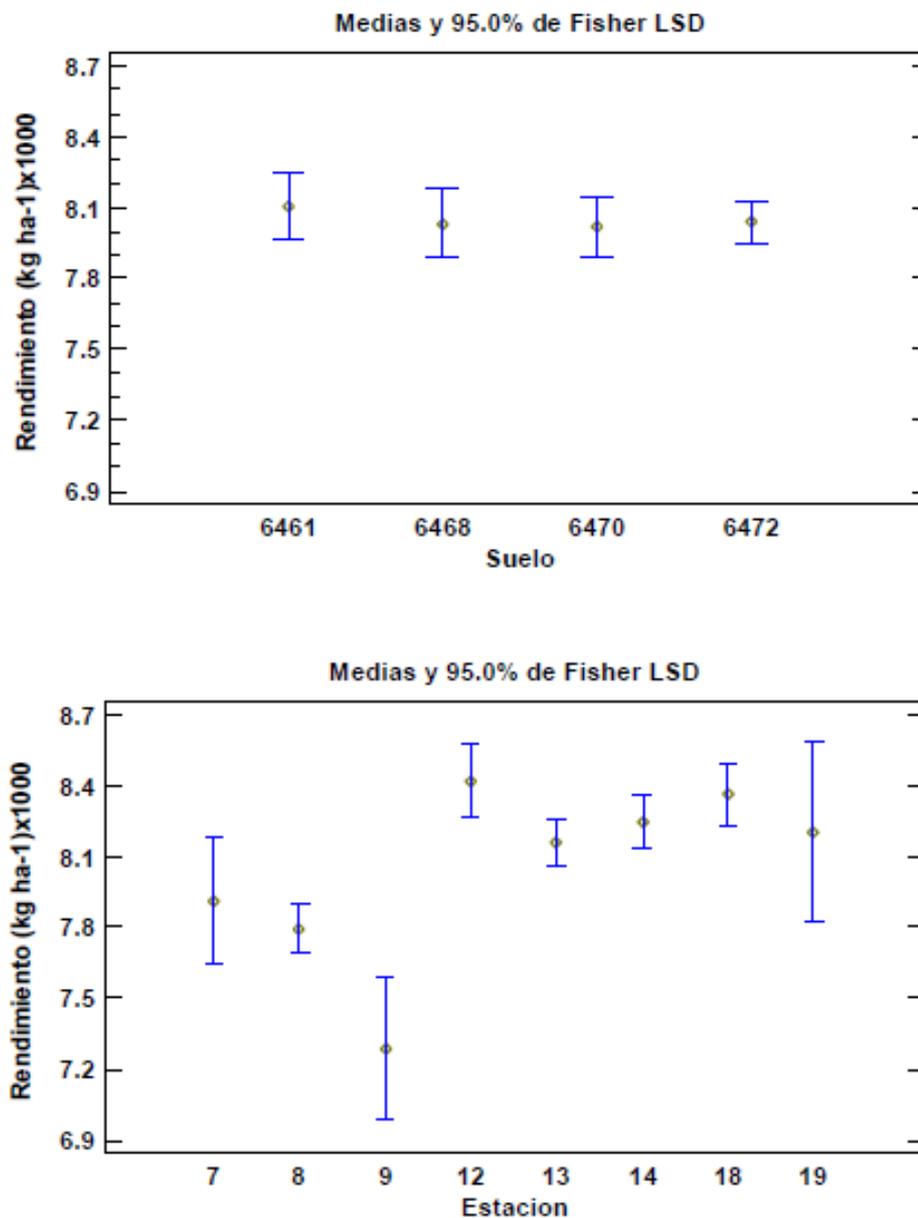


Figura 33. ANOVA de Rendimiento en trigo.

Tabla 31. Análisis de Varianza para Rendimiento trigo - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
cota	0.0169573	1	0.0169573	0.01	0.9144
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	0.846554	3	0.282185	0.19	0.9016

B:estacion	73.8071	7	10.5439	7.19	0.0000
RESIDUOS	1893.12	1291	1.4664		
TOTAL (CORREGIDO)	1972.34	1302			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Maíz. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones A1B (697 ppmv)

Se realiza un ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 34 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 32 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como el maíz repite para N-lixiviado los resultados encontrados en Trigo. Por tipo de suelo aparece el tipo Bg (6461) con un N-lixiviado muy superior al resto de suelos de tipo Bk. Por estación Meteorológica de nuevo nos aparecen dos grupos. La única diferencia con Trigo es que al grupo que menor N-lixiviado produce, formado por las estaciones 9, 13, 14, 18 ,y 19 se le ha sumado la 12 que allí formaba parte del grupo que genera un mayor N-lixiviado.

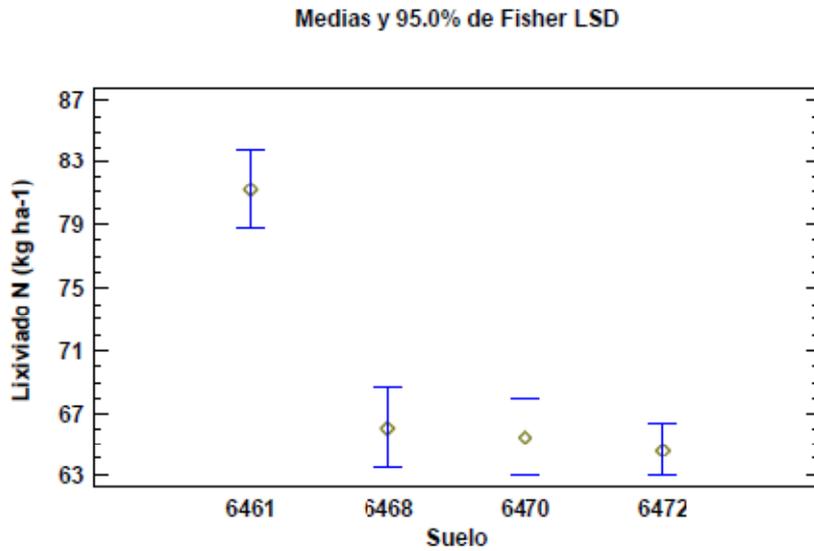
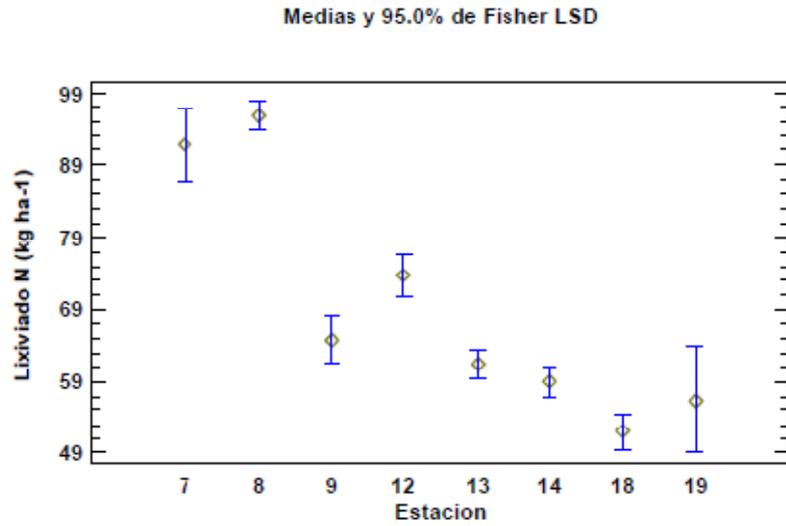


Figura 34. ANOVA de N-lixiviado en Maíz.

Tabla 32. Análisis de Varianza para N-lixiviado en maíz - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
Cota	233.726	1	233.726	0.29	0.5876
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	69299.4	3	23099.8	29.07	0.0000
B:estacion	464104.	7	66300.6	83.42	0.0000
RESIDUOS	1.66896E6	2100	794.741		
TOTAL (CORREGIDO)	2.30965E6	2111			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Finalmente se realiza un ANOVA de Rendimiento por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 35 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 33 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como para Maíz no aparecen diferencias significativas de rendimiento por tipo de suelo. Sin embargo si aparecen diferencias entre zonas climáticas, donde las estaciones 7 y 8 presentan un menor rendimiento que el resto de estaciones meteorológicas.

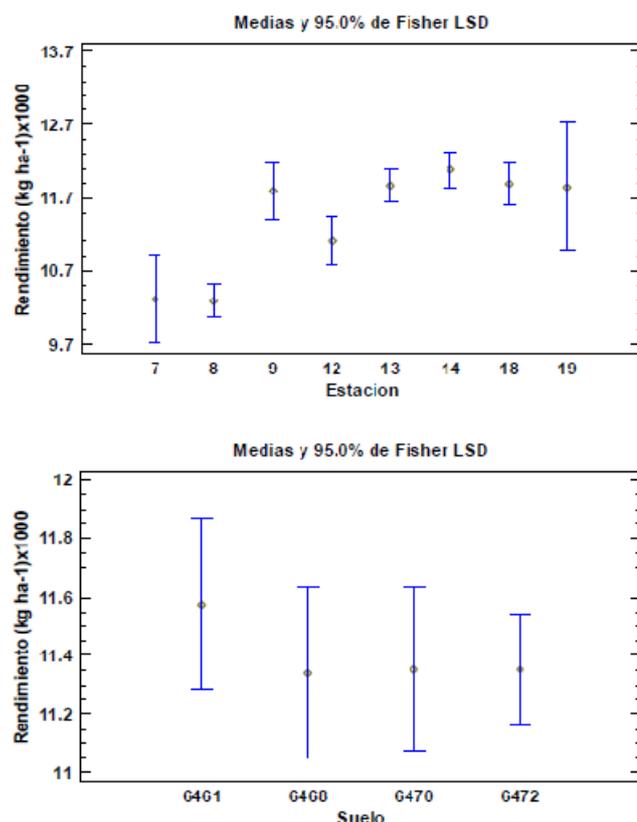


Figura 35. ANOVA de Rendimiento en Maíz.

Tabla 33. Análisis de Varianza para Rendimiento en maíz- Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
cota	0.0121963	1	0.0121963	0.00	0.9732
EFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	12.959	3	4.31967	0.40	0.7538
B:estacion	935.065	7	133.581	12.33	0.0000
RESIDUOS	22743.5	2100	10.8302		
TOTAL (CORREGIDO)	23716.0	2111			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Cebada. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones A1B (697 ppmv)

Se realiza un ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 36 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 34 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como la cebada tiene resultados semejantes para N-lixiviado a los obtenidos en Trigo y Maíz. Por tipo de suelo aparece el tipo Bg (6461) con un N-lixiviado muy superior al resto de suelos de tipo Bk. Por estación Meteorológica de nuevo nos aparecen dos grupos. La única diferencia con Trigo es que las medias de N-lixiviado de las estaciones 9, 13, 14, 18 y 19 se encuentran más concentradas, por lo que son diferenciables. El grupo que genera un mayor N-lixiviado corresponde a las estaciones 7, 8 y 12.

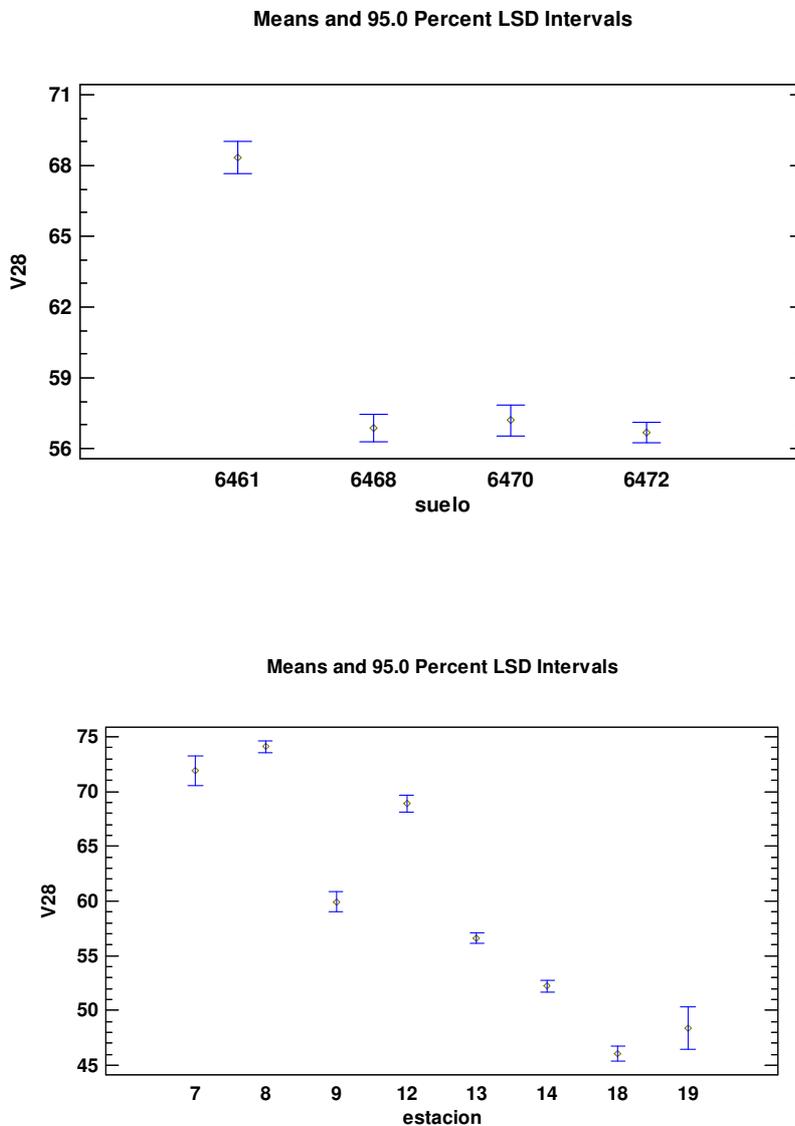


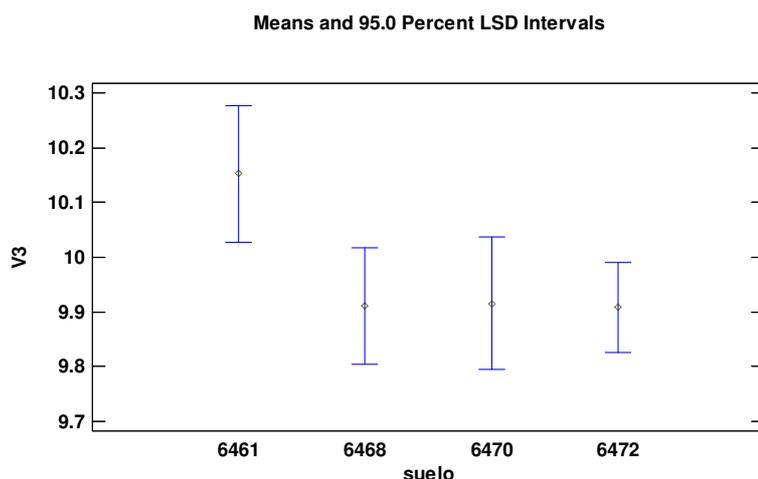
Figura 36. ANOVA de N-lixiviado (Kg/ha) en Cebada.

Tabla 34. Análisis de Varianza para N-lixiviado en cebada - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
Cota	233.726	1	233.726	0.29	0.5876
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	167680.	7	23954.3	472.66	0.0000
B:estacion	31433.2	3	10477.7	206.75	0.0000
RESIDUOS	92084.6	1817	50.6794		
TOTAL (CORREGIDO)	321949.	1827			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Finalmente se realiza un ANOVA de Rendimiento por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 37 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 35 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como para Cebada aparece una diferencia significativa de rendimiento para el suelo 6461, correspondiente al tipo Bg. También aparecen diferencias notables entre zonas climáticas, donde las estaciones 7, 8 y 12 presentan un menor rendimiento que el resto de estaciones meteorológicas.



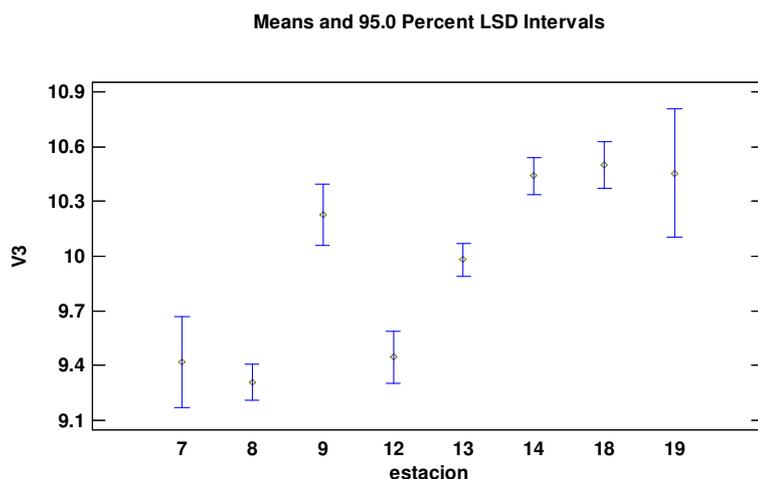


Figura 37. ANOVA de Rendimiento en Cebada.

Tabla 35. Análisis de Varianza para Rendimiento en cebada- Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
cota	0.0121963	1	0.0121963	0.00	0.9732
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	13.8799	3	4.62662	2.66	0.0467
B:estacion	375.411	7	53.6302	30.83	0.0000
RESIDUOS	3160.33	1817	1.73931		
TOTAL (CORREGIDO)	3541.03	1827			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Trigo. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones actual (360 ppmv)

También se simula en condiciones de emisiones de CO₂ actuales

En la Figura 38 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos en el ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. Encontramos que los resultados de N-lixiviado son distintos para las unidades de suelo Bk (6468, 6470 6472) de la unidad de suelo Bg (6461), siendo mucho más intenso en esta última unidad. En cuanto a las estaciones meteorológicas, vemos que claramente hay tres grupos: uno formado por las estaciones 8 y 12, otro con la estación 18, y finalmente otro con el resto de estaciones 9, 13, 14 y 19, presentando el primer grupo un N-lixiviado mucho más intenso.

En la Tabla 36 encontramos los resultados del ANOVA. La Altitud no es un factor que influya en el N-lixiviado para este cultivo. Tampoco encontramos interacción entre las variables.

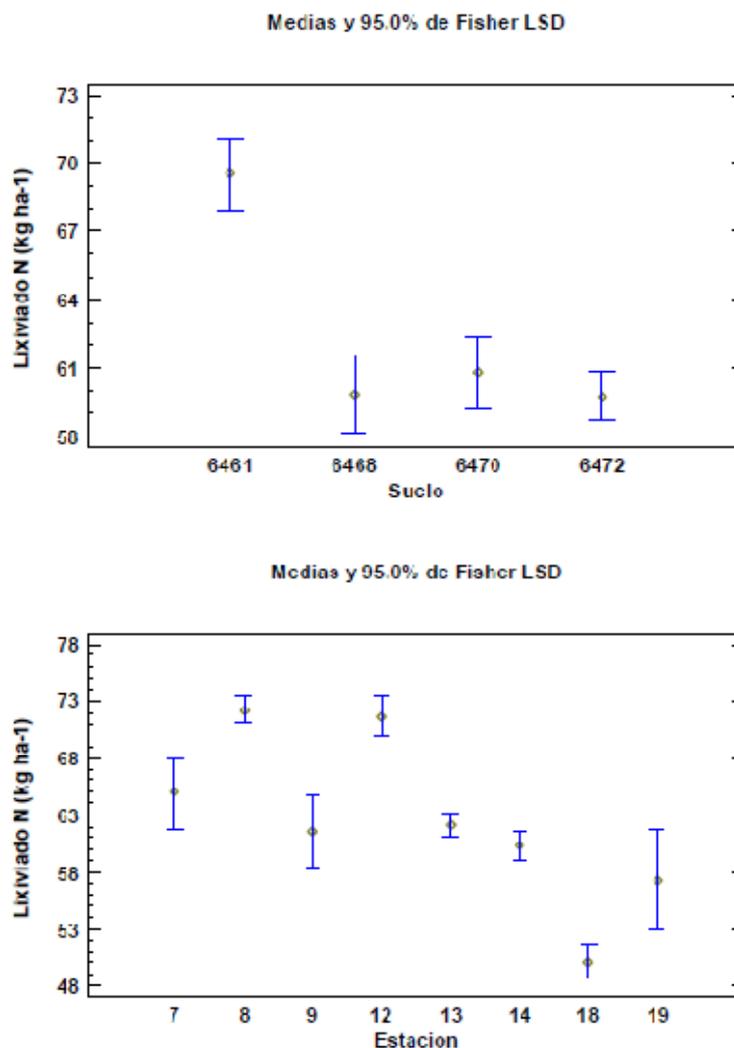


Figura 38. ANOVA de N-lixiviado en trigo.

Tabla 36. Análisis de Varianza para N-lixiviado trigo- Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
COVARIABLES					
cota	1.28623	1	1.28623	0.01	0.9327
EFEKTOS PRINCIPALES					
A:suelo	13733.6	3	4577.86	25.41	0.0000
B:estacion	59796.3	7	8542.33	47.42	0.0000
RESIDUOS	217989.	1210	180.156		
TOTAL (CORREGIDO)	310217.	1221			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Operando de la misma forma se realiza un ANOVA de Rendimiento del cultivo por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 39 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 37 se muestran los resultados del ANOVA. Se observa que todos los tipos de suelo son igualmente productivos, no siendo las diferencias entre las medias estadísticamente significativas. Sin embargo, desde el punto de vista climático, podemos ver como las estaciones más al oeste -7, 8 y 9- son menos productivas que las situadas más al este -12, 13, 14, 18, y 19-..

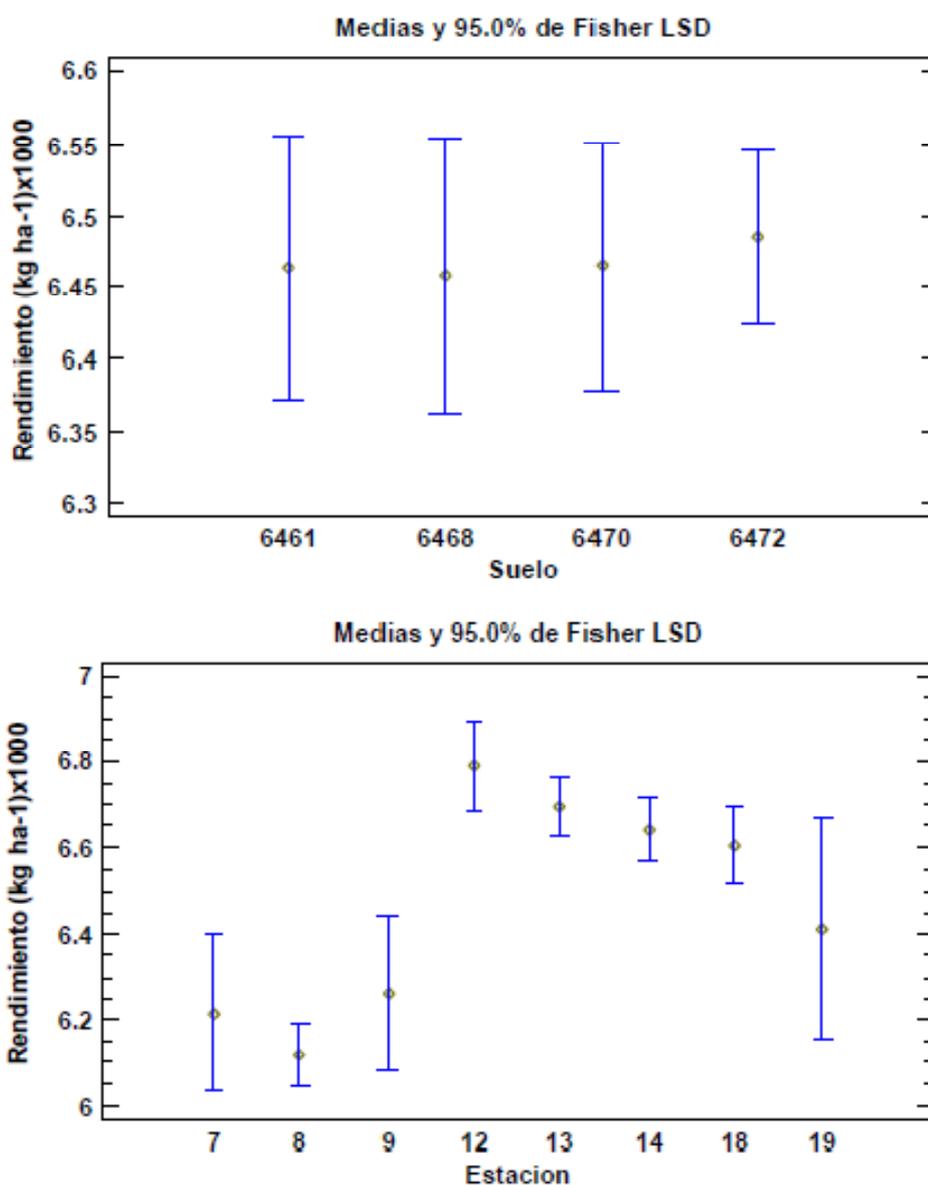


Figura 39. ANOVA de Rendimiento en trigo.

Tabla 37. Análisis de Varianza para Rendimiento trigo - Suma de Cuadrados Tipo III

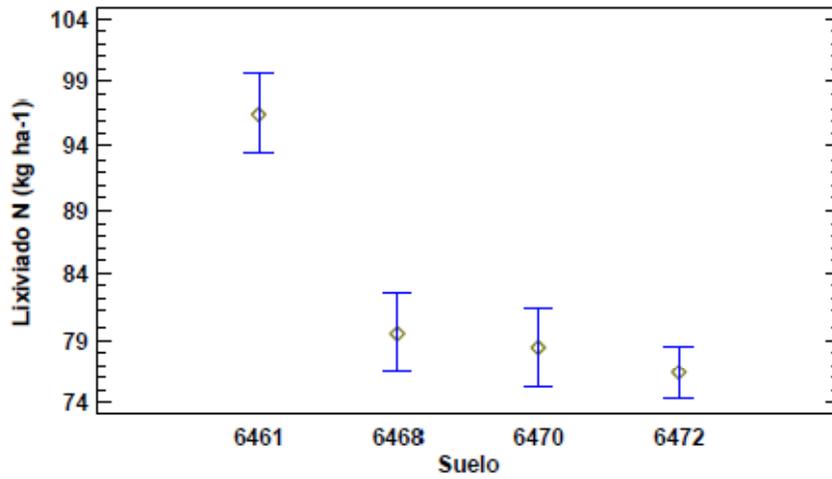
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
cota	0.0650892	1	0.0650892	0.11	0.7429
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	0.138634	3	0.0462114	0.08	0.9727
B:estacion	67.4318	7	9.63311	15.93	0.0000
RESIDUOS	731.895	1210	0.604872		
TOTAL (CORREGIDO)	803.684	1221			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Maíz. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones actual (360 ppmv)

Se realiza un ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 40 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 38 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como el maíz repite para N-lixiviado los resultados encontrados en Trigo. Por tipo de suelo aparece el tipo Bg (6461) con un N-lixiviado muy superior al resto de suelos de tipo Bk. Por estación Meteorológica ahora nos aparecen tres grupos. El primer grupo que menor N-lixiviado produce, formado por las estaciones 9, 13, 14, 18 ,y 19, un segundo grupo intermedio con solo una estación, la 12, y finalmente el grupo que mayor N-lixiviado produce formado por las estaciones 7 y 8.

Medias y 95.0% de Fisher LSD



Medias y 95.0% de Fisher LSD

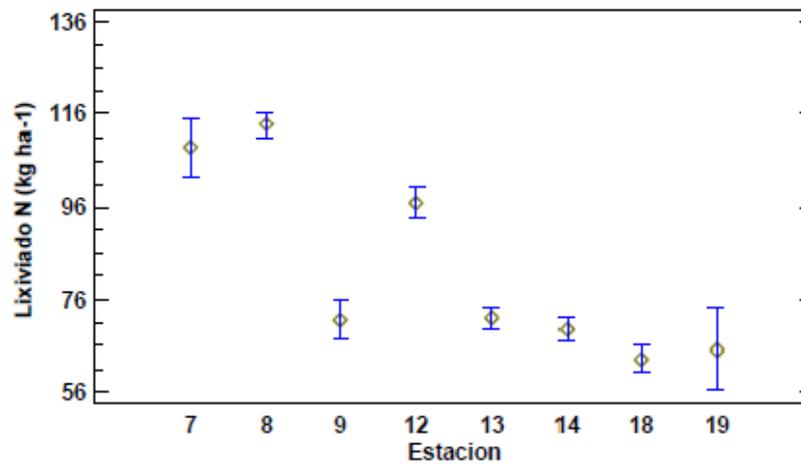


Figura 40. ANOVA de N-lixiviado en Maíz.

Tabla 38. Análisis de Varianza para N-lixiviado en maíz - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón - F	Valor - P
COVARIABLES					
Cota	2.84916	1	2.84916	0.02	0.8864
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	10872.5	5	2174.5	15.58	0.0000
B:estacion	131970.	8	16496.3	118.18	0.0000
RESIDUOS	208549.	1494	139.591		
TOTAL (CORREGIDO)	400218.	1508			

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón - F</i>	<i>Valor - P</i>
COVARIABLES					
Cota	470.831	1	470.831	0.40	0.5245
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	100419.	3	33473.1	28.79	0.0000
B:estacion	705900	7	100843.	86.74	0.0000
RESIDUOS	2.44145E6	2100	1162.59		
TOTAL (CORREGIDO)	3.36868E6	2111			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Finalmente se realiza un ANOVA de Rendimiento por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 41 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 39 se muestran los resultados del ANOVA.

Podemos ver como para Maíz no aparecen diferencias significativas de rendimiento por tipo de suelo. Sin embargo si aparecen diferencias entre 2 zonas climáticas. El primero de ellos está formado por las estaciones 7, 8 y 12 que presentan un menor rendimiento y un segundo grupo con el resto de estaciones meteorológicas (9, 13, 14 18 y 19) con rendimiento medio mayor.

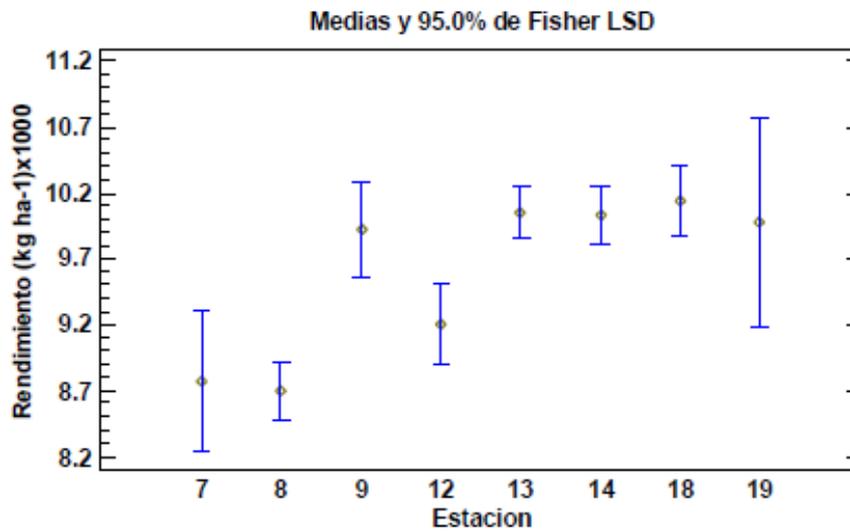
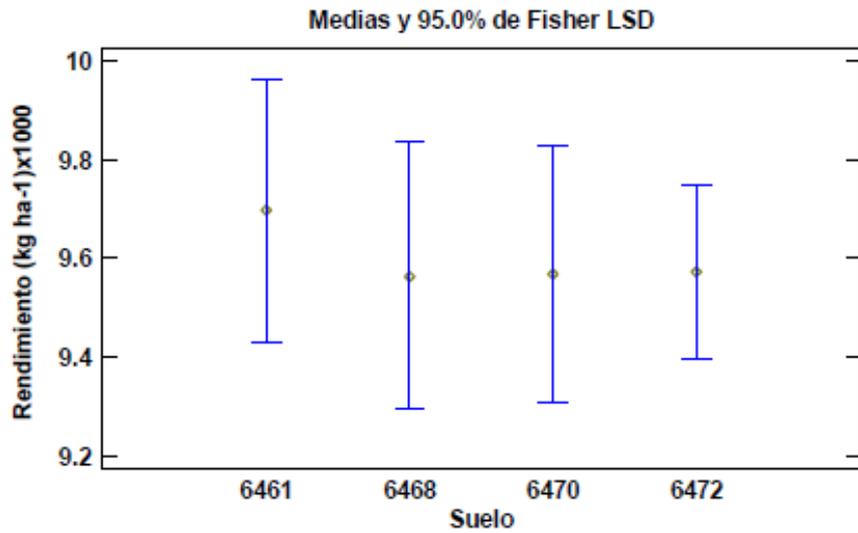


Figura 41. ANOVA de Rendimiento en Maíz.

Tabla 39. Análisis de Varianza para Rendimiento en maíz- Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado medio	Razón -F	Valor - P
COVARIABLES					
cota	0.404354	1	0.404354	0.24	0.6253
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	1.54843	5	0.309686	0.18	0.9692
B:estacion	309.524	8	38.6904	22.81	0.0000
RESIDUOS	2533.65	1494	1.69589		
TOTAL (CORREGIDO)	2885.57	1508			

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón -F</i>	<i>Valor - P</i>
COVARIABLES					
cota	0.147214	1	0.147214	0.02	0.8987
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	4.04137	3	1.34712	0.15	0.9308
B:estacion	657.553	7	93.9361	10.34	0.0000
RESIDUOS	19079.7	2100	9.08558		
TOTAL (CORREGIDO)	19771.1	2111			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Cebada. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones actual (360 ppmv)

Se realiza un ANOVA de N-lixiviado por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 42 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 40 se muestran los resultados del ANOVA. Podemos ver como la cebada repite para N-lixiviado (V28) los resultados encontrados para el Trigo y el Maíz (los suelos 6475 y 6543 no tienen influencia en las celdas correspondientes a la zona de estudio). Por tipo de suelo aparece el tipo Bg (6461) con un N-lixiviado muy superior al resto de suelos de tipo Bk. Por estación Meteorológica ahora nos aparecen cuatro grupos. El primer grupo que menor N-lixiviado produce, formado por las estaciones 17, 18 y 19, un segundo grupo con las 9, 13, 14, otro con mayor N-lixiviado con solo una estación, la 12, y finalmente el grupo que mayor N-lixiviado produce formado por las estaciones 7 y 8.

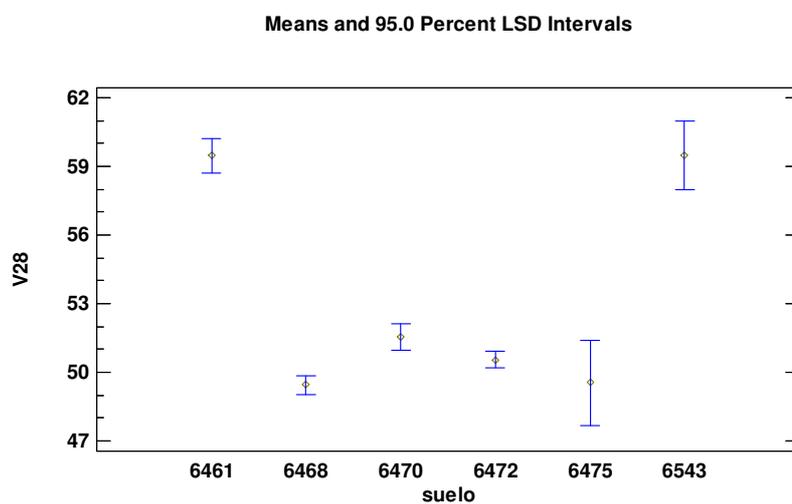
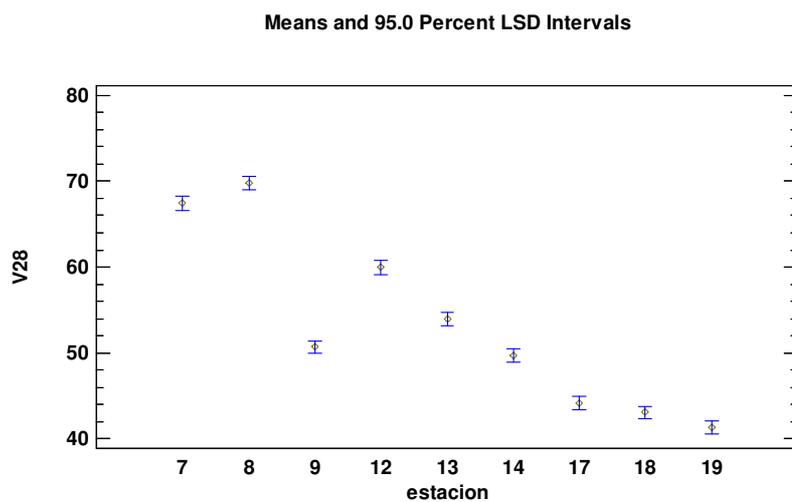


Figura 42. ANOVA de N-lixiviado en Cebada.

Tabla 40. Análisis de Varianza para N-lixiviado en cebada - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón - F</i>	<i>Valor - P</i>
COVARIABLES					
Cota	2.84916	1	2.84916	0.02	0.8864
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	10872.5	5	2174.5	15.58	0.0000
B:estacion	131970.	8	16496.3	118.18	0.0000
RESIDUOS	208549.	1494	139.591		
TOTAL (CORREGIDO)	400218.	1508			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Finalmente se realiza un ANOVA de Rendimiento por Tipo de Suelo y Estación Meteorológica, empleando la Altitud como covariante. En la Figura 43 se muestran los gráficos de medias con sus intervalos de confianza obtenidos. En la Tabla 41 se muestran los resultados del ANOVA.

Podemos ver como para la Cebada no aparecen diferencias significativas de rendimiento por tipo de suelo. Sin embargo si aparecen diferencias entre 3 zonas climáticas. El primero de ellos está formado por las estaciones 7 y 8 de menor rendimiento, el segundo por la estación 12, y el tercero que presenta un mayor rendimiento con el resto de estaciones meteorológicas (9, 13, 14 18 y 19) con rendimiento medio mayor.

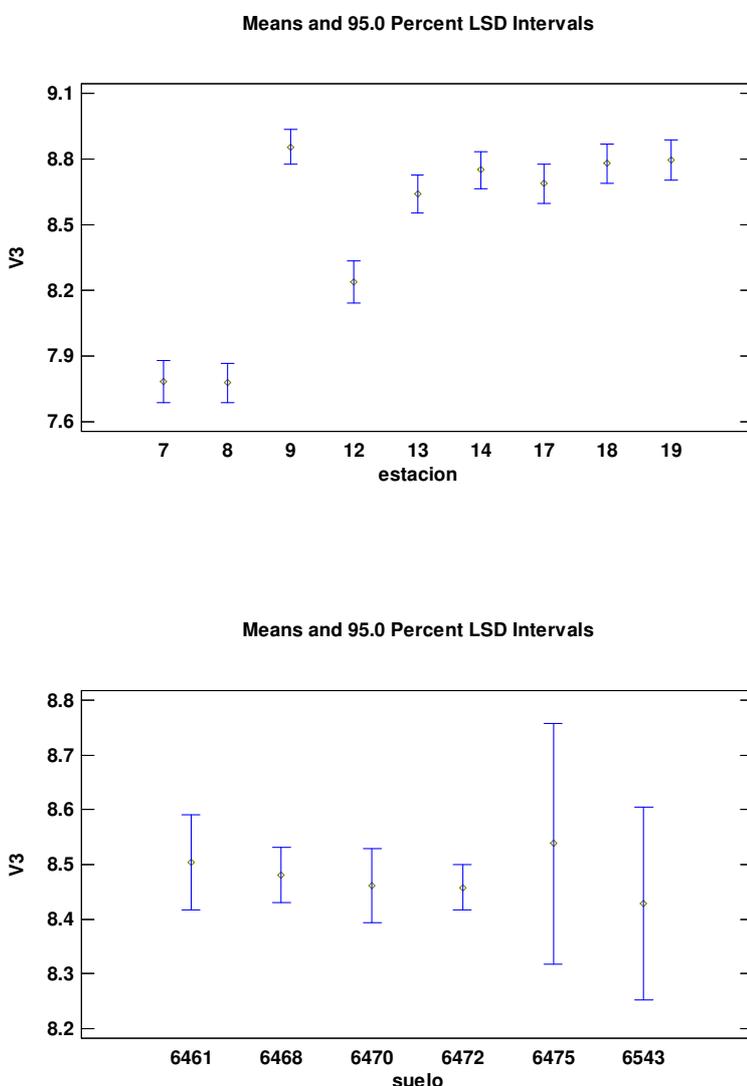


Figura 43. ANOVA de Rendimiento de Cebada.

Tabla 41. Análisis de Varianza para Rendimiento en cebada- Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón -F</i>	<i>Valor - P</i>
COVARIABLES					
cota	0.404354	1	0.404354	0.24	0.6253
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	1.54843	5	0.309686	0.18	0.9692
B:estacion	309.524	8	38.6904	22.81	0.0000
RESIDUOS	2533.65	1494	1.69589		
TOTAL (CORREGIDO)	2885.57	1508			

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Razón -F</i>	<i>Valor - P</i>
COVARIABLES					
cota	0.147214	1	0.147214	0.02	0.8987
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:suelo	4.04137	3	1.34712	0.15	0.9308
B:estacion	657.553	7	93.9361	10.34	0.0000
RESIDUOS	19079.7	2100	9.08558		
TOTAL (CORREGIDO)	19771.1	2111			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

B.3.5. Funciones de producción ajustadas

Tras el análisis de la varianza desarrollado en el epígrafe anterior se procede al ajuste de las funciones de producción que describan tanto el rendimiento del cultivo como la producción de N-lixiviado de nitrógeno para aquellos subgrupos que han demostrado presentar diferencias significativas.

Tal y como se indicó en la descripción de la metodología, se procede al ajuste de funciones de tipo cuadrático, siendo su estructura matemática:

$$Y_{i,j} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot N_{i,j} + \alpha_2 \cdot N_{i,j}^2 + \alpha_3 \cdot W_{i,j} + \alpha_4 \cdot W_{i,j}^2 + \alpha_5 \cdot N_{i,j} \cdot W_{i,j}$$

$$L_{i,j} = \beta_0 + \beta_1 \cdot N_{i,j} + \beta_2 \cdot N_{i,j}^2 + \beta_3 \cdot W_{i,j} + \beta_4 \cdot W_{i,j}^2 + \beta_5 \cdot N_{i,j} \cdot W_{i,j}$$

Donde $Y_{i,j}$ es el rendimiento del cultivo en la celda i de la malla y en el año j de simulación (kg ha⁻¹), $L_{i,j}$ es el N-lixiviado en la celda i de la malla y en el año j de simulación (kg ha⁻¹), $N_{i,j}$ es la cantidad de fertilizante aplicado al cultivo a lo largo de todo el ciclo, en la celda i de la malla y en el año j de simulación (kg ha⁻¹), $W_{i,j}$ es el agua aplicada al cultivo a lo largo de todo el ciclo, en la celda i de la malla y en el año j de simulación (mm), $\alpha_1, \dots, \alpha_5$, y β_1, \dots, β_5 , son los coeficientes del ajuste de mínimos cuadrados realizado.

Los coeficientes de ajuste se obtienen mediante el empleo de Statgraphics Centurion XVI, realizando una regresión múltiple por el método de los mínimos cuadrados.

Trigo. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones A1B (697 ppmv)

Caso 1-Trigo: N-lixiviado en suelo tipo 6461 (Bg)

Tabla 42. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Trigo

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7 (ET)	0.944031	0.0520067	18.1521	0.0000
V8 (fert-N)	0.219114	0.0325075	6.74042	0.0000
V7 ²	-0.00384663	0.000420544	-9.1468	0.0000
V8 ²	0.00082234	0.000190801	4.30994	0.0000
V7*V8	-0.00205278	0.000197172	-10.4111	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>

Model	1.1348E6	5	226959.	3712.61	0.0000
Residual	13693.6	224	61.132		
Total	1.14849E6	229			

R-cuadrada = 98.8077 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.7864 porciento

Error estándar del est. = 7.81869

Error absoluto medio = 5.96099

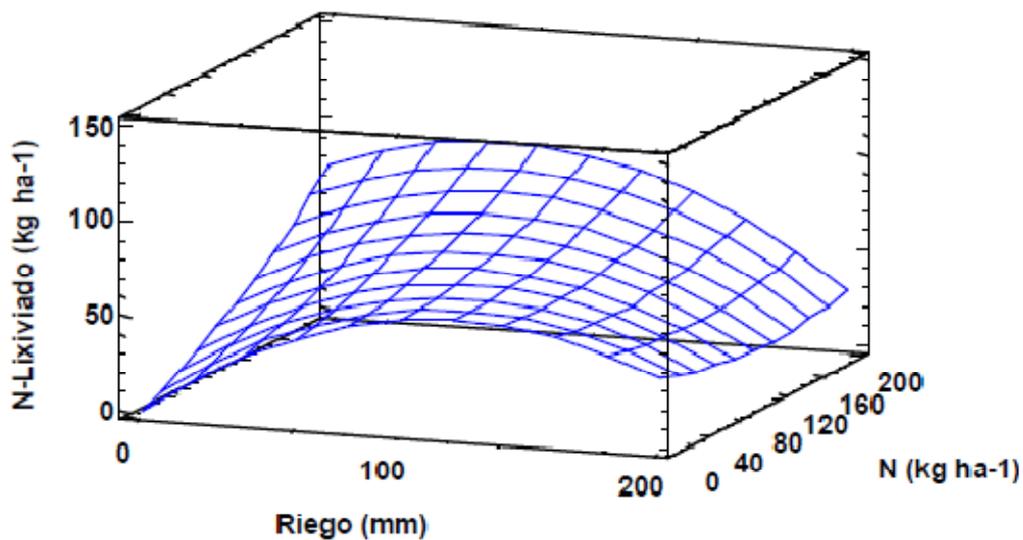


Figura 44. Gráfico de Superficie Caso 1-Trigo

Caso 2 - Trigo: N-lixiviado en suelo \diamond 6461. (Suelos Bk)

Tabla 42bis. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2- Trigo.

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámetr</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
<i>o</i>				
V7	0.544509	0.0242808	22.4255	0.0000
V8 (fert N)	0.26809	0.0157082	17.0669	0.0000
V7 ²	-0.0011995	0.000193299	-6.2054	0.0000
V8 ²	0.000437559	0.0000947757	4.61678	0.0000
V7*V8	-0.00182291	0.0000918953	-19.8369	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	4.04E6	5	807999.	11797.29	0.0000
Residual	73216.1	1069	68.4902		
Total	4.11321E6	1074			

R-cuadrada = 98.22 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.2133 porciento

Error estándar del est. = 8.27588

Error absoluto medio = 6.64441

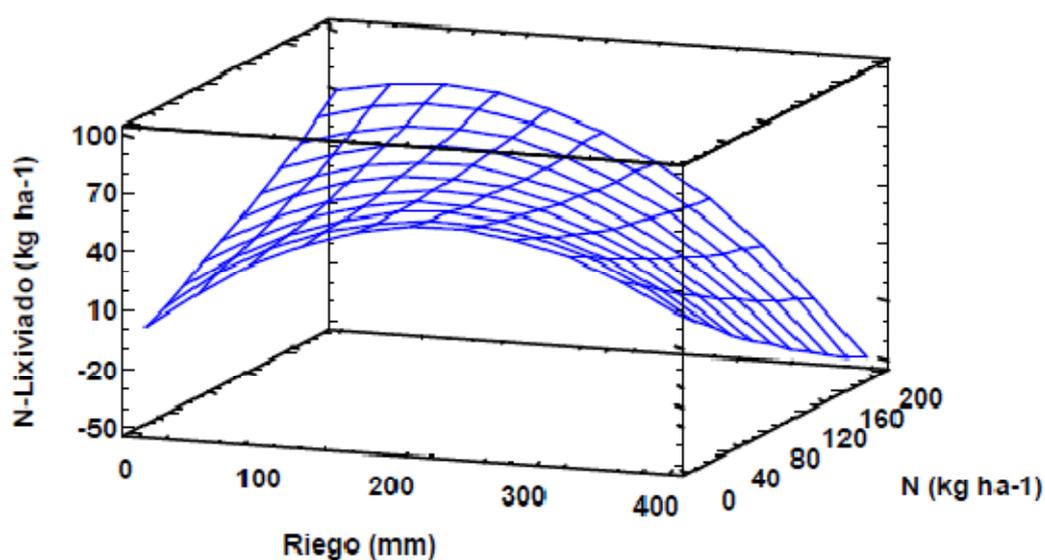


Figura 45. Gráfico de Superficie Caso 2-Trigo.

Caso 3-Trigo. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas 7, 8 y 12.

Tabla 43. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3- Trigo.

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámetr</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>co</i>	<i>Valor-P</i>
<i>o</i>				
V7	0.675219	0.0285651	23.6379	0.0000
V8	0.262648	0.0192696	13.6301	0.0000
V7^2	-0.00121702	0.000257219	-4.73148	0.0000
V8^2	0.000814441	0.000119835	6.79632	0.0000
V7*V8	-0.00259262	0.000140201	-18.4921	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	2.40244E6	5	480488.	10413.49	0.0000
Residual	21916.9	475	46.1409		
Total	2.42436E6	480			

R-cuadrada = 99.096 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.0884 porciento

Error estándar del est. = 6.79271

Error absoluto medio = 5.16471

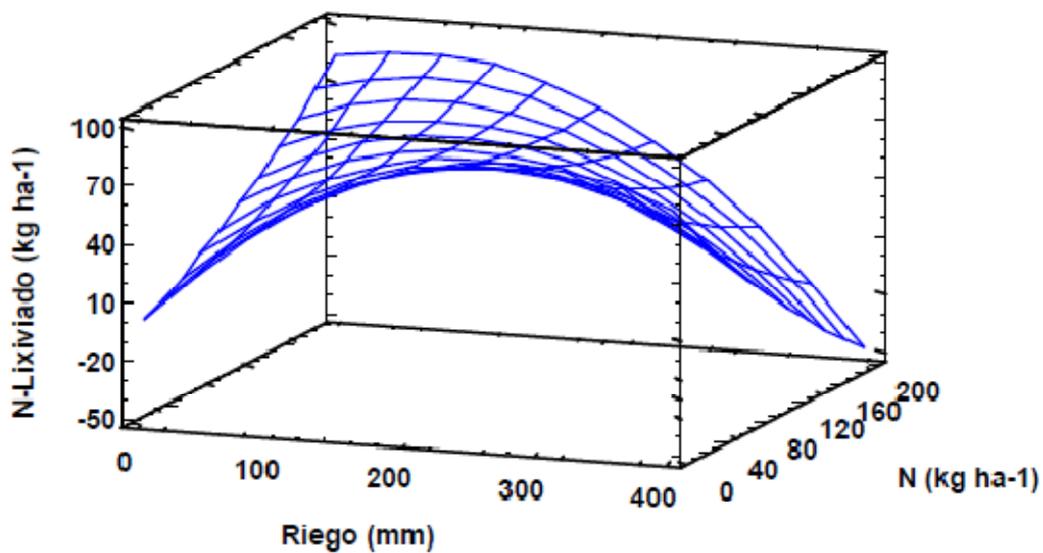


Figura 46. Gráfico de Superficie Caso 3-Trigo.

Caso 4-Trigo. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas $\diamond 7, 8 \text{ y } 12.$

Tabla 44. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Trigo.

		<i>Error</i>	<i>Estadíst</i>	
<i>Parámetr</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>ico</i>	<i>Valor-P</i>
<i>o</i>				
V7	0.635574	0.023876	26.6198	0.0000
V8	0.25441	0.0154133	16.5059	0.0000
V7^2	-0.00183522	0.000190528	-9.63225	0.0000
V8^2	0.000503135	0.0000926136	5.43263	0.0000
V7*V8	-0.00181077	0.0000907059	-19.9631	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	5.15808E6	5	1.03162E6	12922.21	0.0000
Residual	103623.	1298	79.8328		
Total	5.2617E6	1303			

R-cuadrada = 98.0306 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.0246 porciento

Error estándar del est. = 8.93492

Error absoluto medio = 7.09644

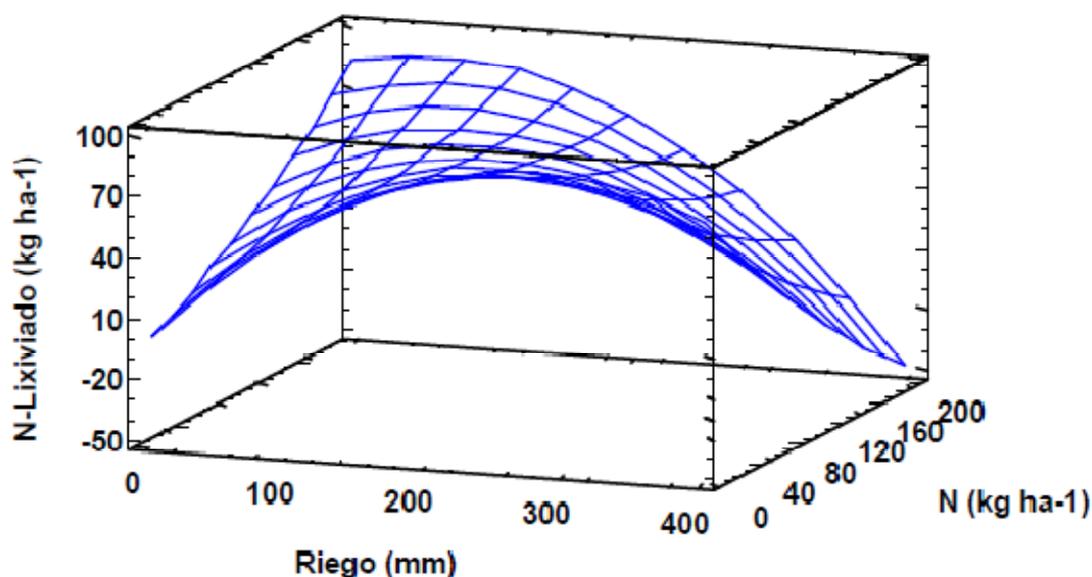


Figura 47. Gráfico de Superficie Caso 4-Trigo.

Caso 5-Trigo. Rendimiento para las estaciones meteorológicas 7, 8 y 9.

Tabla 45. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5- Trigo.

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico T	
V7 (aport. Agua)	33.8234	3.36044	10.0652	0.0000
V8	22.1931	5.72168	3.87877	0.0001
V7 ²	-0.0613159	0.0128956	-4.75481	0.0000
V8 ²	-0.110053	0.00326941	-33.6615	0.0000
V7*V8	0.0753819	0.0219956	3.42713	0.0007

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	2.19906E10	5	4.39811E9	156440.21	0.0000
Residual	9.89602E6	352	28113.7		
Total	2.20005E10	357			

R-cuadrada = 99.955 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9545 porciento

Error estándar del est. = 167.671

Error absoluto medio = 133.781

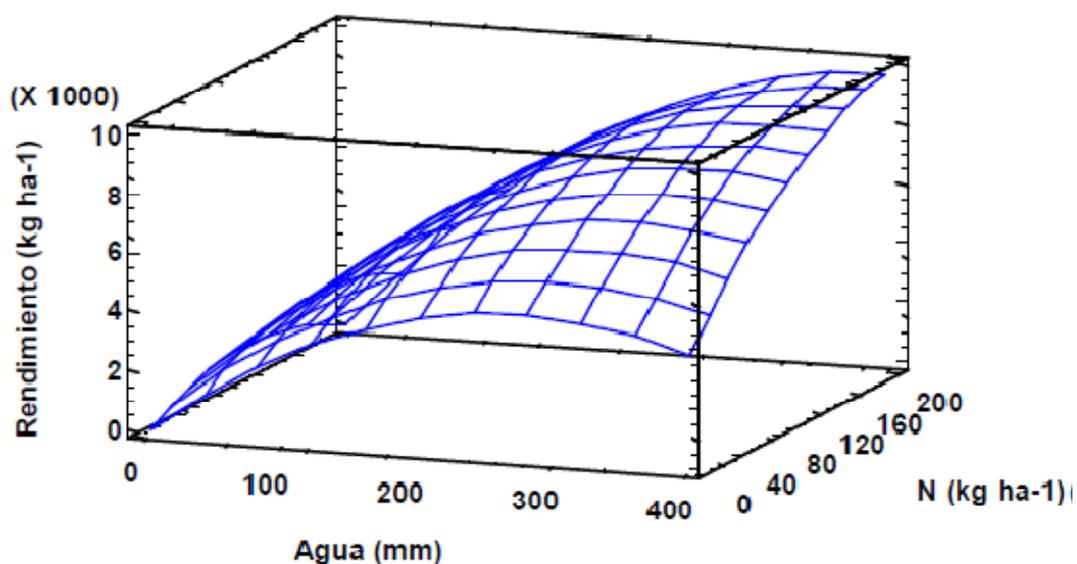


Figura 48. Gráfico de Superficie Caso 5-Trigo.

Caso 6-Trigo. Rendimiento para las estaciones meteorológicas \diamond 7, 8 y 9.

Tabla 46. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6- Trigo.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
V7	43.3647	1.90727	22.7366	0.0000
V8	19.0523	3.24909	5.86389	0.0000
V7 ²	-0.0968061	0.00731287	-13.2378	0.0000
V8 ²	-0.0942397	0.00302005	-31.2046	0.0000
V7*V8	0.0852608	0.012408	6.87144	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	8.788E10	5	1.7576E10	189074.52	0.0000
Residual	1.2066E8	1298	92958.1		
Total	8.80007E10	1303			

R-cuadrada = 99.8629 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.8625 porciento

Error estándar del est. = 304.89

Error absoluto medio = 250.025

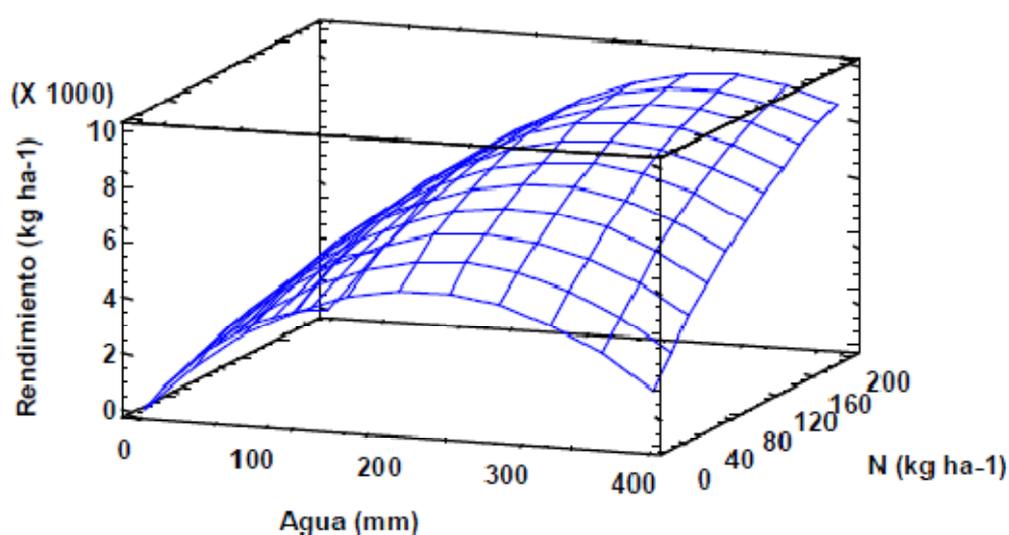


Figura 49. Gráfico de Superficie Caso 6-Trigo.

Finalmente en la Tabla 47 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción y lixiviado ajustadas en Trigo.

Tabla 47. Resumen funciones de producción ajustadas en Trigo, escenario de emisiones 697 ppmv.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
α_1	0.944031	0.544509	0.675219	0.635574	33.8234	43.3647
α_2	0.219114	0.26809	0.262648	0.25441	22.1931	19.0523
α_3	-0.00384663	-0.0011995	-0.00121702	-0.00183522	-0.0613159	-0.0968061
α_4	0.00082234	0.000437559	0.000814441	0.000503135	-0.110053	-0.0942397
α_5	-0.00205278	-0.00182291	-0.00259262	-0.00181077	0.0753819	0.0852608

Maíz. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones A1B (697 ppmv)

Caso 1-Maiz: N-lixiviado en suelo tipo 6461 (Bg)

Tabla 48. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Maiz

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámetr</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>co</i>	<i>Valor-P</i>
<i>o</i>			<i>T</i>	
V7	0.124677	0.0104057	11.9816	0.0000
V8	0.659551	0.0409181	16.1188	0.0000
V8^2	0.000476564	0.000149237	3.19333	0.0015
V7*V8	-0.00163141	0.000075515	-21.6039	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado</i>	<i>Razón-</i>	<i>Valor-P</i>
	<i>Cuadrados</i>		<i>Medio</i>	<i>F</i>	
Model	3.19019E6	4	797547.	1479.68	0.0000
Residual	204819.	380	538.998		
Total	3.39501E6	384			

R-cuadrada = 93.967 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 93.9194 por ciento

Error estándar del est. = 23.2163

Error absoluto medio = 19.5453

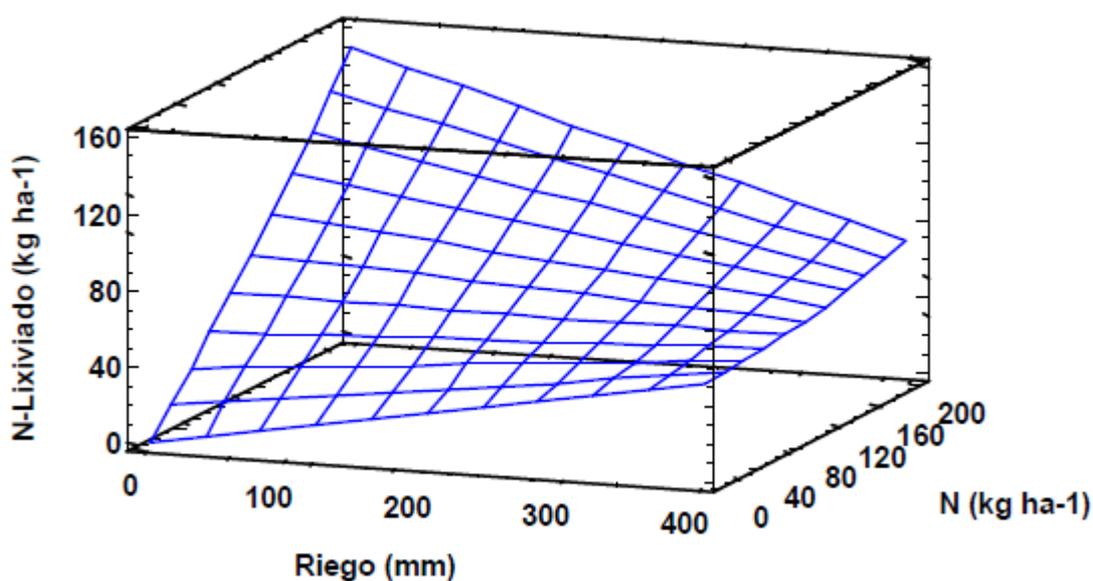


Figura 50. Gráfico de Superficie Caso 1-Maiz

Caso 2 - Maíz: N-lixiviado en suelo \diamond 6461. (Suelos Bk)

Tabla 49. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Maiz.

		<i>Error</i>	<i>Estadística</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	-0.181747	0.0207013	-8.77949	0.0000
V8	0.748366	0.0173803	43.0582	0.0000
V7 ²	0.000652705	0.0000497453	13.1209	0.0000
V8 ²	0.000299838	0.0000499685	6.00053	0.0000
V7*V8	-0.00181399	0.0000427976	-42.3853	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	8.19211E6	5	1.63842E6	6082.42	0.0000
Residual	464124.	1723	269.37		
Total	8.65623E6	1728			

R-cuadrada = 94.6383 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 94.6258 por ciento

Error estándar del est. = 16.4125

Error absoluto medio = 12.6492

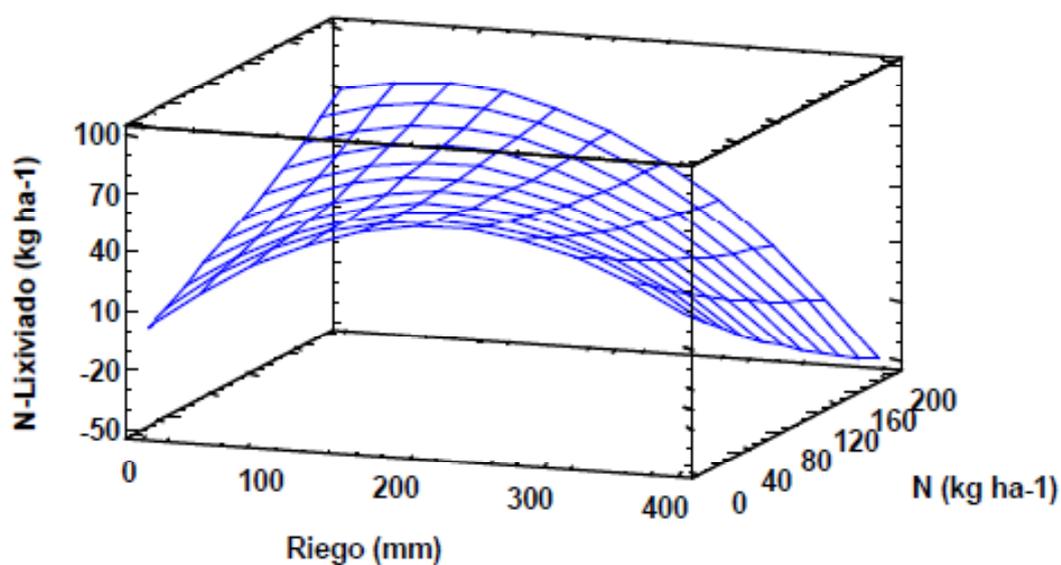


Figura 51. Gráfico de Superficie Caso 2-Maiz.

Caso 3-Maiz. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas 7 y 8.

Tabla 50. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Maiz.

		<i>Error</i>	<i>Estadística</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	-0.197379	0.0482133	-4.09387	0.0001
V8	0.707149	0.0334592	21.1346	0.0000
V7 ²	0.000873306	0.000124271	7.02745	0.0000
V8 ²	0.000946356	0.0000812387	11.6491	0.0000
V7*V8	-0.00210373	0.000101192	-20.7895	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	4.80694E6	5	961388.	5209.57	0.0000
Residual	87657.8	475	184.543		
Total	4.8946E6	480			

R-cuadrada = 98.2091 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.194 por ciento

Error estándar del est. = 13.5846

Error absoluto medio = 11.1773

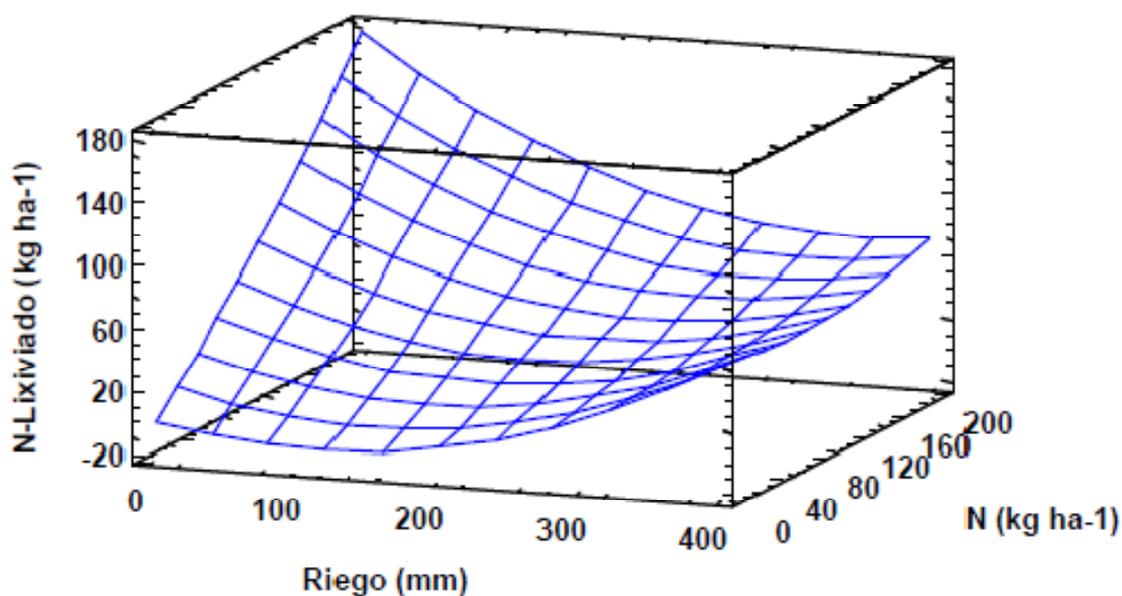


Figura 52. Gráfico de Superficie Caso 3-Maiz.

Caso 4-Maíz. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas \diamond 7 y 8.

Tabla 51. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Maíz.

		<i>Error</i>	<i>Estadística</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	-0.113944	0.0231803	-4.91555	0.0000
V8	0.731161	0.0192598	37.963	0.0000
V7 ²	0.000503996	0.0000558851	9.01843	0.0000
V8 ²	0.000304507	0.0000553435	5.50214	0.0000
V7*V8	-0.00175588	0.0000479042	-36.654	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	1.1206E7	5	2.24121E6	5587.10	0.0000
Residual	845201.	2107	401.139		
Total	1.20512E7	2112			

R-cuadrada = 92.9866 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92.9733 por ciento

Error estándar del est. = 20.0285

Error absoluto medio = 15.1658

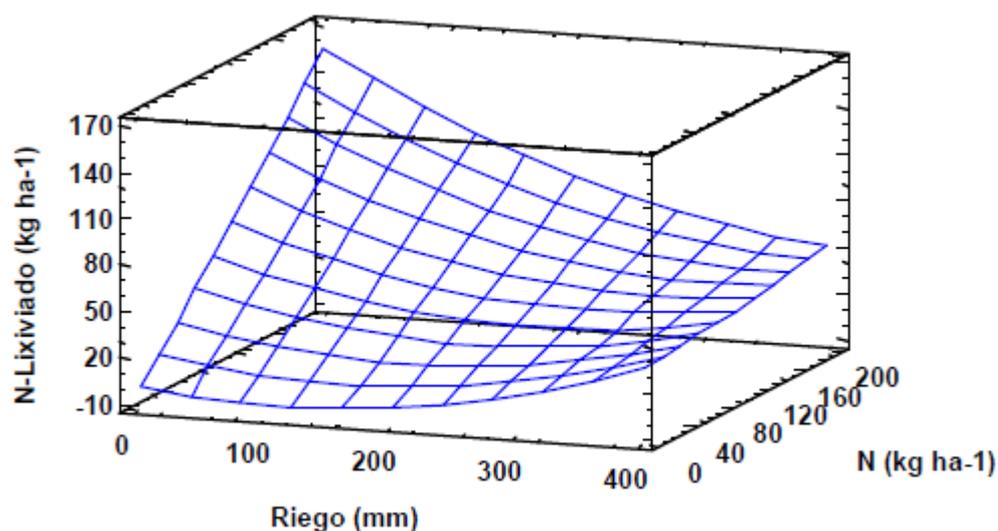


Figura 53. Gráfico de Superficie Caso 4-Maíz.

Caso 5-Maiz. Rendimiento para las estaciones meteorológicas 7 y 8.

Tabla 52. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Maiz.

		<i>Error</i>	<i>Estadísti</i>	
<i>Parámetr</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
<i>o</i>				
V7	18.1973	0.387417	46.9707	0.0000
V7 ²	-0.0174265	0.000917195	-18.9998	0.0000
V8 ²	-0.0974665	0.00173958	-56.0288	0.0000
V7*V8	0.111361	0.00139165	80.021	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
	<i>Cuadrados</i>		<i>Medio</i>		
Model	5.40261E10	4	1.35065E10	158454.00	0.0000
Residual	4.0574E7	476	85239.4		
Total	5.40667E10	480			

R-cuadrada = 99.925 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9245 porciento

Error estándar del est. = 291.958

Error absoluto medio = 239.152

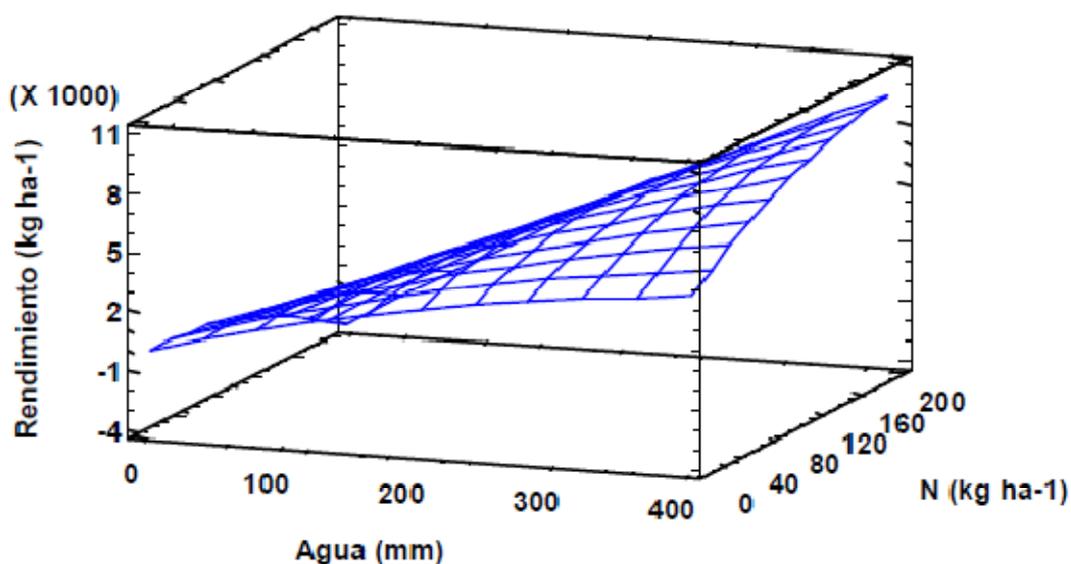


Figura 54. Gráfico de Superficie Caso 5-Maiz.

Caso 6-Maíz. Rendimiento para las estaciones meteorológicas \diamond 7 y 8.

Tabla 53. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6-Maíz.

		Error	Estadística	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
V7	44.4398	1.9667	22.5961	0.0000
V8	-34.7525	2.65438	-13.0925	0.0000
V7 ²	-0.0732833	0.00416116	-17.6112	0.0000
V8 ²	-0.0714461	0.00300768	-23.7545	0.0000
V7*V8	0.182062	0.0058199	31.2826	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	2.97753E11	5	5.95506E10	49414.66	0.0000
Residual	2.53919E9	2107	1.20512E6		
Total	3.00292E11	2112			

R-cuadrada = 99.1544 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.1528 por ciento

Error estándar del est. = 1097.78

Error absoluto medio = 910.544

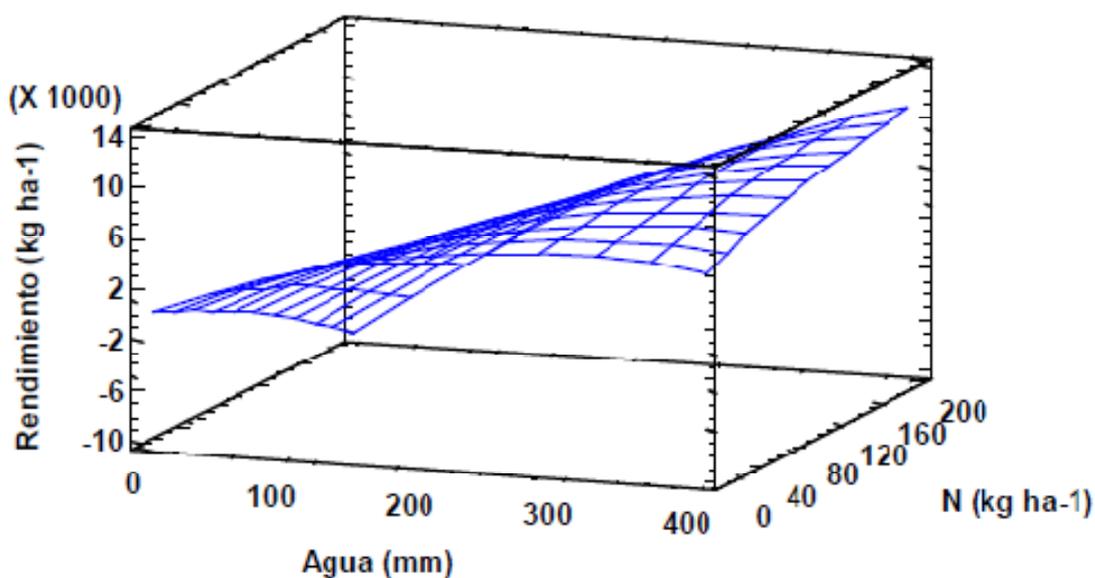


Figura 55. Gráfico de Superficie Caso 6-Maíz.

Finalmente en la Tabla 54 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción y lixiviado ajustadas en Maíz.

Tabla 54. Resumen funciones de producción ajustadas en Maíz, escenario de emisiones 697 ppmv.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
α_1	0.124677	-0.181747	-0.197379	-0.113944	18.1973	44.4398
α_2	0.659551	0.748366	0.707149	0.731161	-0.0174265	-34.7525
α_3	0	0.000652705	0.000873306	0.000503996	0	-0.0732833
α_4	0.000476564	0.000299838	0.000946356	0.000304507	-0.0974665	-0.0714461
α_5	-0.00163141	-0.00181399	-0.00210373	-0.00175588	0.111361	0.182062

Cebada. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones 697 ppmv

Caso 1-Cebada: Rendimiento en las estaciones 7, 8 y 12

Tabla 55. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Cebada

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	59.2066	1.12548	52.6055	0.0000
V8	-31.0241	2.74409	-11.3058	0.0000
V7*V8	0.268815	0.0090719	29.6316	0.0000
V7^2	-0.137178	0.00370777	-36.9974	0.0000
V8^2	-0.113499	0.00217483	-52.1876	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	1.28392E11	5	2.56784E10	494094.54	0.0000
Residual	7.45778E7	1435	51970.6		
Total	1.28467E11	1440			

R-cuadrada = 99.9419 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9419 porciento

Error estándar del est. = 227.971

Error absoluto medio = 154.61

$$59.2066 \cdot X - 31.0241 \cdot Y + 0.268815 \cdot X \cdot Y - 0.137178 \cdot X^2 - 0.113499 \cdot Y^2$$

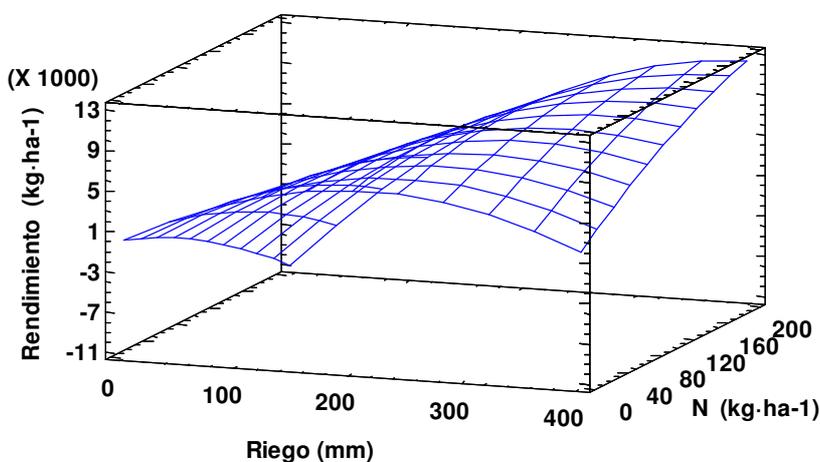


Figura 56. Gráfico de Superficie Caso 1-Cebada

Caso 2 - Cebada: Rendimiento estación 13.

Tabla 56. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Cebada.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	71.4484	2.57734	27.7218	0.0000
V8	-17.7796	5.12585	-3.46861	0.0006
V7*V8	0.253948	0.0189233	13.4199	0.0000
V7^2	-0.184405	0.00916403	-20.1227	0.0000
V8^2	-0.114454	0.00396329	-28.8785	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	5.11984E10	5	1.02397E10	226387.70	0.0000
Residual	2.25701E7	499	45230.7		
Total	5.12209E10	504			

R-cuadrada = 99.9559 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9556 porciento

Error estándar del est. = 212.675

Error absoluto medio = 162.215

$$71.4484 \cdot X - 17.7796 \cdot Y + 0.253948 \cdot X \cdot Y - 0.184405 \cdot X^2 - 0.114454 \cdot Y^2$$

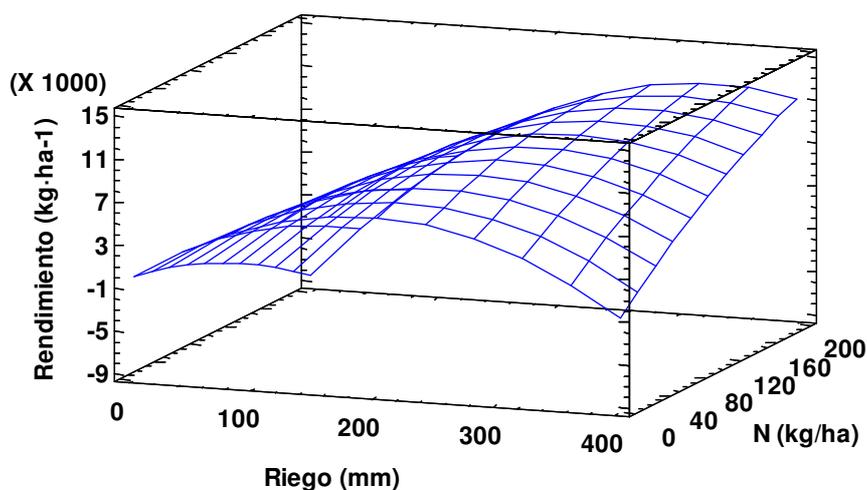


Figura 57. Gráfico de Superficie Caso 2-Cebada.

Caso 3-Cebada. Rendimiento para las estaciones meteorológicas 9, 14, 17, 18 y 19.

Tabla 57. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Cebada.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	53.3646	0.972851	54.8539	0.0000
V8	8.59346	2.19286	3.91883	0.0001
V7*V8	0.151212	0.0072695	20.8009	0.0000
V7^2	-0.111353	0.00326926	-34.0607	0.0000
V8^2	-0.114186	0.00174556	-65.4149	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	2.70842E11	5	5.41685E10	831980.70	0.0000
Residual	1.60947E8	2472	65107.9		
Total	2.71003E11	2477			

R-cuadrada = 99.9406 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9405 porciento

Error estándar del est. = 255.162

Error absoluto medio = 175.869

$$53.3646 \cdot X + 8.59346 \cdot Y + 0.151212 \cdot X \cdot Y - 0.111353 \cdot X^2 - 0.114186 \cdot Y^2$$

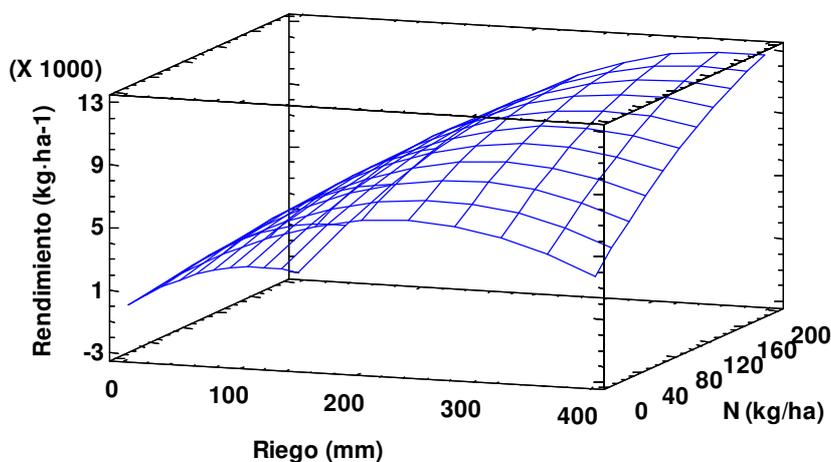


Figura 58. Gráfico de Superficie Caso 3-Cebada.

Caso 4-Cebada. Rendimiento para suelo 6461 (Bg).

Tabla 58. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Cebada.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	26.0821	5.49675	4.745	0.0000
V8	41.6014	11.7519	3.53998	0.0004
V7^2	0.0422548	0.0410477	1.02941	0.3038
V8^2	-0.0196361	0.0188742	-1.04037	0.2987
V7*V8	-0.134111	0.00886224	-15.1329	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	5.09942E10	5	1.01988E10	31600.31	0.0000
Residual	1.59436E8	494	322745.		
Total	5.11536E10	499			

R-cuadrada = 99.6883 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.6858 por ciento

Error estándar del est. = 568.106

Error absoluto medio = 521.306

$$26.0821 * X + 41.6014 * Y + 0.0422548 * X * Y - 0.0196361 * X^2 - 0.134111 * Y^2$$

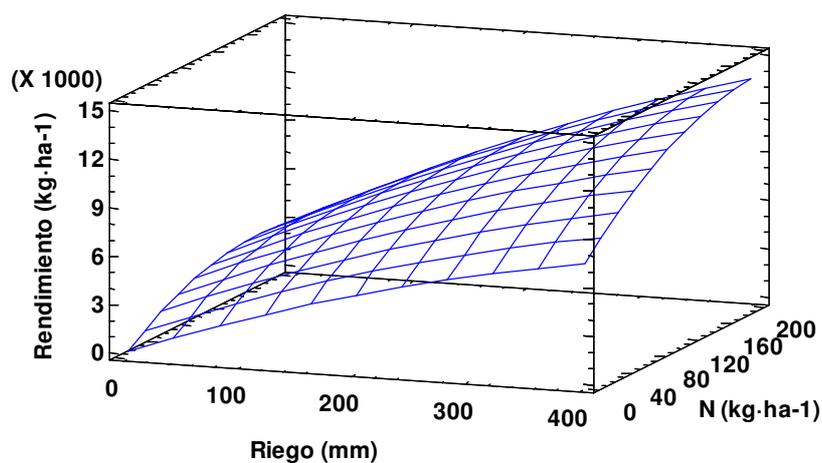


Figura 59. Gráfico de Superficie Caso 4-Cebada.

Caso 5-Cebada. Rendimiento para los suelos $\diamond 6461$ (tipo Bk).

Tabla 59. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Cebada.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	56.056	1.46839	38.1752	0.0000
V8	17.8855	3.3923	5.27237	0.0000
V7^2	0.108774	0.0113018	9.6245	0.0000
V8^2	-0.123135	0.00491251	-25.0656	0.0000
V7*V8	-0.103958	0.00289768	-35.8764	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	3.98454E11	5	7.96908E10	288122.38	0.0000
Residual	1.08339E9	3917	276587.		
Total	3.99537E11	3922			

R-cuadrada = 99.7288 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.7286 por ciento

Error estándar del est. = 525.915

Error absoluto medio = 455.831

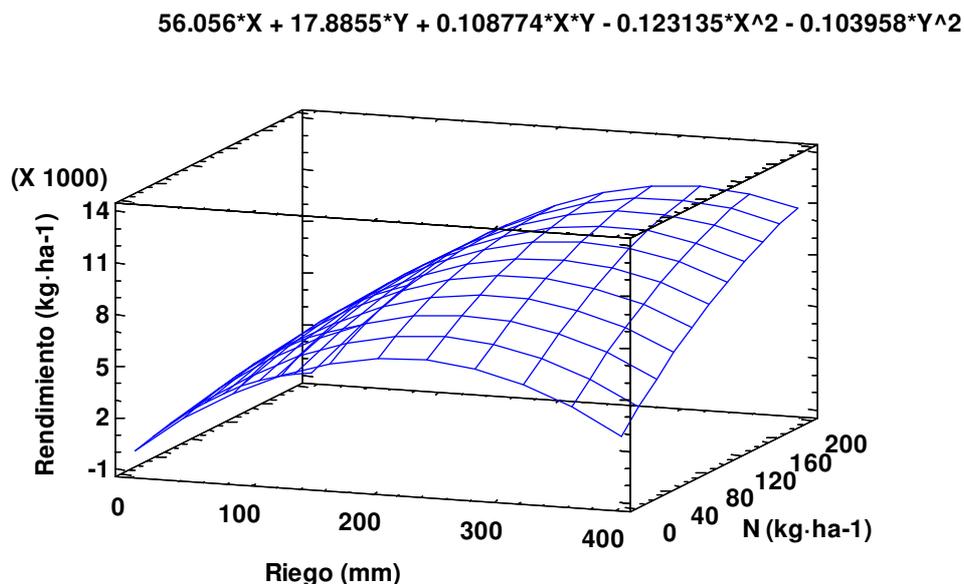


Figura 60. Gráfico de Superficie Caso 5-Cebada.

Caso 6-Cebada. Lixiviado para las estaciones meteorológicas = 7, 8 y 12.

Tabla 30. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6-Cebada.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	0.696796	0.128848	4.39995	0.0000
V8	-0.584489	0.268162	-1.80422	0.0720
V7^2	-0.00167904	0.000963264	2.53003	0.0118
V8^2	0.000138588	0.000452452	-2.86787	0.0044
V7*V8	0.00224871	0.00016828	-2.66542	0.0080

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	2.16256E6	5	432513.	4898.15	0.0000
Residual	34967.3	396	88.3012		
Total	2.19753E6	401			

R-cuadrada = 98.9394 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.9394porciento

Error estándar del est. = 7.25043

Error absoluto medio = 4.73442

$$0.696796 * X - 0.584489 * Y + 0.00224871 * X * Y - 0.00167904 * X^2 + 0.000138588 * Y^2$$

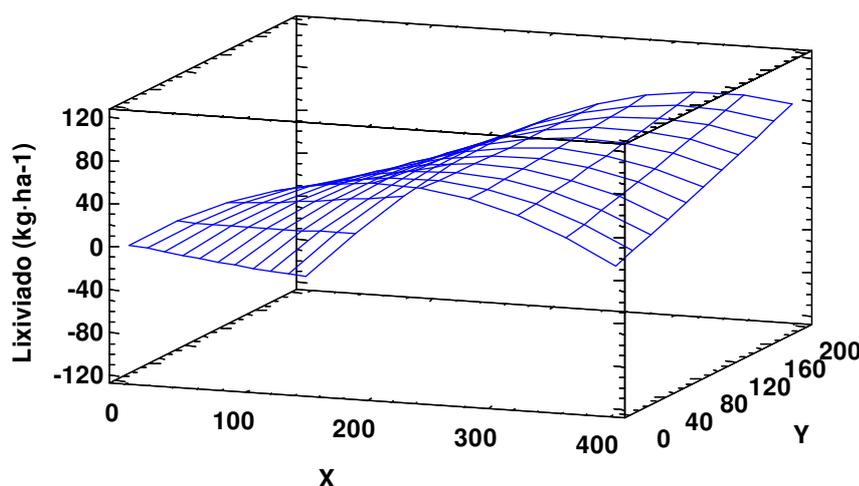


Figura 61. Gráfico de Superficie Caso 6-Cebada.

Caso 7-Cebada. Lixiviado para suelos 6461 (tipo Bg).

Tabla 61. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 7-Cebada.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	0.566926	0.128848	4.39995	0.0000
V8	-0.483822	0.268162	-1.80422	0.0720
V7*V8	0.00243708	0.000963264	2.53003	0.0118
V7^2	-0.00129758	0.000452452	-2.86787	0.0044
V8^2	-0.000448535	0.00016828	-2.66542	0.0080

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	2.16256E6	5	432513.	4898.15	0.0000
Residual	34967.3	396	88.3012		
Total	2.19753E6	401			

R-cuadrada = 98.4088 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.3927 por ciento

Error estándar del est. = 9.39687

Error absoluto medio = 8.30137

$$0.566926*X - 0.483822*Y + 0.00243708*X*Y - 0.00129758*X^2 - 0.000448535*Y^2$$

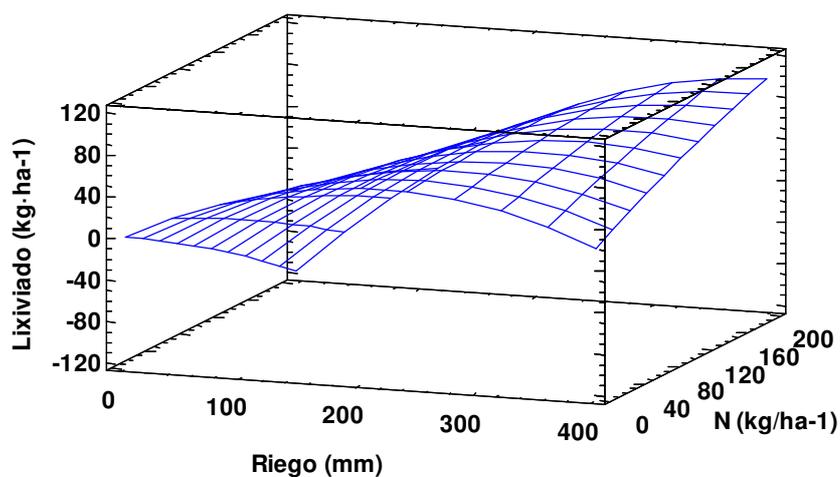


Figura 62. Gráfico de Superficie Caso 7-Cebada.

Caso 8-Cebada. Lixiviado para suelos \diamond 6461 (tipo Bk).

Tabla 62. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 8-Cebada.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	0.199621	0.0353897	5.64066	0.0000
V8	-0.439873	0.0817578	-5.3802	0.0000
V7*V8	0.00198039	0.000272384	7.27058	0.0000
V7^2	-0.000197328	0.000118397	-1.66667	0.0956
V8^2	-0.000136047	0.000069837	-1.94807	0.0514

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	1.17173E7	5	2.34346E6	14586.66	0.0000
Residual	629297.	3917	160.658		
Total	1.23466E7	3922			

R-cuadrada = 94.9031 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 94.8979 por ciento

Error estándar del est. = 12.6751

Error absoluto medio = 8.03335

$$0.199621 \cdot X - 0.439873 \cdot Y + 0.00198039 \cdot X \cdot Y - 0.000197328 \cdot X^2 - 0.000136047 \cdot Y^2$$

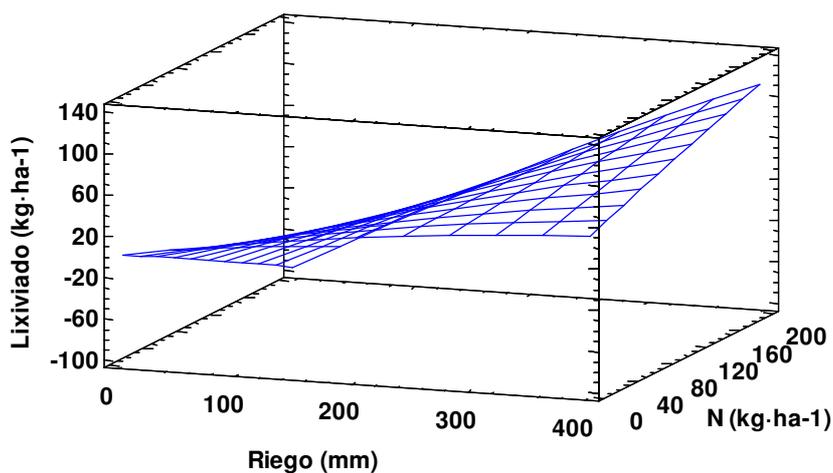


Figura 63. Gráfico de Superficie Caso 8-Cebada.

Finalmente en la Tabla 63 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción y lixiviado ajustadas en Cebada.

Tabla 63. Resumen funciones de producción ajustadas en Cebada, escenario de emisiones 697 ppmv.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
α_1	59.2066	71.4484	53.3646	26.0821	56.056	0.696796
α_2	-31.0241	-17.7796	8.59346	41.6014	17.8855	-0.584489
α_3	0.268815	0.253948	0.151212	0.0422548	0.108774	0.00224871
α_4	-0.137178	-0.184405	-0.111353	-0.0196361	-0.123135	0.00167904
α_5	-0.113499	-0.114454	-0.114186	-0.134111	-0.103958	0.000138588

Parámetro	Caso 7	Caso 8
α_1	0.566926	0.199621
α_2	-0.483822	-0.439873
α_3	0.00243708	0.00198039
α_4	-0.00129758	-0.000197328
α_5	-0.0004485	-0.000136

Donde Y (rendimiento, kg/ha) o L (N-lixiviado, kg/ha) = $\alpha_1 \cdot X + \alpha_2 \cdot Y + \alpha_3 \cdot X \cdot Y + \alpha_4 \cdot X^2 + \alpha_5 \cdot Y^2$

Siendo X el riego (mm) y Y el N-fertilizante (kg/ha).

Trigo. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones actual (360 ppmv)

Caso 1-Trigo: N-lixiviado en suelo tipo 6461 (Bg)

Tabla 64. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Trigo

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
V7	0.262015	0.0143355	18.2774	0.0000
V8	0.330488	0.0393594	8.39666	0.0000
V8^2	0.000966314	0.000277772	3.4788	0.0006
V7*V8	-0.00126535	0.000188346	-6.71819	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	1.25534E6	4	313836.	2136.70	0.0000
Residual	33047.6	225	146.878		
Total	1.28839E6	229			

R-cuadrada = 97.435 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.4008 porciento

Error estándar del est. = 12.1193

Error absoluto medio = 10.2791

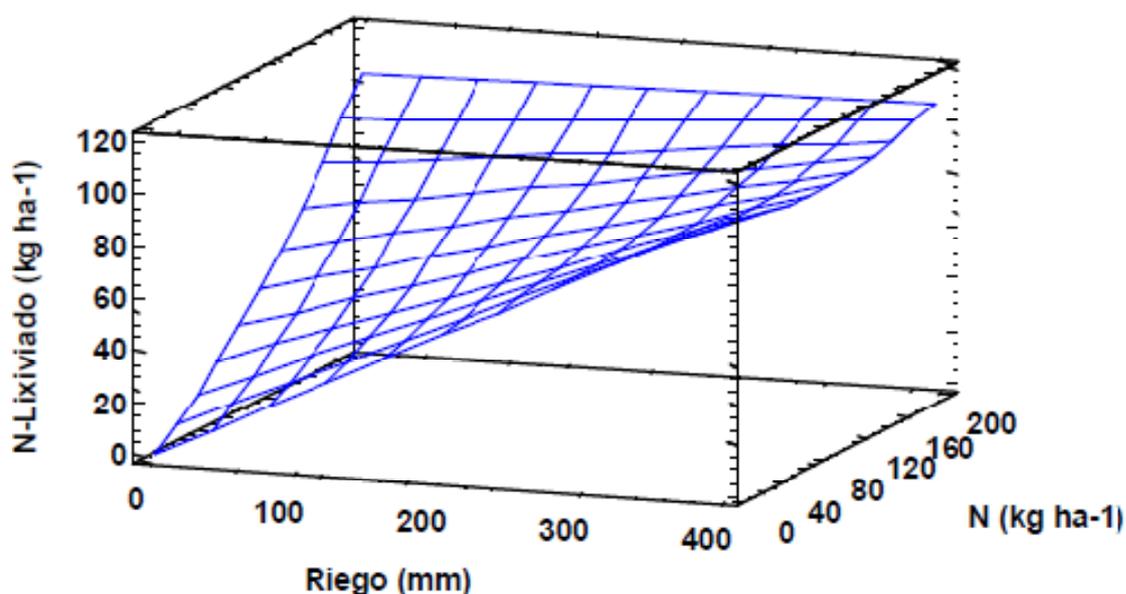


Figura 64. Gráfico de Superficie Caso 1-Trigo

Caso 2 - Trigo: N-lixiviado en suelo \diamond 6461. (Suelos Bk)

Tabla 65. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Trigo

		Standard	T	
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
V7	0.174099	0.024215	7.18973	0.0000
V8	0.330265	0.0216222	15.2744	0.0000
V7 ²	0.000265534	0.000119365	2.22455	0.0261
V8 ²	0.000878559	0.000123575	7.10955	0.0000
V7*V8	-0.00147577	0.0000866329	-17.0348	0.0000

Análisis de Varianza

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	3.72184E6	5	744367.	7414.70	0.0000
Residual	99186.0	988	100.391		
Total	3.82102E6	993			

R-cuadrada = 97.4042 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.3937 por ciento

Error estándar del est. = 10.0195

Error absoluto medio = 8.23751

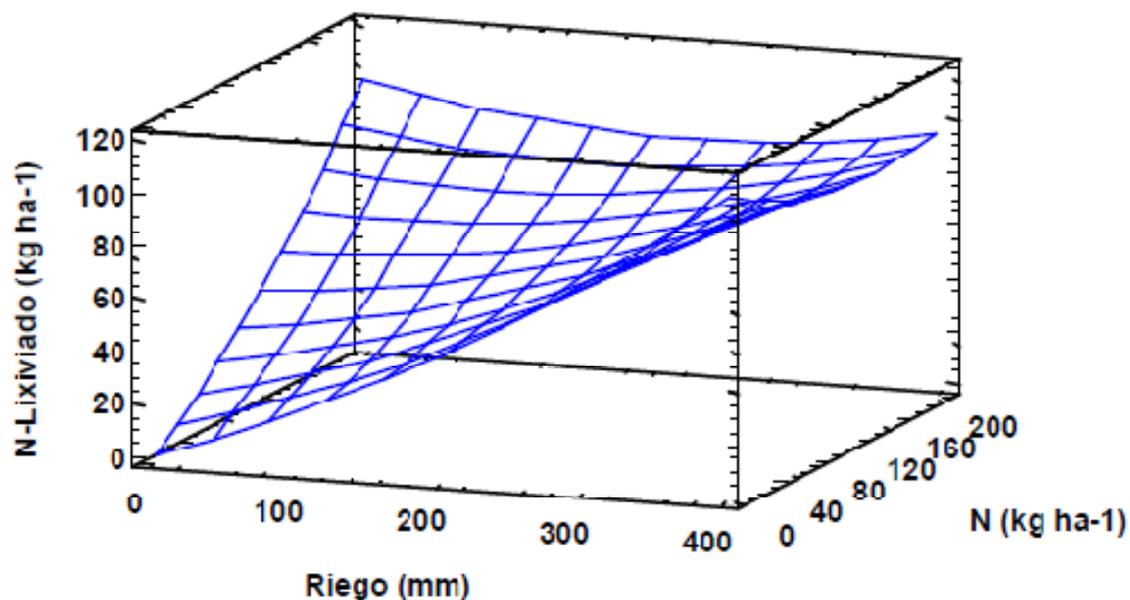


Figura 65. Gráfico de Superficie Caso 2-Trigo

Caso 3 - Trigo: N-lixiviado en estación meteorológica 18

Tabla 66. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Trigo

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
V8	0.311898	0.0245002	12.7304	0.0000
V7^2	0.00105304	0.0000380528	27.6732	0.0000
V8^2	0.00109896	0.000211991	5.18397	0.0000
V7*V8	-0.00176456	0.000111748	-15.7905	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	395674.	4	98918.5	4065.81	0.0000
Residual	4063.0	167	24.3293		
Total	399737.	171			

R-cuadrada = 98.9836 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.9653 por ciento

Error estándar del est. = 4.93248

Error absoluto medio = 3.61206

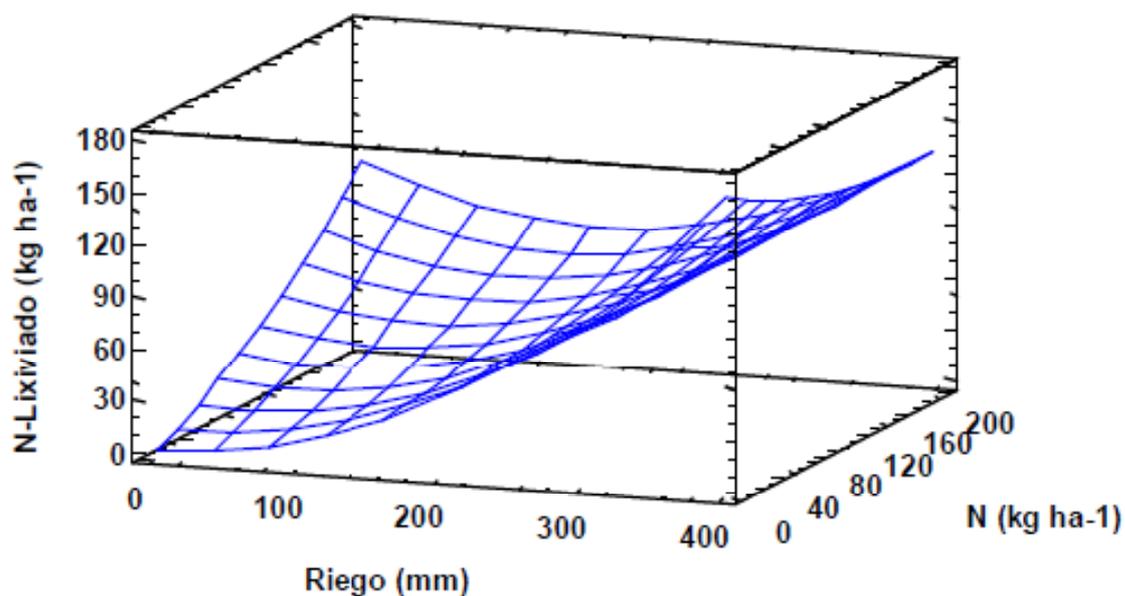


Figura 66. Gráfico de Superficie Caso 3-Trigo

Caso 4 - Trigo: N-lixiviado en estación meteorológica 8 y 12.

Tabla 67. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4-Trigo

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
V7	0.283354	0.00944913	29.9873	0.0000
V8	0.292295	0.0271354	10.7717	0.0000
V8^2	0.00144163	0.000202059	7.13469	0.0000
V7*V8	-0.00157595	0.000115295	-13.6688	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	2.13881E6	4	534703.	5481.03	0.0000
Residual	38827.0	398	97.5553		
Total	2.17764E6	402			

R-cuadrada = 98.217 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.2036 por ciento

Error estándar del est. = 9.87701

Error absoluto medio = 7.7319

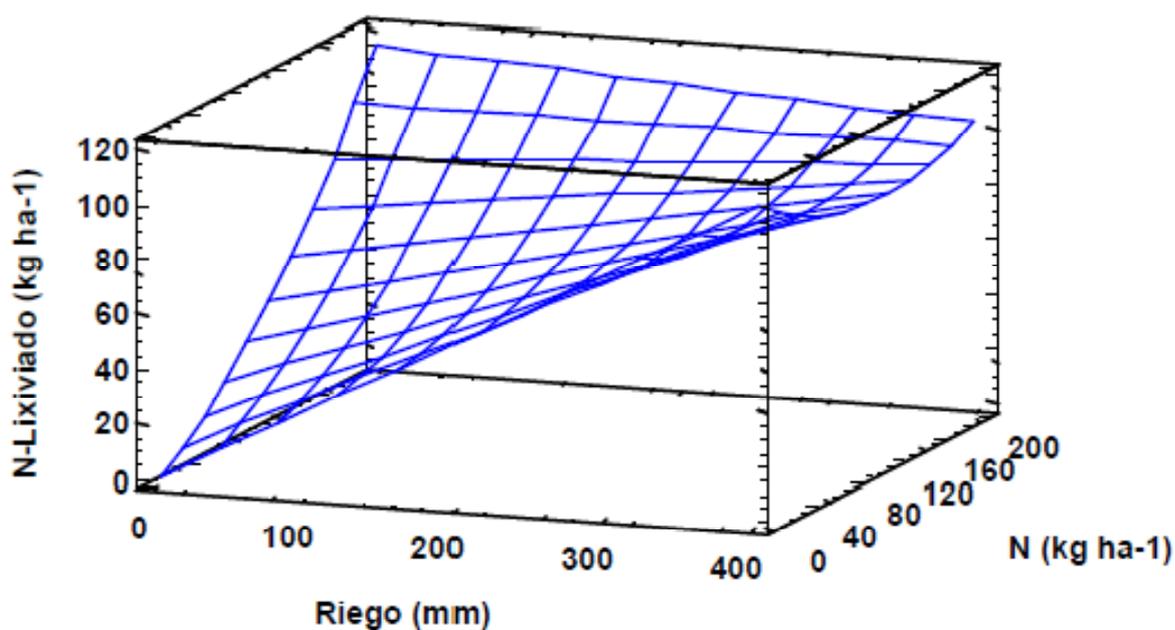


Figura 67. Gráfico de Superficie Caso 4-Trigo

Caso 5 - Trigo: N-lixiviado en estación meteorológica \diamond 8, 12 y 18.

Tabla 68. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Trigo

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
V7	0.235382	0.00578474	40.6901	0.0000
V8	0.297706	0.0171545	17.3544	0.0000
V8^2	0.00103251	0.000122846	8.40493	0.0000
V7*V8	-0.00141386	0.0000760534	-18.5903	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	4.94985E6	4	1.23746E6	9446.19	0.0000
Residual	159560.	1218	131.001		
Total	5.10941E6	1222			

R-cuadrada = 96.8771 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96.8695 por ciento

Error estándar del est. = 11.4456

Error absoluto medio = 9.36322

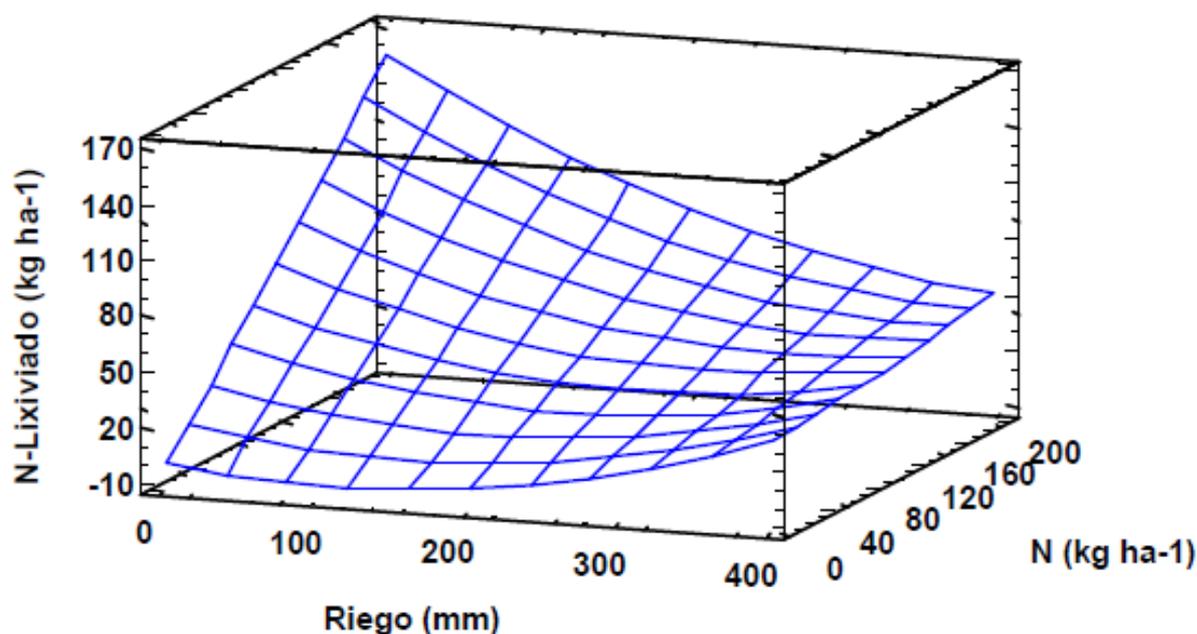


Figura 68. Gráfico de Superficie Caso 5-Trigo

Caso 6-Trigo. Rendimiento para las estaciones meteorológicas 7, 8 y 9.

Tabla 69. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6 - Trigo.

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
V7	24.7552	0.517696	47.8181	0.0000
V7 ²	-0.0331671	0.00158308	-20.951	0.0000
V8 ²	-0.0874372	0.00418826	-20.8768	0.0000
V7*V8	0.0822875	0.00238394	34.5174	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	1.27507E10	4	3.18768E9	92832.84	0.0000
Residual	1.13315E7	330	34337.9		
Total	1.27621E10	334			

R-cuadrada = 99.9112 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9104 por ciento

Error estándar del est. = 185.305

Error absoluto medio = 129.789

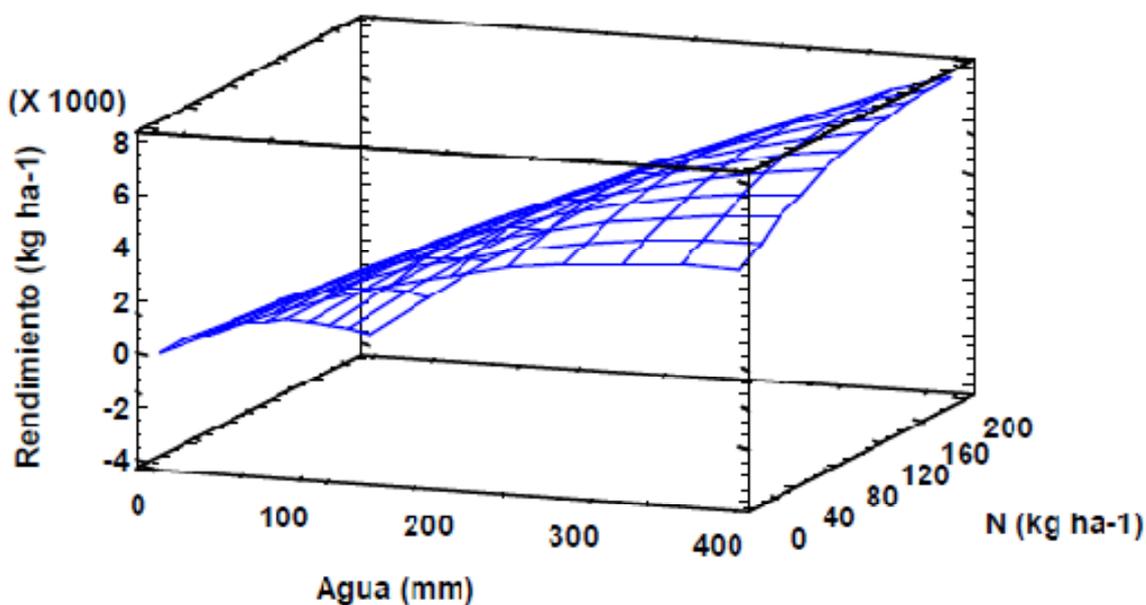


Figura 69. Gráfico de Superficie Caso 6-Trigo.

Caso 7-Trigo. Rendimiento para las estaciones meteorológicas $\diamond 7, 8 \text{ y } 9.$

Tabla 70. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 7 - Trigo.

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
V7	35.6125	1.65497	21.5186	0.0000
V8	-22.9906	3.77523	-6.08985	0.0000
V7 ²	-0.065011	0.00485898	-13.3795	0.0000
V8 ²	-0.0850417	0.0034066	-24.9638	0.0000
V7*V8	0.156975	0.0108361	14.4863	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	5.2824E10	5	1.05648E10	115834.74	0.0000
Residual	1.10998E8	1217	91205.9		
Total	5.2935E10	1222			

R-cuadrada = 99.7903 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.7896 por ciento

Error estándar del est. = 302.003

Error absoluto medio = 252.238

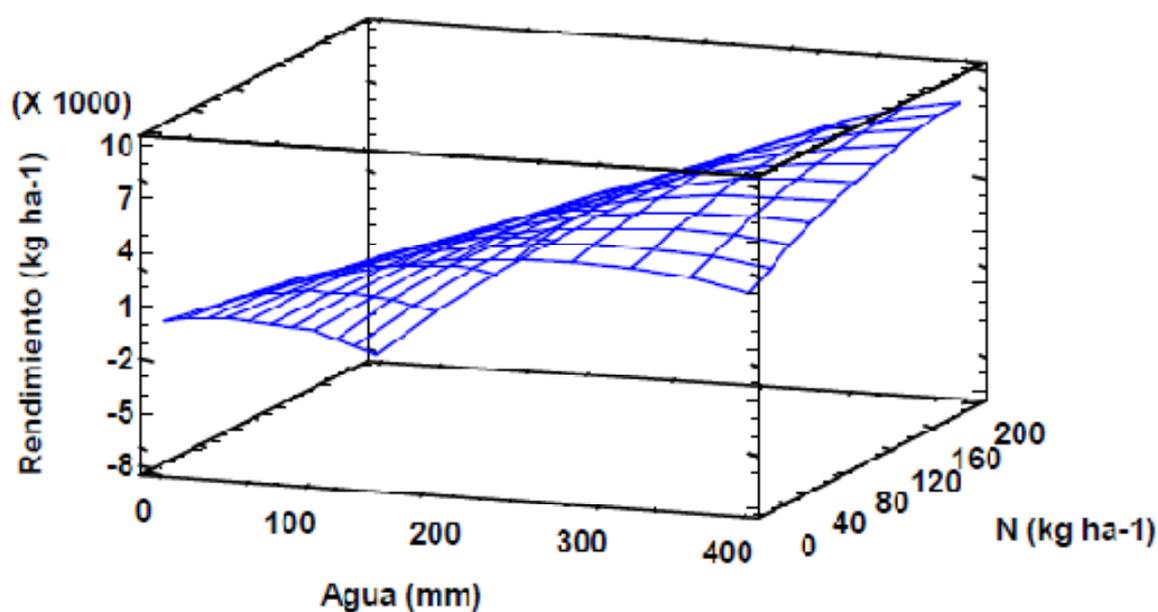


Figura 70. Gráfico de Superficie Caso 7-Trigo.

Finalmente en la Tabla 71 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción y lixiviado ajustadas en Trigo.

Tabla 71. Resumen funciones de producción ajustadas en Trigo, escenario de emisiones 360 ppmv.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
α_1	0.262015	0.174099	-	0.283354	0.235382
α_2	0.330488	0.330265	0.311898	0.292295	0.297706
α_3	-	0.000265534	0.00105304	-	-
α_4	0.000966314	0.000878559	0.00109896	0.00144163	0.00103251
α_5	-0.00126535	-0.00147577	-0.00176456	-0.00157595	-0.00141386

Parámetro	Caso 6	Caso 7
α_1	24.7552	35.6125
α_2	-	-22.9906
α_3	-0.0331671	-0.065011
α_4	-0.0874372	-0.0850417
α_5	0.0822875	0.156975

Maíz. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones actual (360 ppmv)

Caso 1-Maiz: N-lixiviado en suelo tipo 6461 (Bg)

Tabla 72. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Maiz

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	0.0918991	0.00835458	10.9999	0.0000
V8	0.648441	0.0398419	16.2754	0.0000
V7^2	-	-	-	-
V8^2	0.00100174	0.000158218	6.33139	0.0000
V7*V8	-0.00130572	0.0000657859	-19.8481	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	4.46137E6	4	1.11534E6	1657.29	0.0000
Residual	255737	380	672.993		
Total	4.71711E6	384			

R-cuadrada = 94.5785 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 94.5357 por ciento

Error estándar del est. = 25.9421

Error absoluto medio = 20.9399

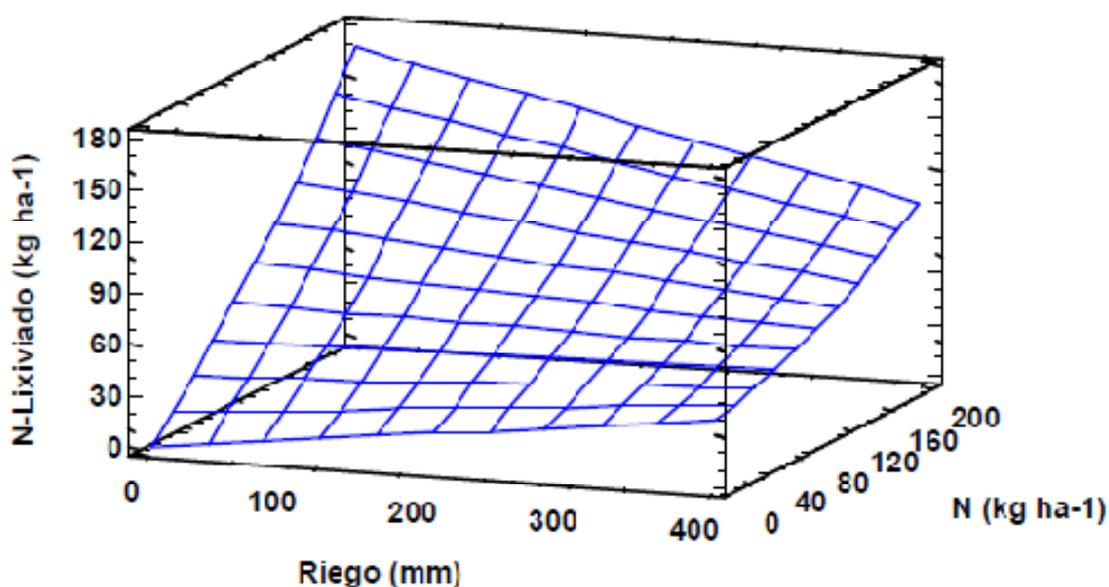


Figura 71. Gráfico de Superficie Caso 1-Maiz

Caso 2 - Maíz: N-lixiviado en suelo \diamond 6461. (Suelos Bk)

Tabla 73. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Maiz.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	-0.191573	0.0199429	-9.60611	0.0000
V8	0.891791	0.0245527	36.3216	0.0000
V7^2	0.000444705	0.0000346393	12.8381	0.0000
V8^2	0.000772655	0.0000622053	12.421	0.0000
V7*V8	-0.00170726	0.0000512729	-33.2975	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	1.1791E7	5	2.35821E6	5328.84	0.0000
Residual	762490.	1723	442.537		
Total	1.25535E7	1728			

R-cuadrada = 93.9261 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 93.912 por ciento

Error estándar del est. = 21.0366

Error absoluto medio = 16.394

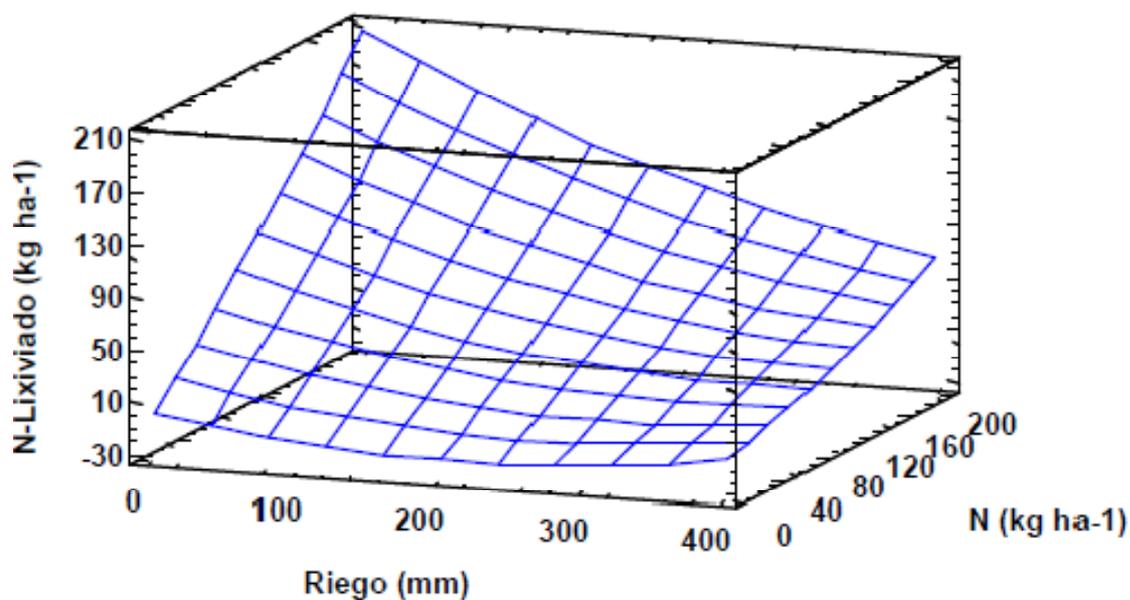


Figura 72. Gráfico de Superficie Caso 2-Maiz.

Caso 3-Maiz. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas 7 y 8.

Tabla 74. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Maiz.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	-0.695428	0.0660306	-10.5319	0.0000
V8	1.36281	0.0668947	20.3725	0.0000
V7^2	0.00149816	0.000125033	11.9821	0.0000
V8^2	0.00199522	0.000113822	17.5293	0.0000
V7*V8	-0.00318935	0.000173432	-18.3896	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	6.8926E6	5	1.37852E6	5929.90	0.0000
Residual	110591	475	232.823		
Total	7.00319E6	480			

R-cuadrada = 98.4209 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.4076 porciento

Error estándar del est. = 15.2585

Error absoluto medio = 11.8057

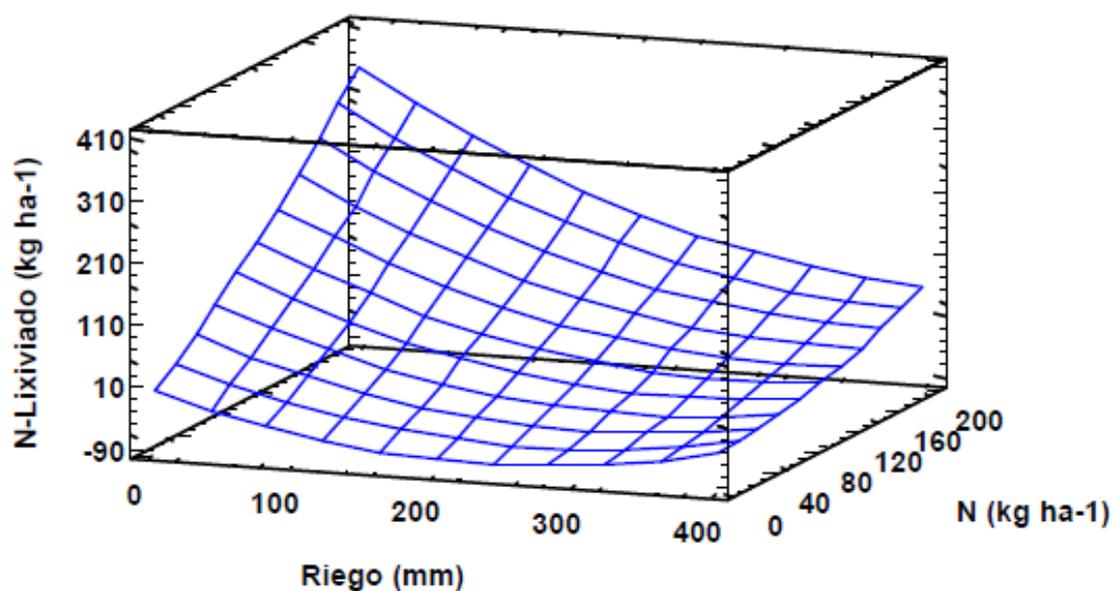


Figura 73. Gráfico de Superficie Caso 3-Maiz.

Caso 4-Maíz. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas = 12.

Tabla 75. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Maíz.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	-0.322916	0.0211842	-15.2433	0.0000
V8	1.07515	0.0228513	47.0499	0.0000
V7^2	0.000650875	0.0000358331	18.1641	0.0000
V8^2	0.0010556	0.0000766283	13.7756	0.0000
V7*V8	-0.00205253	0.0000497437	-41.2621	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	2.67428E6	5	534856.	6406.37	0.0000
Residual	20955.5	251	83.4882		
Total	2.69524E6	256			

R-cuadrada = 99.2225 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.2101 porciento

Error estándar del est. = 9.13719

Error absoluto medio = 5.65996

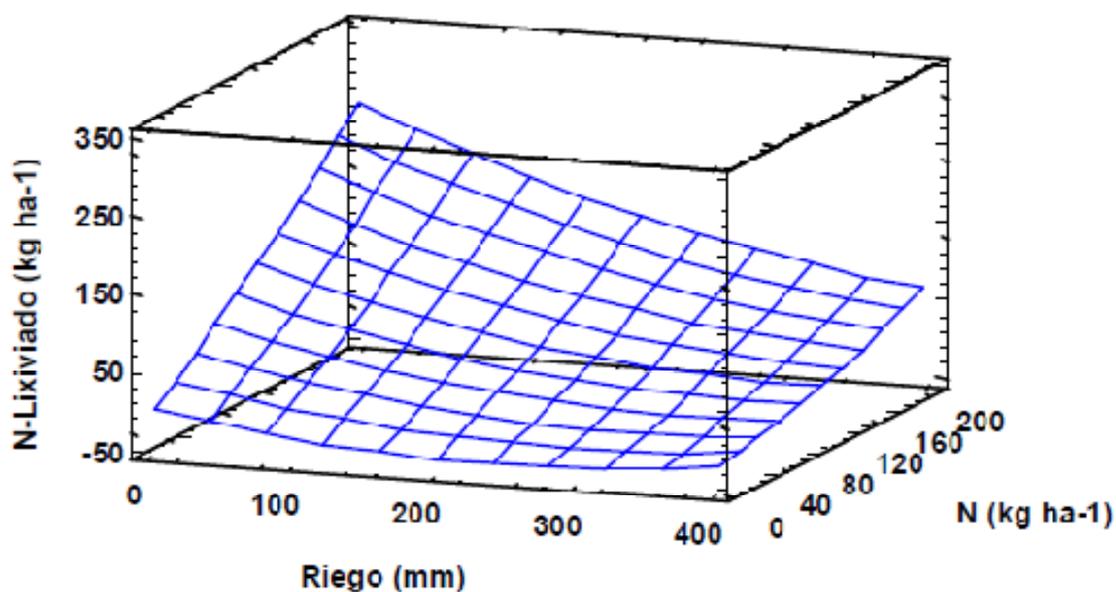


Figura 74. Gráfico de Superficie Caso 4-Maíz.

Caso 5-Maíz. N-lixiviado para las estaciones meteorológicas \diamond 7, 8 y 12.

Tabla 76. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Maíz.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	-0.116219	0.0214919	-5.40758	0.0000
V8	0.824563	0.0261649	31.5141	0.0000
V7 ²	0.000324082	0.0000375858	8.62245	0.0000
V8 ²	0.000802439	0.0000656089	12.2306	0.0000
V7*V8	-0.00158957	0.0000553249	-28.7315	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	1.60195E7	5	3.2039E6	5395.67	0.0000
Residual	1.25112E6	2107	593.792		
Total	1.72706E7	2112			

R-cuadrada = 92.7558 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92.742 por ciento

Error estándar del est. = 24.3678

Error absoluto medio = 18.6206

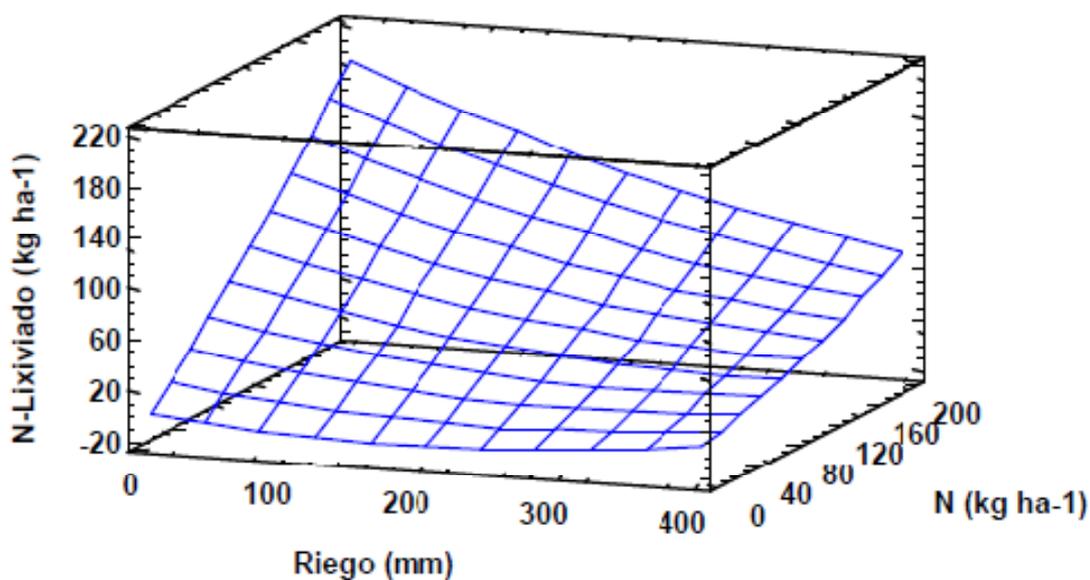


Figura 75. Gráfico de Superficie Caso 5-Maíz.

Caso 6-Maíz. Rendimiento para las estaciones meteorológicas = 7, 8 y 12.

Tabla 77. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6-Maíz.

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico	
V7	16.227	0.640937	25.3176	0.0000
V8	-6.41942	1.23199	-5.21061	0.0000
V7 ²	-0.0138635	0.00102653	-13.5052	0.0000
V8 ²	-0.0871676	0.00145285	-59.9976	0.0000
V7*V8	0.0830473	0.00209844	39.5758	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	6.2826E10	5	1.25652E10	128302.1	0.0000
Residual	7.15901E7	731	97934.5	1	
Total	6.28976E10	736			

R-cuadrada = 99.8862 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.8856 porciento

Error estándar del est. = 312.945

Error absoluto medio = 252.469

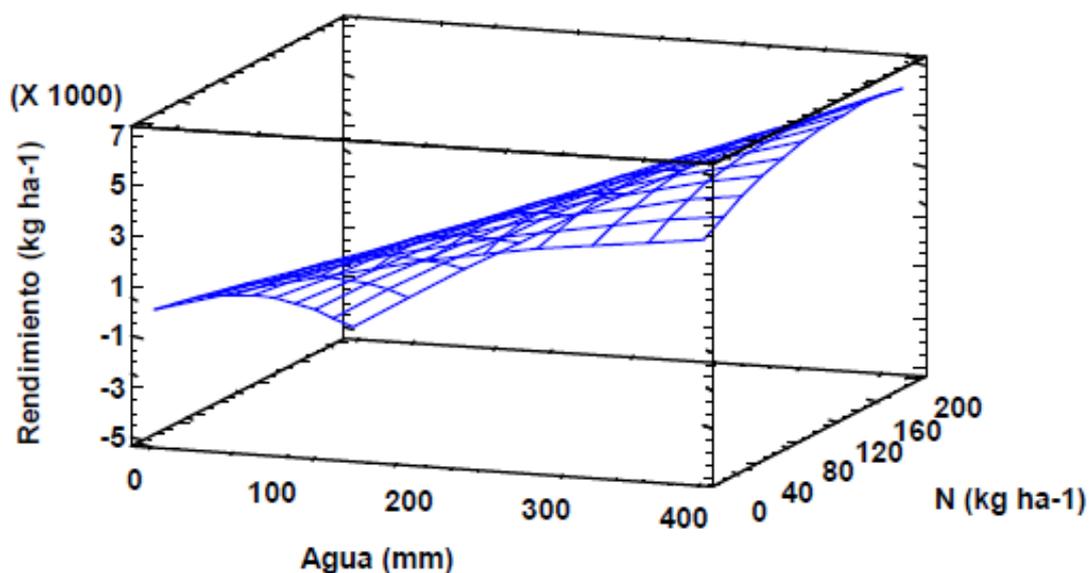


Figura 76. Gráfico de Superficie Caso 6-Maíz.

Caso 7-Maíz. Rendimiento para las estaciones meteorológicas $\diamond 7, 8 \text{ y } 12.$

Tabla 78. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 7-Maíz.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	19.499	1.08477	17.9751	0.0000
V8	-13.0302	2.14825	-6.06551	0.0000
V7 ²	-0.0188329	0.0017278	-10.9	0.0000
V8 ²	-0.0820494	0.0024624	-33.3209	0.0000
V7*V8	0.0974344	0.00356162	27.3568	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	2.14117E11	5	4.28235E10	51339.02	0.0000
Residual	1.75751E9	2107	834131.		
Total	2.15875E11	2112			

R-cuadrada = 99.1859 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.1843 porciento

Error estándar del est. = 913.308

Error absoluto medio = 761.725

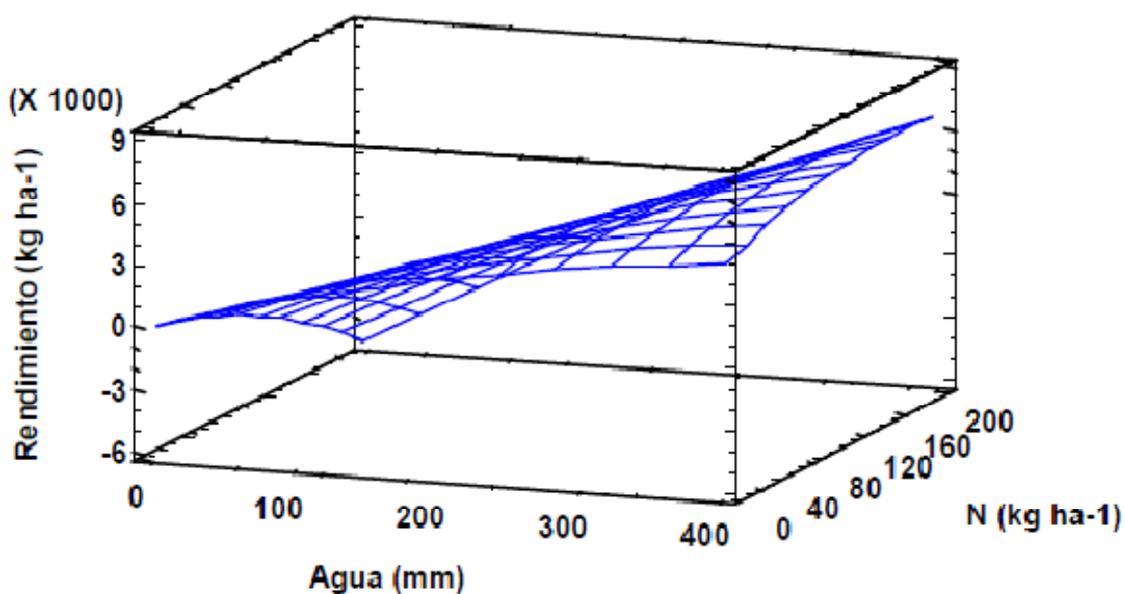


Figura 77. Gráfico de Superficie Caso 7-Maíz.

Finalmente en la Tabla 79 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción y lixiviado ajustadas en Maíz.

Tabla 79. Resumen funciones de producción ajustadas en Maíz, escenario de emisiones 360 ppmv.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
α_1	0.0918991	-0.191573	-0.695428	-0.322916	-0.116219	16.227	19.499
α_2	0.648441	0.891791	1.36281	1.07515	0.824563	-6.41942	-13.0302
α_3	-	0.000444705	0.00149816	0.000650875	0.000324082	-0.0138635	-0.0188329
α_4	0.00100174	0.000772655	0.00199522	0.0010556	0.000802439	-0.0871676	-0.0820494
α_5	-0.00130572	-0.00170726	-0.00318935	-0.00205253	-0.00158957	0.0830473	0.0974344

Cebada. Datos meteorológicos 2070-2100. Escenario de emisiones actual (360 ppmv)

Caso 1-Cebada: Rendimiento en las estaciones 7,8 y 12

Tabla 80. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 1-Cebada

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	64.3012	1.35949	47.2978	0.0000
V8	-38.4752	3.33558	-11.5348	0.0000
V7*V8	0.298708	0.011039	27.0593	0.0000
V7^2	-0.155032	0.00449488	-34.4908	0.0000
V8^2	-0.120243	0.00269077	-44.6874	0.0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	5.59183E10	5	1.11837E10	324066.33	0.0000
Residual	2.15345E7	624	34510.4		
Total	5.59399E10	629			

R-cuadrada = 99.9615 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9613 por ciento

Error estándar del est. = 185.77

Error absoluto medio = 125.277

$$V3*1000 = 64.3012*V7 - 38.4752*V8 + 0.298708*V7*V8 - 0.155032*V7^2 - 0.120243*V8^2$$

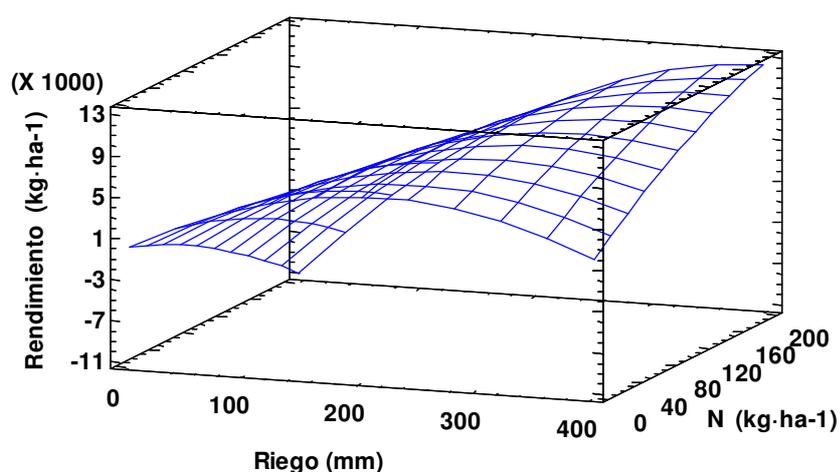


Figura 78. Gráfico de Superficie Caso 1-Cebada

Caso 2 - Cebada: Rendimiento estación 13.

Tabla 81. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 2-Cebada.

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P	
V7	72.6153	2.83051	25.6545	0.0000	
V8	-19.8599	5.5708	-3.565	0.0004	
V7*V8	0.261792	0.020568	12.7281	0.0000	
V7^2	-0.188633	0.0100896	-18.6957	0.0000	
V8^2	-0.114866	0.00412927	-27.8175	0.0000	

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	4.83985E10	5	9.67971E9	207656.93	0.0000
Residual	2.19552E7	471	46613.9		
Total	4.84205E10	476			

R-cuadrada = 99.9547 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9543 por ciento

Error estándar del est. = 215.903

Error absoluto medio = 166.609

Regresión cuadrática:

$$V3*1000 = 72.6153*V7 - 19.8599*V8 + 0.261792*V7*V8 - 0.188633*V7^2 - 0.114866*V8^2$$

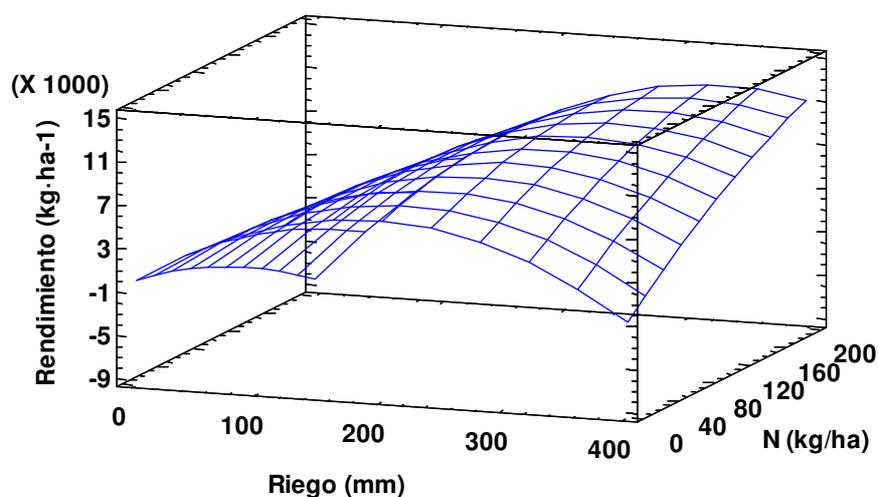


Figura 79. Gráfico de Superficie Caso 2-Cebada.

Caso 3-Cebada. Rendimiento para las estaciones meteorológicas 9, 14, 17, 18 y 19.

Tabla 82. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 3-Cebada.

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico	
V7	44.9333	2.20415	20.3858	0.0000
V8	28.0005	4.92743	5.68257	0.0000
V7*V8	0.097056	0.0161358	6.01495	0.0000
V7^2	-0.0842402	0.0073406	-11.4759	0.0000
V8^2	-0.133724	0.00391141	-34.1882	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	7.92533E10	5	1.58507E10	167118.03	0.0000
Residual	6.81002E7	718	94847.1		
Total	7.93214E10	723			

R-cuadrada = 99.91 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.91 por ciento

Error estándar del est. = 307.97

Error absoluto medio = 222.4

Regresión cuadrática: $V3*1000$

$$= 44.9333*V7 + 28.0005*V8 + 0.097056*V7*V8 - 0.0842402*V7^2 - 0.133724*V8^2$$

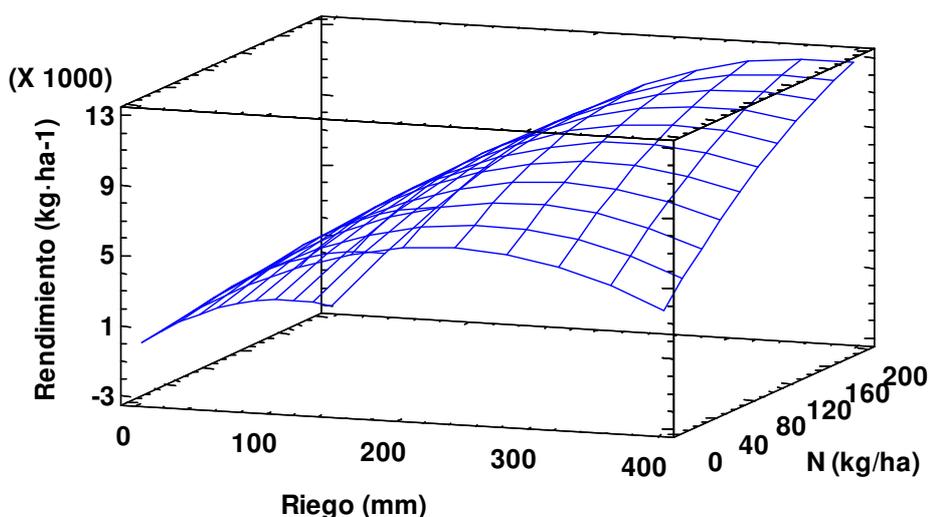


Figura 80. Gráfico de Superficie Caso 3-Cebada.

Caso 4-Cebada. Rendimiento para todos los suelos.

Tabla 83. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 4- Cebada.

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico	
V7	25.5717	7.84569	3.25933	0.0012
V8	58.5965	16.3708	3.57933	0.0004
V7^2	-0.0211298	0.0589178	-0.358631	0.7201
V8^2	-0.0168835	0.0275419	-0.613012	0.5403
V7*V8	-0.130716	0.0111973	-11.6739	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	3.38042E10	5	6.76084E9	20822.26	0.0000
Residual	1.06824E8	329	324693.		
Total	3.3911E10	334			

R-cuadrada = 99.685 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.68 porciento

Error estándar del est. = 569.8

Error absoluto medio = 524.76

Regresión cuadrática: $V3*1000 =$

$$25.5717*V7 + 58.5965*V8 - 0.0211298*V7*V8 - 0.0168835*V7^2 - 0.130716*V8^2$$

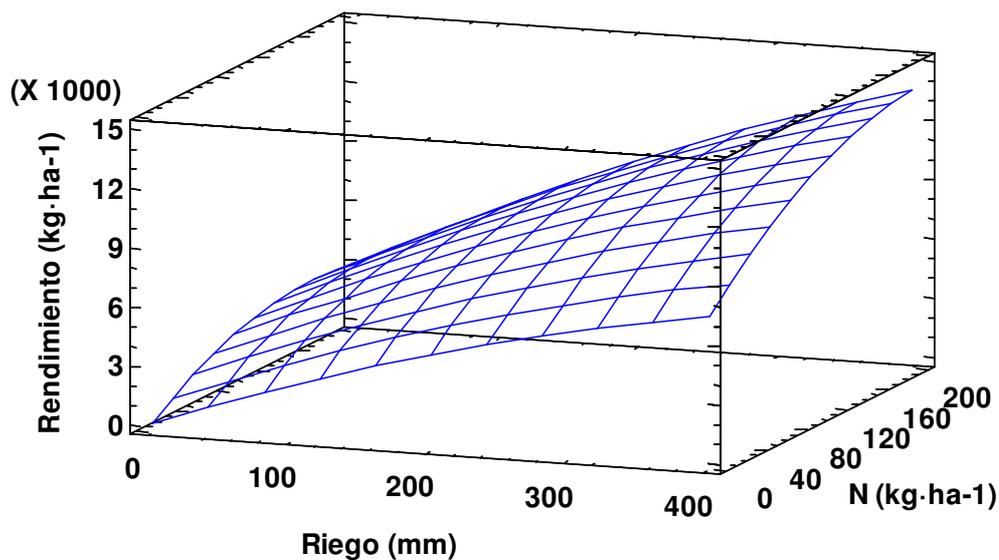


Figura 81. Gráfico de Superficie Caso 4-Cebada.

Caso 5-Cebada. Lixiviado para las estaciones meteorológicas = 7, 8 y 12.

Tabla 84. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 5-Cebada.

Parámetro	Estimación	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico	
V7	0.709201	0.054476	13.0186	0.0000
V8	-0.551154	0.133659	-4.12358	0.0000
V7^2	0.00204365	0.000442342	4.62006	0.0000
V8^2	-0.0016937	0.000180113	-9.4035	0.0000
V7*V8	0.000302573	0.000107821	2.80626	0.0050

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	3.23333E6	5	646665.	11670.08	0.0000
Residual	34577.2	624	55.4122		
Total	3.2679E6	629			

R-cuadrada = 98.94 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.935por ciento

Error estándar del est. = 7.44

Error absoluto medio = 4.79

Regresión cuadrática: V28 =

$$0.709201 \cdot V7 - 0.551154 \cdot V8 + 0.00204365 \cdot V7 \cdot V8 - 0.0016937 \cdot V7^2 + 0.00030257 \cdot V8^2$$

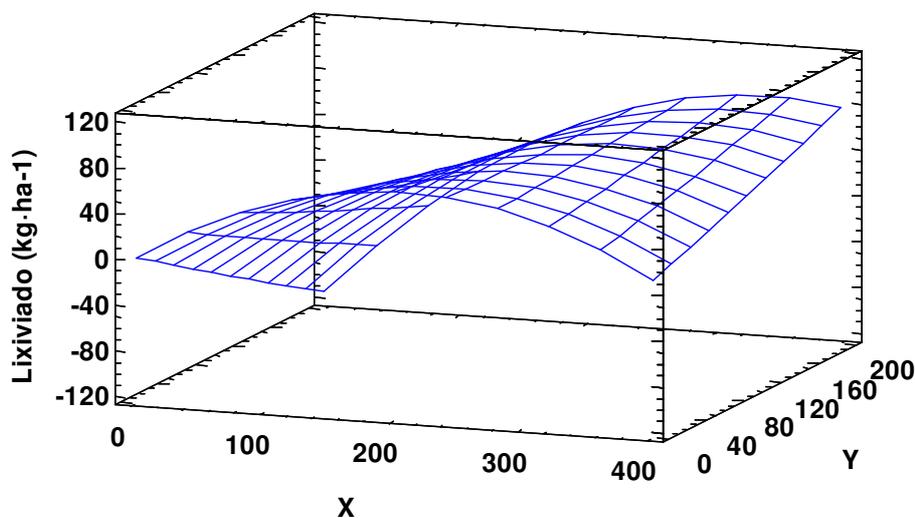


Figura 82. Gráfico de Superficie Caso 6-Cebada.

Caso 6-Cebada. Lixiviado para las estaciones meteorológicas $\sphericalangle 7, 8 \text{ y } 12$

Tabla 85. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 6-Cebada.

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
V7	0.399465	0.0462757	8.63229	0.0000
V8	-0.340274	0.102093	-3.33299	0.0009
V7*V8	0.00146366	0.000351865	4.15974	0.0000
V7^2	-0.000884795	0.00015799	-5.60032	0.0000
V8^2	0.00014186	0.0000862998	1.6438	0.1002

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Model	3.34555E6	5	669110.	8802.76	0.0000
Residual	90757.5	1194	76.0113		
Total	3.43631E6	1199			

R-cuadrada = 97.36 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.35 porciento

Error estándar del est. = 8.72

Error absoluto medio = 6.58

Regresión cuadrática: $V28 =$

$$0.399465 * V7 - 0.340274 * V8 + 0.00146366 * V7 * V8 - 0.0008848 * V7^2 + 0.0001419 * V8^2$$

Caso 7-Cebada. Lixiviado para suelos 6461 (tipo Bg).

Tabla 86. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 7-Cebada.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	Valor-P
V7	0.537078	0.124653	4.30859	0.0000
V8	-0.392951	0.2601	-1.51077	0.1318
V7*V8	0.00212076	0.000936088	2.26555	0.0241
V7^2	-0.00120451	0.000437586	-2.75262	0.0062
V8^2	-0.000505505	0.000177903	-2.84146	0.0048

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	1.71319E6	5	342639.	4180.44	0.0000
Residual	26965.6	329	81.9623		
Total	1.74016E6	334			

R-cuadrada = 98.45 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.43 porciento

Error estándar del est. = 9.05

Error absoluto medio = 7.685

Regresión cuadrática: $V28 =$

$$0.537078 \cdot V7 - 0.392951 \cdot V8 + 0.00212076 \cdot V7 \cdot V8 - 0.0012045 \cdot V7^2 - 0.0005055 \cdot V8^2$$

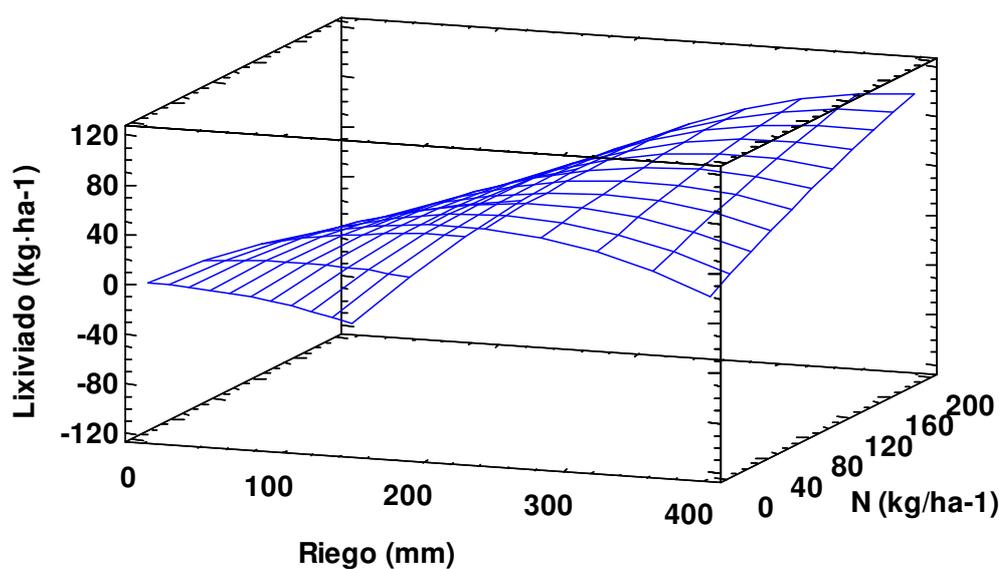


Figura 83. Gráfico de Superficie Caso 7-Cebada.

Caso 8-Cebada. Lixiviado para suelos \diamond 6461 (tipo Bk).

Tabla 87. Ajuste por mínimos cuadrados. Caso 8-Cebada.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	Valor-P
V7	0.233809	0.0447582	5.22383	0.0000
V8	-0.35469	0.103164	-3.43813	0.0006
V7*V8	0.00152145	0.000346157	4.39527	0.0000
V7^2	-0.000274391	0.000149833	-1.83131	0.0671
V8^2	0.000125862	0.0000901331	1.3964	0.1626

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Model	4.81426E6	5	962852.	9571.28	0.0000
Residual	149790.	1489	100.598		
Total	4.96405E6	1494			

R-cuadrada = 96.98 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96.97 por ciento

Error estándar del est. = 10.03

Error absoluto medio = 7.98

Regresión cuadrática: $V28 =$

$$0.233809 \cdot V7 - 0.35469 \cdot V8 + 0.00152145 \cdot V7 \cdot V8 - 0.00027439 \cdot V7^2 + 0.00012586 \cdot V8^2$$

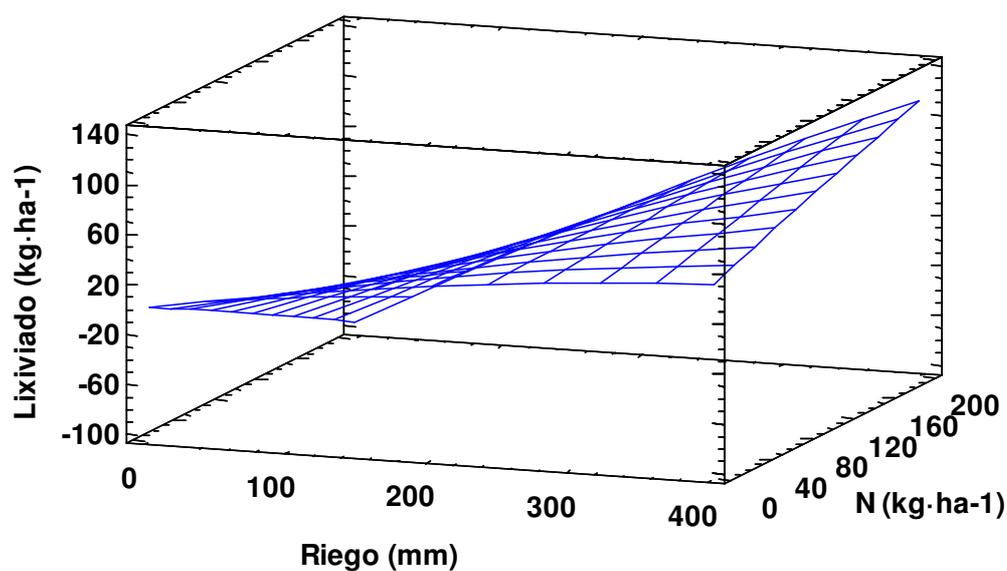


Figura 84. Gráfico de Superficie Caso 8-Cebada.

Finalmente en la Tabla 88 se resumen los coeficientes de todas las funciones de producción y lixiviado ajustadas en Cebada.

Tabla 88. Resumen funciones de producción ajustadas en Cebada, escenario de emisiones 360 ppmv.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
α_1	64.3012	72.6153	44.9333	25.5717	0.709201	0.399465
α_2	-38.4752	-19.8599	28.0005	58.5965	-0.551154	-0.340274
α_3	0.298708	0.261792	0.097056	-0.0211298	0.00204365	0.0146366
α_4	-0.155032	-0.18863	-0.0842402	-0.0168835	-0.0016937	-0.0008848
α_5	-0.120243	-0.114866	-0.133724	-0.130716	0.000302573	0.0001419

Parámetro	Caso 7	Caso 8
α_1	0.537078	0.233809
α_2	-0.392951	-0.35469
α_3	0.0212076	0.0152145
α_4	-0.00120451	-0.000274391
α_5	-0.000506	0.00012586

Donde Y (rendimiento, kg/ha) o L (N-lixiviado, kg/ha) = $\alpha_1 \cdot X + \alpha_2 \cdot Y + \alpha_3 \cdot X \cdot Y + \alpha_4 \cdot X^2 + \alpha_5 \cdot Y^2$

Siendo X el riego (mm) y Y el N-fertilizante (kg/ha).

B.4. Síntesis y Conclusiones

En el presente capítulo se ha evaluado la demanda de agua de los cultivos en situación de cambio climático. Dado que este proyecto científico pretende servir de herramienta para utilizar estas demandas en un modelo hidroeconómico y otro de transporte de contaminantes, se ha considerado que la mejor opción es la de elaborar funciones de producción de lixiviados y de rendimiento de los cultivos a partir de series climáticas futuras y de escenarios de emisiones de CO₂. Estas funciones de producción proporcionan, al igual que se hizo en el capítulo anterior, la relación funcional existente entre el rendimiento del cultivo o la producción de lixiviados y los factores de producción implicados en su consecución (aportación de agua y N-fertilización. En este caso además bajo la situación de cambio climático.

La metodología de obtención de las funciones de producción y la descripción del modelo de simulación empleado se detalla en el Capítulo A. La metodología de obtención de las series meteorológicas de cambio climático para el periodo 2070-2100, escenario A1B, se detalla en el

epígrafe 3.4.1 y los valores de las medias mensuales se muestran a continuación es el presente epígrafe.

Siguiendo la tendencia encontrada en la literatura específica, se han simulado los rendimientos futuros bajo la hipótesis de escenario de emisiones con elevadas concentraciones de CO₂ (697 ppmv) o bajo la hipótesis de que no se considerara el cambio en la concentración de CO₂ en los cálculos (es decir, manteniendo las condiciones actuales de 360 ppmv de CO₂ atmosférico).

La metodología se aplica al Sistema de la Mancha Oriental (MOS), obteniéndose las funciones de producción y lixiviado de nitratos en las nuevas condiciones.

Seguidamente, compararemos los resultados obtenidos bajo los distintos escenarios, para validar los resultados obtenidos. Para ello se han obtenido las funciones de producción ajustadas para los tres supuestos: situación climática actual, escenario de cambio climático A1B sin enriquecimiento de CO₂ (360 ppmv) y bajo el escenario de cambio climático con las emisiones A1B (697 ppmv).

Se ha fijado la concentración de fertilizante habitual y se ha buscado el valor de riego que maximice el rendimiento para cada cultivo. Los valores de fertilizante nitrogenado fijados fueron 300 kg/ha para el maíz; 150 kg/ha para el trigo y 125 kg/ha para la cebada.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 89. Incrementos de rendimiento en trigo, maíz y cebada según escenario futuro simulado.

Trigo A1B – 360 ppmv CO2		Trigo A1B – 697 ppmv CO2		Maíz A1B – 360 ppmv CO2		Maíz A1B – 697 ppmv CO2	
Caso 6	Caso 7	Caso 5	Caso 6	Caso 6	Caso 7	Caso 5	Caso 6
-2.39%	-6,23%	0.46%	7.58%	-16.23%	13.97%	26.90%	26.93%

Cebada A1B – 697ppmvCO2		Cebada A1B –360 ppmvCO2	
Caso 1	Caso 3	Caso 1	Caso 3
4.96%	17.38%	6.38%	16.15%

Tabla 90. Dosis de riego que maximiza los rendimientos.

Trigo			Maíz		
actual	360 ppmv CO2	697 ppmv CO2	actual	360 ppmv CO2	697 ppmv CO2

500 mm	500 mm	350 mm	750 mm	750 mm	750 mm
--------	--------	--------	--------	--------	--------

Cebada				
actual	360 ppmv CO2		697 ppmv CO2	
Caso 5 y caso 6	Caso 2	Caso 1 y 3	Caso 2 y 3	Caso 1
250 mm	300 mm	350 mm	300 mm	350 mm

Por tanto, se han obtenido resultados totalmente compatibles con los observados en la literatura. Para trigo los rendimientos decaen en situación de cambio climático cuando se mantiene el nivel actual de emisiones, pero mejoran ante el enriquecimiento carbónico proyectado para el escenario A1B. En maíz encontramos una diferencia, y es que en situación de cambio climático con el actual nivel de emisiones, según la región de MOS que estudiemos, pueden existir incrementos en la producción o descensos. Con un incremento en la concentración de CO₂ solo encontramos mejoras en la producción. En la cebada encontramos aumentos muy parecidos en la producción tanto para escenarios con concentración actual de CO₂ como en escenarios enriquecidos. También parece ser que la variabilidad espacial en MOS también proyecta rendimientos diferentes.

Finalmente, si analizamos la productividad del agua, medida como kg de cosecha obtenido por m³ de agua empleado, vemos como la productividad del agua (WUE) desciende en situación de cambio climático si no hay enriquecimiento de CO₂. Observamos un ligero aumento de la productividad del agua para el trigo y el maíz en caso de proyecciones con enriquecimiento. Sin embargo, para la cebada parece ser que el aumento en los rendimientos viene acompañado de un aumento en las necesidades hídricas de la planta, por lo que la productividad del agua desciende ligeramente.

Tabla 91. Productividad del agua.

WUE (kg/m ³) Maíz clima actual		WUE (kg/m ³) Maíz A1B-360 ppmv CO2		WUE (kg/m ³) Maíz A1B - 697 ppmv CO2	
Caso 6	Caso 7	Caso 6	Caso 7	Caso 5	Caso 6
2.11	1.72	1.77	1.95	2.68	2.16
WUE (kg/m ³) Trigo clima actual		WUE (kg/m ³) Trigo A1B - 360 ppmv CO2		WUE (kg/m ³) Trigo A1B - 697 ppmv CO2	
Caso 3		Caso 6	Caso 7	Caso 5	Caso 6
1.69		1.66	1.59	2.61	2.46

WUE (kg/m ³) Cebada clima actual		WUE (kg/m ³) Cebada A1B – 360 ppmv CO ₂		WUE (kg/m ³) Cebada A1B – 697 ppmv CO ₂	
Caso 5	Caso 6	Caso 6	Caso 7	Caso 5	Caso 6
3.71	3.83	2.83	3.45	2.86	3.65

A partir de las funciones de lixiviado podremos hacer variar la dosis de fertilizante nitrogenado fijando la cantidad de riego para ver el comportamiento ante escenarios de cambio climático. Los resultados de N-lixiviado no varían demasiado, quizás un ligero descenso más acusado en escenarios de cambio climático considerando enriquecimiento de CO₂. Presentan gran variabilidad al tipo de suelo de cada parcela, siendo los menores valores de lixiviado para suelos de tipo Bk (Cambisol Cálculo).

Los incrementos o decrementos de productividad de los cultivos en base a los escenarios simulados deben ser enmarcados dentro del contexto de cambio que los genera. Así en las siguientes tablas comparamos las principales variables meteorológicas empleadas en el estudio, entre la situación actual y el escenario futuro.

La comparativa se realiza entre la estación “Tarazona” (AB01), representativa del escenario histórico, y la Celda 8 de la simulación para la proyección de cambio climático. Se elige esta estación y la correspondiente celda en las proyecciones por su proximidad a la finca experimental “Las Tiesas”, propiedad del ITAP (Diputación de Albacete) en la cual se han realizado los ensayos de campo de respuesta de los cultivos a la aplicación de distintas dosis de agua, y que a su vez nos han servido para justificar la coherencia de los resultados obtenidos a través del modelo de simulación GEPIC.

En la Tabla 92 se comparan las temperaturas máximas. Vemos como se producen incrementos generalizados de temperatura que oscilan entre 0°C en el verano y otoño, mientras que el incremento llega a más de 4°C en invierno. En cuanto a las mínimas (Tabla 93) los incrementos van de 0.6 a 3.3°C sin seguir un patrón claro por estaciones. En ambos casos se produce una disminución en la desviación estándar, disminuyendo la incertidumbre en dichos valores.

Tabla 92. Comparativa de temperaturas máximas actuales y futuras

TARAZONA (situación actual)

E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
10.05	11.06	14.63	18.32	22.25	29.96	32.68	32.01	25.9	20.91	14.16	10.23	TMX
4.03	5.27	6.42	4.4	5.16	4.54	3.01	3.12	4.23	4.25	3.68	3.26	SDMX
CELDA 8 (escenario futuro)												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
13.81	13.22	16.11	19.05	22.31	31.14	33.13	32.07	26	20.92	15.25	14.38	TMX
1.3	1.4	1.4	2.4	2.1	1.7	1.1	1.3	1.1	1.9	1.4	2.1	SDMX
INCREMENTOS												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
3.76	2.16	1.48	0.73	0.06	1.18	0.45	0.06	0.1	0.01	1.09	4.15	TMX
-2.73	-3.87	-5.02	-2	-3.06	-2.84	-1.91	-1.82	-3.13	-2.35	-2.28	-1.16	SDMX

Tabla 93. Comparativa de temperaturas mínimas actuales y futuras

TARAZONA (situación actual)												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
-0.45	0.55	3.27	5.44	9.47	13.7	15.74	15.96	12.79	8.99	2.86	0.6	TMN
3.94	3.08	3.4	2.54	2.8	2.94	2.15	2.38	3.72	3.19	3.76	3.84	SDMN
CELDA 8 (escenario futuro)												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
2.17	1.51	5.02	7.42	10.46	17.02	19.09	18.61	13.41	9.59	4.02	2.51	TMN
1.7	1.3	1.2	1.2	1.4	1.3	1.2	1.1	0.7	1.3	1.4	2.5	SDMN
INCREMENTOS												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
2.62	0.96	1.75	1.98	0.99	3.32	3.35	2.65	0.62	0.6	1.16	1.91	TMN
-2.24	-1.78	-2.2	-1.34	-1.4	-1.64	-0.95	-1.28	-3.02	-1.89	-2.36	-1.34	SDMN

En la Tabla 94 podemos ver la comparativa entre las precipitaciones actuales y las precipitaciones generadas para la serie de años futuros. En general se produce un incremento de precipitaciones de entre 1 y 14 mm en invierno, y una disminución que va de 1.4 a 14 mm en verano. Además se aprecia un importante incremento en la variabilidad de las precipitaciones a partir del incremento generalizado de la desviación estándar.

Tabla 94. Comparativa de precipitaciones actuales (fila de abajo) y futuras (fila de arriba)

TARAZONA (situación actual)												
-----------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
19.38	23.44	35.72	49.74	46.1	28.34	4.5	10.96	36.4	52.2	25.22	32.72	PRCP
3.28	6.39	6.19	7.02	5.62	23.77	4.44	8.3	10.52	7.12	4.95	5.69	SDRF
CELDA 8 (escenario futuro)												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
32.4	40.7	49.8	59	40.6	14.5	5.9	16.7	29.9	47.5	31.2	35	PRCP
23.5	33.1	23.5	42.3	17.2	11.1	7.3	22.3	10.1	33.4	26.5	27.9	SDRF
INCREMENTOS												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
13.02	17.26	14.08	9.26	-5.5	-13.84	1.4	5.74	-6.5	-4.7	5.98	2.28	PRCP
20.22	26.71	17.31	35.28	11.58	-12.67	2.86	14	-0.42	26.28	21.55	22.21	SDRF

Finalmente se comparan los datos de radiación, humedad relativa y velocidad del viento en la tabla 95. La radiación sufre un ligero aumento, así como la velocidad del viento, produciéndose a la vez un inapreciable descenso de la humedad relativa.

Tabla 95. Comparativa de radiación, humedad relativa y velocidad del viento actuales y futuras.

TARAZONA (situación actual)												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
7.52	10.84	15.07	19.88	22.82	26.4	26.99	23.54	18.03	12.11	8.23	6.27	RAD
0.76	0.65	0.59	0.64	0.6	0.49	0.46	0.5	0.62	0.71	0.75	0.8	RHUM
1.95	2.01	2.17	2.09	1.58	1.48	1.35	1.29	1.21	1.31	1.5	1.75	WSPD
CELDA 8 (escenario futuro)												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
7.58	11.11	15.02	21.02	24.34	29.69	29.54	25.63	19.36	12.85	8.75	7.85	RAD
0.79	0.73	0.67	0.63	0.59	0.49	0.43	0.49	0.6	0.7	0.74	0.79	RHUM
3.41	3.05	3.59	3.24	2.87	2.65	2.59	2.65	2.37	2.4	2.59	2.74	WSPD
INCREMENTOS												
E	F	MZ	A	MY	JN	JL	A	S	O	N	D	MES
0.06	0.27	-0.05	1.14	1.52	3.29	2.55	2.09	1.33	0.74	0.52	1.58	RAD
0.03	0.08	0.08	-0.01	-0.01	0	-0.03	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	RHUM
1.46	1.04	1.42	1.15	1.29	1.17	1.24	1.36	1.16	1.09	1.09	0.99	WSPD

En definitiva, es fundamental tener en cuenta el efecto de la concentración de CO₂ en el rendimiento de los cultivos ante escenarios futuros de cambio climático, pudiendo llegar a compensar el efecto de la reducción de humedad de los suelos por el aumento de temperatura y la reducción de la lluvia prevista en primavera.

REFERENCIAS:

Ackello-Ogutu, C., Paris, Q. and Williams, W. A. (1985). Testing a von Liebig Crop Response Function against Polynomial Specifications. *American Journal of Agricultural Economics*, 67, 873-880.

Adejuwon, J. 2005. Assessing the suitability of the EPIC crop model for use in the study of impacts of climate variability and climate change in West Africa. *Singapore. Trop. Geog.* 26(1): 44-60.

Anderson, R. L. and Nelson, L. A. (1975). A Family of Models Involving Intersecting Straight Lines and Concomitant Experimental Designs Useful in Evaluating Response to Fertilizer Nutrients. *Biometrics*, 31, 303-318.

Allen, R.G., Pereira, S.L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and drainage paper 56*, Rome.

Batjes, N. H., 2006. ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc-minutes global grid. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, the Netherlands.

Beattie, B. R. and Taylor, C. R. (1985). *The Economics of Production*. New York, John Wiley and Sons.

Berck, P. and Helfand, G. (1990). Reconciling the von Liebig and Differentiable Crop Production Functions. *American Journal of Agricultural Economics*, 72, 985-996.

Bowes G. (1991) Growth at elevated CO₂: photosynthetic responses mediated through Rubisco. *Plant, Cell & Environment* 14, 795–806.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Cavero J, Farré I, Debaeke P, Faci JM (2000) Simulation of maize yield under water stress with the EPIC phase and CROPWAT models. *Agronomy Journal* 92: 679- 690.

Brown, R.A. and N.J. Rosenberg. 1999. Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary United States growing regions. *Clim. Change* 41(1): 73-107.

Brown, R.A., N.J. Rosenberg, C.J. Hays, W.E. Easterling, and L.O. Mearns. 2000. Potential production and environmental effects of switchgrass and traditional crops under current and greenhouse-altered climate in the central United States: a simulation study. *Agric. Ecosyst. Environ.* 78: 31-47.

Cavero, J., I. Farre, P. Debaeke, and J.M. Faci. 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92: 679-690

Chavas, D.R., R.C. Izaurralde, A.M. Thomson, and X. Gao. 2009. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China. *Agric. Forest Meteor.* 149(6-7): 1118- 1128.

Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., van Diepen, C.A., (1997). Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department Water Resources, Wageningen Agricultural University, 167 pp.

Diekkrüger, B., Arning, M., 1995. Simulation of water fluxes usingv different methods for estimating soil parameters. *Ecol. Model.* 81, 83–97.

Dhakhwa, G.A. and C.L. Campbell. 1998. Potential effects of differential day-night warming in global climate change on crop productions. *Clim. Change* 40: 647-667.

Díaz, Raúl A., Graciela O. Magrin, María I. Travasso, and Rafael O. Rodríguez. 1997. Climate change and its impact on the properties of agricultural soils in the Argentinean Rolling Pampas. *Clim. Res.* 9(1-2): 25-30.

Doorenbos, J., and W.O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. FAO Rhoads, F.M., and J.M. Bennett. 1990. Corn. p. 569–596. In B.A. Irrig. and Drain. Paper 24. FAO, Rome.

Easterling, W.E., N. Chhetri, and X. Niu. 2003. Improving the realism of modeling agronomic adaptation to climate change: Simulating technological substitution. *Clim. Change* 60(1-2): 149-173.

Easterling, W.E., L.O. Mearns, C.J. Hays, and D. Marx. 2001. Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios: part II. accounting for adaptation and CO₂ direct effects. *Clim. Change* 51(2): 173-197.

Easterling, W.E., A. Weiss, C.J. Hays, and L.O. Mearns. 1998. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: the case of the US Great Plains. *Agric. Forest Meteorol.* 90: 51-63.

Easterling, W.E., C.J. Hays, M.M. Easterling, and J.R. Brandle. 1997. Modelling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: an application of the EPIC model. *Agric. Ecosyst. Environ.* 61: 163-176.

Easterling, W.E., X. Chen, C.J. Hays, J.R. Brandle, and H. Zhang. 1996. Improving the validation of model-simulated crop yield response to climate change: an application to the EPIC model. *Climate Res.* 6: 263-273.

Easterling, W. I., P. R. Crosson, N. J. Rosenberg, M. S. McKenney, L. A. Katz, and K. M. Lemon. 1993. Agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa- Nebraska-Kansas (MINK) region. *Clim. Change* 24:23-61.

Easterling, W.E, M.S. McKenney, N.J. Rosenberg, and K.M. Lemon. 1992 b. Simulations of crop responses to climate change: effects with present technology and currently available adjustments (the ‘dumb farmer’ scenario). *Agric. Forest Meteorol.* 59(1-2): 75-102.

Easterling, W.E., N.J. Rosenberg, M.S. McKenney, C.A. Jones, P.T. Dyke, and J.R. Williams. 1992d. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂. *Agric. Forest Met.* 59(1-2): 17-34.

Economic Analysis: Increasing Irrigated Water Use Efficiency in the Indian Punjab. *Agronomy Journal*, 99, 1073-1084.

Eheart, J.W. and D.W. Tornil. 1999. Low-flow frequency exacerbation by irrigation withdrawals in the agricultural midwest under various climate change scenarios. *Water Resour. Res.* 35(7): 2237-2246.

ENSEMBLES PROJECT, 2009. European Commission's 6th Framework Integrated Project from 2004-2009 (through the contract GOCE-CT-2003-505539) under the Thematic Sub-Priority "Global Change and Ecosystems" (web site <http://ensembles-eu.metoffice.com/>).

Faeth, P. and S. Greenhalgh. 2002. Policy synergies between nutrient over-enrichment and climate change. *Estuaries* 25(4b): 869-877.

Finger, Robert and Hediger, Werner (2007). The application of robust regression to a production function comparison – the example of Swiss corn. Working Paper n° 2. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

Frank, M. D., Beattie, B. R. and Embleton, M. E. (1990). A Comparison of Alternative Crop Response Models. *American Journal of Agricultural Economics*, 72, 597- 603.

Fuchs, C. and Löthe, K. (1996). Einfluss der Form von Produktionsfunktionen auf die Ermittlung der optimalen speziellen Intensität und die ökologischen Wirkungen in der Pflanzenproduktion. *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues* 32, 493- 502.

Guo, Ruiping & Lin, Zhonghui & Mo, Xingguo & Yang, Chunlin, 2010. "Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain," *Agricultural Water Management*, Elsevier, vol. 97(8), pages 1185-1194, August.

Hargreaves, G. H., Samani, Z. A., (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2): 96—99

Heady, E.O. and Dillon, J.L. (1961). *Agricultural Production Functions*. Iowa State University Press, Ames.

IPCC, 2007 IPCC In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Editors, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007), p. 996.

Izaurrealde, R.C., N.J. Rosenberg, R.A. Brown, and A.M. Thomson. 2003. Integrated assessment of Hadley Center (HaDCM2) climate-change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States Part II. Regional agricultural production in 2030 and 2095. *Agric. Forest Meteorol.* 117(1-2): 97-122.

Jalota, S.K., A. Sood, J.D. Vitale, R. Srinivasan. (2007). Simulated Crop Yields Response to Irrigation Water and Economic Analysis: Increasing Irrigated Water Use Efficiency in the Indian Punjab. *Agronomy Journal.* 99:1073-1084.

Kang, Shujiang & Payne, William A. & Evett, Steven R. & Robinson, Clay A. & Stewart, Bobby A., (2009). "Simulation of winter wheat evapotranspiration in Texas and Henan using three models of differing complexity," *Agricultural Water Management*, Elsevier, vol. 96(1), pages 167-178.

Lee, J. J., D. L. Phillips, and V. W. Benson. 1999. Soil erosion and climate change: Assessing potential impacts and adaptation practices. *J. Soil Water Cons.* 54(3): 529-536. Mckenney, M.S., W.E. Easterling, and N.J. Rosenberg. 1992. Simulation of crop productivity and responses to climate change in the year 2030: the role of future technologies, adjustments, and adaptations. *Agric. Forest Meteor.* 59(1-2): 103-127.

Liu J G. Consumptive water use in cropland and its partitioning: A high-resolution assessment. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52(11): 3309—3314, doi: 10.1007/s11431-009-0347-2

Liu J. (2009) A GIS-based tool for modelling large-scale crop-water relations. *Environ Modell Softw*,24(3): 411—422

Liu, J., Williams, J. R., Zehnder, A. J. B., Yang, H., (2007b). GEPIC – modeling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agricultural Systems* 94 (2) 478-493.

Liu, J., Wiberg, D., Zehnder, A. J. B., Yang, H., (2007a). Modelling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity, and production in China. *Irrigation Science* 26 (1) 21-33.

Llewelyn, R. V. and Featherstone, A. M. (1997). A Comparison of Crop Production Functions Using Simulated Data for Irrigated Corn in Western Kansas. *Agricultural Systems*, 54, 521-538.

Martinez, Y. and J. Albiac. (2006). Nitrate pollution control under soil heterogeneity. *Land Use Policy* 23(4): 521-532.

Martinez, Y., Albiac, J., (2004). Agricultural pollution control under Spanish and European environmental policies. *Water Resources Research*, W10501.

Mearns, L. O., W. Easterling, C. Hays, and D. Marx. 2001. Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios: part I. the uncertainty due to spatial scale. *Clim. Change* 51(2): 131-172.

Mearns, L.O., T. Mavromatis, E. Tsvetsinskaya, C. Hays, and W. Easterling. 1999. Comparative response of EPIC and CERES crop models to high and low resolution climate change scenarios. *J. Geophys. Res.* 104: 6623-6646

Mestre-Sanchís, F. and M.L. Feijóo-Bello. 2009. Climate change and its marginalizing effect on agriculture. *Ecol. Econ.* 68(3): 896-904. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.07.015.

Paris, Q. (1992). The von Liebig hypothesis. *Am. J. Agricultural Econ.* 74, 1019-1028.

Penning de Vries, F.W.T., and H.H. van Laar.(1982). Simulation of plant growth and crop production. PUDOC, Wageningen, Netherlands.

Phillips, D.L., J.J. Lee, and R.F. Dodson. 1996. Sensitivity of the US Corn Belt to climate change and elevated CO₂: I. Corn and soybean yields. *Agric. Syst.* 52(4): 481-502.

Rajsic, P. and Weersink, A. (2008). Do farmers waste fertilizer? A comparison of ex post optimal nitrogen rates and ex ante recommendations by model, site and year, *Agricultural Systems* 97, 56-67.

Reddy, K.J., H.F. Hodges, and J.M. McKinion. (1997). Crop modelling and applications: A cotton example. *Adv. Agron.* 59:226–290.

Ritchie J T. (1972) A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour Res*, 8(5): 1204—1213

Ritchie, J.T., D.C. Godwing, y S. Otter-Nacke. (1985). A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M University Press, College Station.

Rosenberg, N.J., M.S. McKenney, W.E. Easterling, and K.M. Lemon. 1992. Validation of EPIC model simulations of crop responses to current climate and CO₂ conditions: comparisons with census, expert judgement and experimental plot data. *Agric. Forest Meteor.* 59(1-2): 35-51.

Sands, R.D. and J.A. Edmonds. 2005. Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment Part 7: Economic analysis of field crops and land use with climate change. *Climatic Change* 69(1): 127-150.

Schneider, S.H., W.E. Easterling, and L.O. Mearns. 2000. Adaptation: sensitivity to natural variability, agent assumptions, and dynamic climate changes. *Clim. Change* 45: 203-221.

SCS (1971). Hydrology, National Engineering Handbook. USDA-Soil Conservation Services, Washington, DC.

Seguin, B., Sinoquet, H., (2003). An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332.

Smith, M. 1992. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management. Irrigation and drainage paper 46, FAO, Rome.

- Steduto, P., V. Pocuca, A. Caliandro, and P. Debaeke. 1995. An evaluation of the crop-growth simulation submodel of EPIC for wheat grown in a Mediterranean climate with variable soilwater regimes. *Eur. J. Agron.* 4(3): 335-345.
- Stockle, C.O., J.R. Williams, C.A. Jones, and N.J. Rosenberg. 1992. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops. I. Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agric. Syst.* 38(3): 225-238.
- Stockle, C.O., S.A. Martin, and G.S. Campbell. (1994). CropSyst, a cropping systems simulation model: Water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46:335–359.
- Supit, I., Hooijer, A.A., van Diepen, C.A., (1994). System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS, vol. 1: Theory and Algorithms. Joint Research Centre, Commission of the European Communities, EUR 15956 EN, Luxembourg, 146 pp.
- Thomson, A.M., R.A. Brown, N.J. Rosenberg, R.C. Izaurralde, and V. Benson. 2005a. Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment Part 3: Dryland production of grain and forage crops. *Clim. Change* 69(1): 43-65.
- Thomson, A.M., R.C. Izaurralde, N.J. Rosenberg, and X. He. 2005b. Climate change impacts on agriculture and soil carbon sequestration potential in the Huang-Hai Plain of China. *Agric., Ecosys. and Environ.* 114: 195-209.
- Thomson, A.M., N.J. Rosenberg, R.C. Izaurralde, and R.A. Brown. 2005c. Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment Part 2: Models and Validation. *Clim. Change* 69(1): 27-41.
- Thomson, A.M., N.J. Rosenberg, R.C. Izaurralde, and R.A. Brown. 2005d. Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment Part 5: Irrigated agriculture and national grain crop production. *Clim. Change* 69(1): 89-105.
- Thomson, A.M., R.A. Brown, and S.J. Ghan. 2002. Elevation dependence of winter wheat production in eastern Washington State with climate change: a methodological study. *Clim. Change* 54(1-2): 141-164.

Touré, A., D.J. Major, and C.W. Lindwall. 1995. Sensitivity of four wheat simulation models to climate change. *Cand. J. Plant Sci.* 75(1): 61-68.

Tubiello, F. N. and Ewert, F.: 2002, "Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: approaches and applications for climate change." *European Journal of Agronomy* 18:57-74.

Wang, E., Engel, T., (2002). Simulation of growth, water and nitrogen uptake of a wheat crop. *Environ. Model. Software* 17 (4), 387–402.

Williams, J.R., (1995). The EPIC model. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publisher, Colorado, USA, pp. 909–1000.

Williams J R, Jones C A, Kiniry J R., (1989), The EPIC crop growth model. *Trans ASAE*, 32(2): 497—511

Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T.Dyke. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *TRANS.ASAE* 18:270–280. *ity. Trans. ASAE* 27:129–144.

Yadav, R.L., Singh, V.K., Dwivedi, B.S. and Shukla, A.K. (2003). Wheat productivity and N use-efficiency as influenced by inclusion of cowpea as grain legume in a rice-wheat system. *Journal of Agricultural Science* 141, 213-220.