

**Universidad Pública de Navarra
ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

**Nafarroako Unibertsitate Publikoa
NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA**

**RELACIÓN ENTRE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SENTINEL 2A
CON DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CEREALES DE INVIERNO
EN LA CUENCA DE PAMPLONA (NAVARRA)**

Presentado por

MARTA GOÑI LABAT

Directora:

Maria González de Audicana

Codirectora:

Ana Pilar Armesto

**MÁSTER EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN
MASTERRA INFORMAZIO SISTEMA GEOGRAFIKOETAN ETA TELEDETEKZIOAN**

Septiembre 2018



RESUMEN

Este trabajo fin de máster tiene como objetivo evaluar la aptitud de diversos índices de vegetación calculados a partir de datos obtenidos de imágenes SENTINEL-2A para relacionarlos con las dosis de abonado nitrogenado en parcela. Para ello, se partió de un conjunto de parcelas de trigo y cebada con datos de dosis de abonado y rendimiento final de cultivo para la campaña agrícola 2017. Tras realizar el procesado de las imágenes, se automatizó el proceso de extracción de su información para las parcelas de estudio. Se agruparon las parcelas en función de rangos de abonado y se determinaron si las diferencias eran significativas entre los valores de los índices de vegetación entre dichas categorías, las curvas temporales de los índices agrupados en los rangos de tratamiento, así como la relación entre los valores de índices acumulados y abono nitrogenado y rendimiento. Los resultados obtenidos demuestran que la respuesta de los cultivos a nivel de abonado es mayor en las primeras fases de desarrollo ya que las mayores diferencias de valores de índices de vegetación entre parcelas con diferentes dosis de abonado se producen en dichas fechas.

Palabras clave: teledetección, índice de vegetación, Sentinel-2A, trigo, cebada, nitrógeno, dosis abono.



ABSTRACT

This master's thesis aims to evaluate the aptitude of various vegetation indices calculated from data obtained from SENTINEL-2A images to relate them to the doses of nitrogenous fertilizer in the plot. To do this, we started with a set of wheat and barley plots with fertilizer dose data and final crop efficiency for the 2017 agricultural campaign. After processing the images, the extraction process of their information was automated for the study plots. The plots were grouped according to fertilizing ranges and it was determined if the differences were significant between the values of the vegetation indices between these categories, the time curves of the indices grouped in the treatment ranges, as well as the relationship between the values of accumulated indexes and nitrogenous fertilizer and yield. The results obtained show that the response of crops at the fertilizer level is greater in the early stages of development since the greater differences in vegetation index values between plots with different doses of fertilizer occur at these dates.

Keywords: remote sensing, vegetation index, Sentinel-2A, wheat, barley, nitrogen, fertilizer dose.

INDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
INDICE.....	4
INDICE DE FIGURAS	6
INDICE DE TABLAS	10
1. ANTECEDENTES	11
1.1. NITRÓGENO, CULTIVOS y CONTAMINACION	11
1.2. TELEDETECCIÓN PARA MEDIR EL CONTENIDO DE NITRÓGENO	11
1.3 SENTINEL-2	13
1.4. PROYECTO PYRENEOS Y PLATAFORMA sigAGROASESOR	15
2. OBJETIVOS	17
3. MATERIAL	18
3.1 ZONA DE ESTUDIO.....	18
3.2. FUENTES DE DATOS DE LAS PARCELAS	19
3.3. DESCARGA DE IMÁGENES SENTINEL-2.....	20
3.4. ARCHIVOS DESCARGADOS DE IMÁGENES SENTINEL-2	21
4. METODOLOGÍA.....	23
4.1. DETERMINACIÓN DE ESTADOS FENOLÓGICOS DEL TRIGO Y LA CEBADA EN LA CAMPAÑA 2017.....	23
4.2 CÁLCULO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN	25
4.2.1 PROCESAMIENTO PREVIO DE LAS IMÁGENES.....	27
4.2.2 APLICACIÓN DE LA MÁSCARA DE NUBES A LAS IMÁGENES DE INDICES DE VEGETACIÓN	27
4.2.3 EXTRACCIÓN DE ESTADÍSTICAS DE PARCELAS AGRÍCOLAS	28
4.3 PREPARACIÓN DE LOS FICHEROS DE ANÁLISIS: DATOS DE ABONADO E IV POR PARCELA29	
4.4 ANÁLISIS DE RELACIONES ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y DOSIS DE ABONADO	30
4.4.1. CATEGORIZACIÓN DE LAS PARCELAS EN FUNCIÓN DE LAS UFN APLICADAS.....	31
4.4.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN CADA CATEGORÍA DE ABONADO.....	31
4.4.3 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN FUNCIÓN DE LAS DOSIS DE ABONADO	32
4.4.4 ANÁLISIS DE DIFERENCIAS ENTRE CATEGORÍAS DE ABONADO: PRUEBA DE KRUSKALL-WALLIS.	33

4.5. RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN ACUMULADOS Y DOSIS DE FERTILIZACIÓN	34
4.6. RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN ACUMULADOS Y RENDIMIENTO	34
4.7. CURVA UFN-RENDIMIENTO.....	35
5. RESULTADOS	36
5.1. RESULTADOS DE LA CATEGORIZACIÓN DE PARCELAS EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE ABONADO.....	36
5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN CADA CATEGORÍA DE ABONADO.....	36
5.3 ANÁLISIS DE LAS CURVAS TEMPORALES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA TRIGO.....	37
5.4 ANÁLISIS DE LAS CURVAS TEMPORALES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA CEBADA.....	41
5.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE KRUSKALL-WALLIS	45
5.6 RELACION ENTRE VALORES ACUMULADOS DE INDICES Y FERTILIZACION NITROGENADA	49
5.7 RELACION ENTRE VALORES ACUMULADOS DE INDICES Y RENDIMIENTO	51
5.8. CURVA RESPUESTA ABONO NITROGENADO-RENDIMIENTO	52
6. DISCUSION.....	54
7. CONCLUSIONES	57
8. BIBLIOGRAFIA.....	58
ANEXO 1. DIAGRAMA DE CAJAS (BOX-PLOT) PARA CADA INDICE	62
ANEXO 2. VALORES INDICES ACUMULADOS /UFN.....	95
ANEXO 3. VALORES INDICES ACUMULADOS /RENDIMIENTO	107

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las 13 bandas del sensor MSI en el espectro electromagnético.....	14
Figura 2. Mapa de comarcas de Navarra y ubicación de parcelas de estudio	18
Figura 3. Zonas vulnerables a la contaminación por nitratos y ubicación de parcelas.....	19
Figura 4. Nomenclatura imágenes descargadas de Sentinel.	21
Figura 5. Script para el cálculo de estadísticas a nivel de parcela.....	29
Figura 6. Script para obtener diagrama de cajas en R.....	32
Figura 7. Curva temporal del GNDVI trigo.....	37
Figura 8. Curva temporal del IRECI trigo	37
Figura 9. Curva temporal del MCARI trigo	37
Figura 10. Curva temporal del MTCI trigo.....	37
Figura 11. Curva temporal del NDI45 trigo	38
Figura 12. Curva temporal del NDVI_8A trigo.....	38
Figura 13. Curva temporal del NDVI trigo	38
Figura 14. Curva temporal del NDVI_REDEEDGE trigo.....	38
Figura 15. Curva temporal del PSSRA trigo	38
Figura 16. Curva temporal del RVI_8A trigo.....	38
Figura 17. Curva temporal del RVI para trigo.....	39
Figura 18. Curva temporal del S2REP para trigo	39
Figura 19. Curva temporal del SAVI_8A trigo.....	39
Figura 20. Curva temporal del SAVI_REDEEDGE trigo.....	39
Figura 21. Curva temporal del MTVI2 trigo.....	39
Figura 22. Curva temporal del MCARI/MTVI2 trigo	39
Figura 23. Curva temporal del SAVI trigo	40
Figura 24. Curva temporal del GNDVI cebada	41
Figura 25. Curva temporal del IRECI cebada	41
Figura 26. Curva temporal del MCARI cebada	41
Figura 27. Curva temporal del MTCI cebada.....	41
Figura 28. Curva temporal del NDI45 cebada	42
Figura 29. Curva temporal del NDVI_8A cebada.....	42
Figura 30. Curva temporal del NDVI cebada	42
Figura 31. Curva temporal del NDVI_REDEEDGE cebada.....	42
Figura 32. Curva temporal del PSSRA cebada	42
Figura 33. Curva temporal del RVI_8A cebada	42
Figura 34. Curva temporal del RVI para cebada.....	43
Figura 35. Curva temporal del S2REP cebada	43
Figura 36. Curva temporal del SAVI_8A cebada.....	43
Figura 37. Curva temporal del SAVI cebada	43
Figura 38. Curva temporal del SAVI_REDEEDGE	43
Figura 39. Curva temporal del MTVI2 cebada.....	43
Figura 40. Curva temporal del MCARI/MTVI2 cebada	44
Figura 41. Curva respuesta de abono nitrogenado-rendimiento para trigo.....	53
Figura 42. Curva de abono nitrogenado-rendimiento para cebada	53
Figura 43. Diagramas de cajas (box-plot) datos de GNDVI para trigo.....	62
Figura 44. Diagramas de cajas (box-plot) datos de IRECI para trigo	63

Figura 45. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MCARI para trigo	64
Figura 46. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MTCI para trigo	65
Figura 47. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDI45 para trigo	66
Figura 48. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI_8A para trigo	67
Figura 49. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI para trigo	68
Figura 50. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI_REDEEDGE para trigo	69
Figura 51. Diagramas de cajas (box-plot) datos de PSSRA para trigo	70
Figura 52. Diagramas de cajas (box-plot) datos de RVI_8A para trigo	71
Figura 53. Diagramas de cajas (box-plot) datos de RVI para trigo	72
Figura 54. Diagramas de cajas (box-plot) datos de S2REP para trigo	73
Figura 55. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI_8A para trigo	74
Figura 56. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI para trigo	75
Figura 57. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI_REDEEDGE para trigo	76
Figura 58. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MTVI2 para trigo	77
Figura 59. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MCARI/MTVI2 para trigo	78
Figura 60. Diagramas de cajas (box-plot) datos de GNDVI para cebada	79
Figura 61. Diagramas de cajas (box-plot) datos de IRECI para cebada	80
Figura 62. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MCARI para cebada	81
Figura 63. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MTCI para cebada	82
Figura 64. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDI45 para cebada	83
Figura 65. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI para cebada	84
Figura 66. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI_REDEEDGE para cebada	85
Figura 67. Diagramas de cajas (box-plot) datos de PSSRA para cebada	86
Figura 68. Diagramas de cajas (box-plot) datos de RVI para cebada	87
Figura 69. Diagramas de cajas (box-plot) datos de RVI_8A para cebada	88
Figura 70. Diagramas de cajas (box-plot) datos de S2REP para cebada	89
Figura 71. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI para cebada	90
Figura 72. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI_8A para cebada	91
Figura 73. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI_REDEEDGE para cebada	92
Figura 74. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MTVI2 para cebada	93
Figura 75. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MCARI/MTVI2 para cebada	94
Figura 76. Representación valores acumulados GNDVI-UFN para trigo	95
Figura 77. Representación valores acumulados IRECI-UFN para trigo	95
Figura 78. Representación valores acumulados MCARI-UFN para trigo	96
Figura 79. Representación valores acumulados MTCI-UFN para trigo	96
Figura 80. Representación valores acumulados NDI45-UFN para trigo	96
Figura 81. Representación valores acumulados NDVI-UFN para trigo	97
Figura 82. Representación valores acumulados NDVI_REDEEDGE-UFN para trigo	97
Figura 83. Representación valores acumulados NDVI_8A-UFN para trigo	97
Figura 84. Representación valores acumulados PSSRA-UFN para trigo	98
Figura 85. Representación valores acumulados RVI_8A-UFN para trigo	98
Figura 86. Representación valores acumulados RVI-UFN para trigo	98
Figura 87. Representación valores acumulados S2REP-UFN para trigo	99
Figura 88. Representación valores acumulados SAVI_8A-UFN para trigo	99
Figura 89. Representación valores acumulados SAVI-UFN para trigo	99
Figura 90. Representación valores acumulados SAVI_REDEEDGE-UFN para trigo	100
Figura 91. Representación valores acumulados MTVI2-UFN para trigo	100
Figura 92. Representación valores acumulados MCARI/MTVI2-UFN para trigo	100
Figura 93. Representación valores acumulados GNDVI-UFN para cebada	101

Figura 94.Representación valores acumulados IRECI-UFN para cebada	101
Figura 95.Representación valores acumulados MCARI-UFN para cebada.....	102
Figura 96.Representación valores acumulados MTCI-UFN para cebada	102
Figura 97.Representación valores acumulados NDI45-UFN para cebada.....	102
Figura 98.Representación valores acumulados NDVI-UFN para cebada	103
Figura 99.Representación valores acumulados NDVI_REDEEDGE-UFN para cebada	103
Figura 100.Representación valores acumulados NDVI_8A-UFN para cebada	103
Figura 101.Representación valores acumulados PSSRA-UFN para cebada	104
Figura 102.Representación valores acumulados RVI_8A-UFN para cebada.....	104
Figura 103.Representación valores acumulados RVI-UFN para cebada	104
Figura 104.Representación valores acumulados S2REP-UFN para cebada.....	105
Figura 105.Representación valores acumulados SAVI_8A-UFN para cebada.....	105
Figura 106.Representación valores acumulados SAVI-UFN para cebada	105
Figura 107.Representación valores acumulados SAVI_REDEEDGE-UFN para cebada.....	106
Figura 108.Representación valores acumulados MTVI2-UFN para cebada	106
Figura 109.Representación valores acumulados MCARI/MTVI2-UFN para cebada	106
Figura 110.Representación valores acumulados GNDVI-RENDIMIENTO para trigo	107
Figura 111.Representación valores acumulados IRECI-RENDIMIENTO para trigo.....	107
Figura 112.Representación valores acumulados MCARI-RENDIMIENTO para trigo	108
Figura 113.Representación valores acumulados MTCI-RENDIMIENTO para trigo	108
Figura 114.Representación valores acumulados NDI45-RENDIMIENTO para trigo.....	108
Figura 115.Representación valores acumulados NDVI-RENDIMIENTO para trigo.....	109
Figura 116.Representación valores acumulados NDVI_REDEEDGE-RENDIMIENTO para trigo ..	109
Figura 117.Representación valores acumulados NDVI_8A-RENDIMIENTO para trigo	109
Figura 118.Representación valores acumulados PSSRA-RENDIMIENTO para trigo.....	110
Figura 119.Representación valores acumulados RVI_8A-RENDIMIENTO para trigo	110
Figura 120.Representación valores acumulados RVI-RENDIMIENTO para trigo	110
Figura 121.Representación valores acumulados S2REP-RENDIMIENTO para trigo.....	111
Figura 122.Representación valores acumulados SAVI_8A-RENDIMIENTO para trigo	111
Figura 123.Representación valores acumulados SAVI-RENDIMIENTO para trigo.....	111
Figura 124.Representación valores acumulados SAVI_REDEEDGE-RENDIMIENTO para trigo ...	112
Figura 125.Representación valores acumulados MTVI2-RENDIMIENTO para trigo	112
Figura 126.Representación valores acumulados MCARI/MTVI2-RENDIMIENTO para trigo.....	112
Figura 127. Representación valores acumulados GNDVI-RENDIMIENTO para cebada	113
Figura 128.Representación valores acumulados IRECI-RENDIMIENTO para cebada.....	113
Figura 129.Representación valores acumulados MCARI-RENDIMIENTO para cebada	113
Figura 130.Representación valores acumulados MTCI-RENDIMIENTO para cebada	114
Figura 131.Representación valores acumulados NDI45-RENDIMIENTO para cebada.....	114
Figura 132.Representación valores acumulados NDVI-RENDIMIENTO para cebada.....	114
Figura 133.Representación valores acumulados NDVI_REDEEDGE-RENDIMIENTO para cebada	115
Figura 134.Representación valores acumulados NDVI_8A-RENDIMIENTO para cebada	115
Figura 135.Representación valores acumulados PSSRA-RENDIMIENTO para cebada.....	115
Figura 136.Representación valores acumulados RVI_8A-RENDIMIENTO para cebada	116
Figura 137.Representación valores acumulados RVI-RENDIMIENTO para cebada	116
Figura 138.Representación valores acumulados S2REP-RENDIMIENTO para cebada.....	116
Figura 139.Representación valores acumulados SAVI_8A-RENDIMIENTO para cebada	117

Figura 140. Representación valores acumulados SAVI-RENDIMIENTO para cebada	117
Figura 141. Representación valores acumulados SAVI_REDEEDGE-RENDIMIENTO para cebada	117
Figura 142. Representación valores acumulados MTVI2-RENDIMIENTO para cebada	118
Figura 143. Representación valores acumulados MCARI/MTVI2-RENDIMIENTO para cebada.	118

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de Sentinel-2	14
Tabla 2. Parcelas estudiadas	20
Tabla 3. Fechas de descarga de imágenes	20
Tabla 4. Bandas descargadas para imágenes Sentinel 2A.....	22
Tabla 5. Estados fenológicos del trigo y cebada en la campaña 2017.	25
Tabla 6. Índices de vegetación calculados y operaciones entre bandas.....	26
Tabla 7. Software empleado en el cálculo de índices	27
Tabla 8. Categorías de abonado en parcelas	31
Tabla 9. Parcelas en cada rango de abonado.....	36
Tabla 10. Resultado del test Kruskal-wallis para el trigo.....	45
Tabla 11. Resultado del test de Kruskal-wallis para la cebada.....	47
Tabla 12. Coeficiente de correlación para la relación entre valores acumulados de índices y UFN para trigo.....	49
Tabla 13. Coeficiente de correlación para la relación entre valores acumulados de índices y UFN para cebada	50
Tabla 14. Coeficiente de correlación para la relación entre valores acumulados de índices y rendimiento para trigo.....	51
Tabla 15. Coeficiente de correlación para la relación entre valores acumulados de índices y rendimiento para cebada.....	52



1. ANTECEDENTES

1.1. NITRÓGENO, CULTIVOS y CONTAMINACION

El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas y frecuentemente es el nutriente más limitante en la mayoría de los suelos agrícolas, por tanto puede afectar al rendimiento y la productividad de los cultivos.

El rendimiento está determinado por la condición del cultivo durante las primeras etapas de crecimiento, y por tanto, es necesario evaluar el estado de N en dichas etapas de manera que se pueda proporcionar las dosis adecuadas basadas en una correcta evaluación de las necesidades y deficiencias del cultivo.

Un aporte insuficiente de nitrógeno a los cultivos implica que no se alcance un alto rendimiento y por tanto provoque pérdidas económicas. Sin embargo, un aporte que supere las necesidades nutricionales de nitrógeno de los cultivos provoca que el exceso de abono se lixivie a las aguas superficiales y subterráneas, contribuyendo a la eutrofización de lagos y río (Wood et al., 1993).

Reducir el aporte de nitrógeno en los campos es a su vez crucial para evitar la contaminación del medio ambiente. La Directiva de nitratos (91/676/CEE) tiene por objeto proteger la calidad del agua en toda Europa y la Directiva de aguas subterráneas (2006/118/CE) confirma que las concentraciones de nitratos no deben superar el umbral de alarma de 50 mg/l, denominándose zonas vulnerables aquellas superficies de terreno cuya escorrentía o filtración puedan influir en alcanzar o superar dicha concentración límite de nitratos.

La obtención de un indicador del estado del cultivo de nitrógeno (en adelante N) es necesario para la gestión específica de este elemento en los campos agrícolas.

1.2. TELEDETECCIÓN PARA MEDIR EL CONTENIDO DE NITRÓGENO

Las técnicas de teledetección basadas en la radiación reflejada en la región visible del espectro electromagnético tienen el potencial de evaluar el contenido de N de los cultivos. Debido a que la mayor parte del N de las hojas está contenida en las moléculas de clorofila, hay una estrecha relación entre el contenido de clorofila y el contenido de N en la hoja. (Yoder and Pettigrew-Crosby, 1995).

Los estudios realizados hasta la fecha indican que las bandas espectrales adecuadas para el monitoreo de la nutrición foliar de N pueden cambiar con la especie de cultivo y las condiciones experimentales.

Blackmer et al. (1996) encontraron que la reflectancia cerca de 550 nm permite discriminar las diferencias entre los tratamientos a diferentes dosis de abonado nitrogenado en maíz y determinan que la región más sensible al contenido de N es la de 550-710nm. Wang et al (1993) observaron que las bandas 760-900 nm, 630-660nm y 530-560nm son las bandas espectrales más sensibles para el diagnóstico de los niveles de nutrición de N en hojas de arroz.

La región en la que se produce la absorción máxima por la clorofila es entre 660-680 nm. Sin embargo, pequeñas cantidades de clorofila son suficientes para saturar esa región y muchos modelos empíricos se han basado en medidas de reflectancia lejos de la región de absorción máxima. Para obtener la máxima sensibilidad a la hora de estimar contenido en distintos los pigmentos, se deben seleccionar longitudes de onda lo más próximas posibles a las bandas de absorción, como el área de fuerte absorción del rojo por la clorofila (680 nm) y de alta reflectividad del IR (780 nm), conocida como "red edge" (Rodríguez et al., 2006).

Stone et al. (1996) constataron que la concentración de N para el cultivo de trigo podría estimarse utilizando un índice espectral basado en la combinación de 2 bandas espectrales a 671 y 780 nm.

Según Daughtry (2000) los parámetros desarrollados para estimar el contenido en clorofila en cubierta, usando la radiación reflejada por los cultivos, se ven influenciados por otros factores de la propia vegetación y del entorno como el LAI, la reflectancia del suelo, los ángulos solares, la geometría de la cubierta o las condiciones atmosféricas. Es por ello que las el esfuerzo investigador está enfocado desde hace años a obtener resultados independientes de estos factores utilizando diferentes índices de vegetación.

El NDVI y el RVI, se consideraron útiles para la medición del contenido de N en diferentes cultivos (Zhu et al. 2007). En cuanto al uso de imágenes para la obtención de estos índices de vegetación, se ha comprobado que las imágenes hiperespectrales, con ancho de banda menores de 10 nm, mejoran las estimaciones de concentración de N a partir de NDVI (Hansen and Schjoerring, 2003).

Haboudane et al. (2002) elaboraron un modelo para estimar la concentración de clorofila en maíz usando datos hiperespectrales y encontraron que los índices TCARI/OSAVI son sensibles al contenido de clorofila y muy resistentes a las variaciones de LAI y al ángulo solar cenital, además de determinar una ecuación con buena correlación para estimar la clorofila en hojas.

Rodríguez et al. (2006) determinaron un índice de reflectancia de cubierta llamado mSRpi, que junto con el índice CCCi creado por Barnes et al. (2000), eran buenos indicadores espaciales del estado de N de la planta con independencia del estado hídrico de la planta y de la densidad de siembra. Tilling et al. (2007) también encontraron que el mSRpi y el CCCi eran buenos para determinar el estado de N a nivel de cubierta en trigo.

Chen et al. (2010) propone un índice de vegetación llamado DCNI, utilizado para la estimación de N con buenos resultados para predecir la concentración en maíz y trigo.

El índice nutricional de nitrógeno NNI se introduce en estudios recientes como base para determinar el estado nutricional de N de la planta y por tanto, para la toma de decisiones. Este indicador es un ratio entre la concentración actual de N y su valor óptimo. La posibilidad de tener medidas de NNI a lo largo del ciclo de cultivo durante el periodo vegetativo constituye una herramienta dinámica para la gestión de la



fertilización nitrogenada, que permite aplicar la dosis correcta en el momento necesario (Lemaire et al., 2008). Recientemente, varios autores han propuesto un procedimiento para estimar el valor del NNI utilizando índices de vegetación derivados de imágenes remotas. Cilia et al. (2014) calcularon dicho indicador mediante los índices MCARI y el MTVI2. Chen (2015) comprobó que los índices de vegetación que mejor estimación del NNI permitían eran el MCARI, el MTVI2 y el MTCl.

1.3 SENTINEL-2

Todos los índices de vegetación a los que se hace referencia en el apartado anterior se derivan de imágenes captadas por sensores remotos captados por sensores a bordo de distintas plataformas espaciales.

El programa Copernicus, es el nuevo nombre del programa para la Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y la Seguridad, antes conocido como GMES (Global Monitoring for Environment and Security). Está diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de acceso abierto y gratuito para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana.

Es un proyecto liderado por la Comisión Europea (CE) y en el que participan los Estados Miembros de la UE, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), las Agencias de la UE y Mercator Océan.

ESA opera los satélites que proporcionan información al programa Copernicus. La familia de satélites que forman parte de esta misión se cita a continuación:

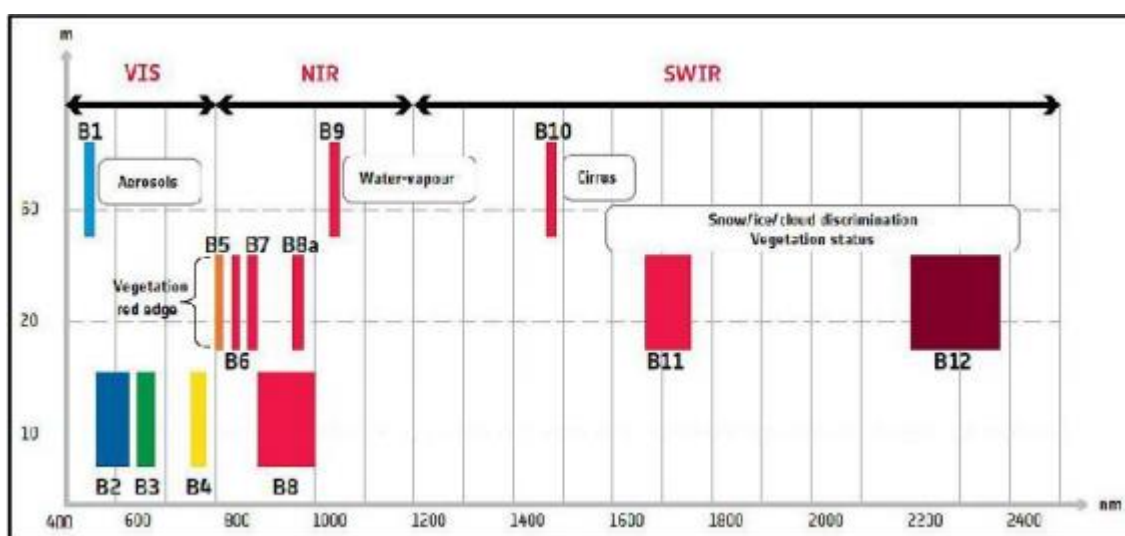
- Sentinel-1 proporciona imágenes de radar de día y de noche para todo tipo de clima para servicios terrestres y oceánicos.
- Sentinel-2, proporciona imágenes ópticas de alta resolución para servicios terrestres y servicios de emergencia.
- Sentinel-3 proporciona datos ópticos, de radar y altimetría de alta precisión para servicios marinos y terrestres.
- Sentinel-5P. Es una misión que tiene como objetivo proporcionar continuidad de datos hasta el lanzamiento de Sentinel-5, programada para su lanzamiento en 2021. (ESA, 2018)
- Sentinel-6 proporcionará altimetría de alta precisión para medir la altura global de la superficie del mar, Es una misión cooperativa desarrollada en asociación entre Europa (UE, ESA y EUMETSAT) y los EE. UU. (NOAA y NASA). Está previsto su lanzamiento en 2020 (ESA, 2018)
- Sentinel-4 y Sentinel-5 serán instrumentos a bordo de los satélites meteorológicos EUMETSAT. (ESA, 2018)

La misión Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, pero con un desfase de 180°. El primer satélite Sentinel-2A fue lanzado

el 23 de junio de 2015 mientras que el segundo satélite Sentinel-2B fue lanzado el 7 de marzo de 2017 lo que permite un periodo de revisita conjunto de 5 días.

Sentinel 2 lleva una cámara óptica multiespectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y de la vegetación. Utiliza un sistema de barrido a lo largo de la trayectoria (push-broom) para generar una imagen de 290 kilómetros de ancho y poder ofrecer muy altas prestaciones geométricas y espectrales en sus datos. La cámara cuenta con dos grandes planos focales, uno en las bandas del visible (VIS) y del infrarrojo próximo (NIR) y el otro, en el infrarrojo medio (SWIR).

Figura 1. Localización de las 13 bandas del sensor MSI en el espectro electromagnético.



Fuente: European Space Agency. (2017). Sentinel-2MSI Technical Guide

En la Tabla 1 se especifican las características de la misión Sentinel-2

Tabla 1. Características de Sentinel-2

Lanzamiento	Sentinel-2A 23 de junio de 2015, Sentinel-2B 7 de marzo de 2017
Lanza cohetes	Cohete espacial Vega en Kourou (Guayana francesa)
Órbita	Síncrona al sol a una altitud de 786 km
Periodo de revisita	10 días individualmente - 5 días conjuntamente
Peso	1,13 toneladas
Vida útil	Siete años y medio
Dimensiones	3,4 x 1,8 x 2,35 metros
Estaciones receptoras	Svalbard (Noruega), Matera (Italia) y Maspalomas (Gran Canaria). Enlace de comunicación para datos de seguimiento y telemetría: transmitidos desde Kiruna (Suecia)
Cámara	Cámara multiespectral o MIS (<i>Multi Spectral Instrument</i>) con una cobertura de barrido de 290 kilómetros.

Numero bandas espectrales	13
Resolución espacial de bandas	Bandas de 10m de resolución espacial: azul-B2 (490nm); verde-B3 (560nm); rojo-B4 (665nm); infrarrojo cercano-B8 (842nm).
	Bandas de resolución espacial 20m: B5 (705nm), B6 (740nm), B7 (783nm), B8a (865nm), B11 (1610nm) y B12 (2190nm).
	Bandas de 60m de resolución espacial: B1 (443 nm), B9 (940 nm) y B10 (1375 nm).
Acceso a los datos	sentinels.copernicus.eu

El nivel elemental de los productos Sentinel 2- MSI son imágenes de un tamaño fijo. El tamaño del gránulo depende del nivel del producto. Para productos ortorrectificados (Nivel-1C y Nivel-2A) la imagen está dividida en mosaicos, también llamados tiles de 100x100km² en proyección UTM / WGS84.

La ESA facilita imágenes de Nivel-2A (reflectancia de fondo de atmósfera, bottom of atmosphere, BOA) a partir de algoritmos de clasificación de escenas y corrección atmosférica de productos de Nivel -1C. Nivel-2A también puede ser generado por el usuario del producto Level-1C utilizando el Sentinel-2 Toolbox o la versión independiente del procesador Sen2Cor.

1.4. PROYECTO PYRENEOS Y PLATAFORMA sigAGROASESOR

El proyecto PyrenEOS, perteneciente al programa INTERREG POCTEFA, tiene como objetivo crear servicios innovadores para la eficiencia en el uso de recursos naturales y la gestión de riesgos en el Pirineo, utilizando el Sistema de Observación Terrestre Europeo en una Plataforma Transfronteriza Distribuida que utilizará nuevas capacidades de la familia de satélites Sentinel del programa Copernicus.

Dentro del programa PyrinEOS, en el marco de gestión de cultivos agrícolas y cubiertas forestales, se plantea el desarrollo de un servicio de ayuda a la decisión en la producción agrícola, para la gestión de fertilización nitrogenada y seguimiento de alertas en el desarrollo vegetativo de parcelas agrícolas. En este sentido resulta fundamental intentar desarrollar procedimientos basados en imágenes remotas que permitan estimar el estado nutricional de N de la planta y por tanto, decisiones acerca de las dosis de fertilización nitrogenada a aplicar.

La plataforma de servicios sigAGROAsesor es una aplicación webGIS de ámbito nacional, enfocada al asesoramiento de precisión a nivel de parcela agrícola en variedades, fertilización, riego, plagas y enfermedades e indicadores de sostenibilidad. Incorpora la información más precisa y actual disponible en meteorología, edafología, teledetección y conocimiento fitotécnico de los cultivos integrados.

Este trabajo fin de máster se enmarca en el mencionado proyecto PyrenEOS, y más concretamente en la Acción 5.2 relacionada con el desarrollo de servicios VERDE

relativo al desarrollo operativo de un sistema de ayuda a la decisión en fertilización nitrogenada en cultivos.



2. OBJETIVOS

Tal y como se ha comentado previamente, el NNI es un índice que permite la gestión dinámica de la fertilización nitrogenada a nivel de parcela y distintos autores han observado que existe una relación entre los valores de NNI de una parcela y los valores de índices de vegetación derivados de imágenes multiespectrales remotas.

Para poder analizar qué índice de vegetación derivado de imágenes Sentinel-2 es el que permite una mayor aproximación al NNI en una determinada parcela y fecha, es necesario disponer de datos medidos en campo acerca del contenido de nitrógeno en los cultivos objeto de estudio.

Aunque inicialmente se preveía disponer para la elaboración de este TFM de datos de un ensayo de bandas sobrefertilizadas que permitieran conocer el valor de NNI de microparcels de ensayo de trigo y cebada, finalmente no se pudo generar esta información, con lo que este trabajo se reorientó considerando que de forma general, es posible asumir que en aquellas parcelas en las que se aplica una mayor dosis de fertilización nitrogenada, será también mayor el NNI del cultivo. Lógicamente, el NNI depende de otros muchos factores inherentes a las características del suelo y manejo de cada parcela, que podemos considerar bastante homogéneos en este estudio dada la extensión de la zona de Navarra en la que se lleva a cabo.

Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo se ha reorientado a evaluar la relación entre distintos índices de vegetación derivados de imágenes SENTINEL-2A y la dosis de abonado nitrogenado aplicado en parcela.

Además del objetivo general se detallan una serie de objetivos específicos:

- Obtención de curvas temporales comparativas de diferentes índices de vegetación según dosis de abono nitrogenado aplicado en parcelas de trigo y cebada
- Determinación del intervalo de desarrollo fenológico en el que tanto trigo como cebada presentan una respuesta espectral más dependiente a la dosis de fertilización nitrogenada.
- Obtención de curva de respuesta (rendimiento) a la aplicación de fertilizantes nitrogenados.
- Difundir los resultados de este trabajo entre los usuarios de la Plataforma sigAGROASESOR para fomentar buenas prácticas agrarias y uso de programas GIS en zonas vulnerables de nitratos.

3. MATERIAL

3.1 ZONA DE ESTUDIO

Las parcelas objeto de este estudio se encuentran ubicadas en la comarca agraria de la Cuenca de Pamplona (figura 2). Estas parcelas pertenecen a la Sociedad Cooperativa Agraria de Orvalaiz y son todas ellas de secano.

El clima de esta zona es de tipo mediterráneo continentalizado de veranos frescos y la orientación productiva es mayoritariamente cerealista.

Los cereales de mayor producción son la Cebada (*Hordeum vulgare*) y el Trigo blando (*Triticum aestivum*).

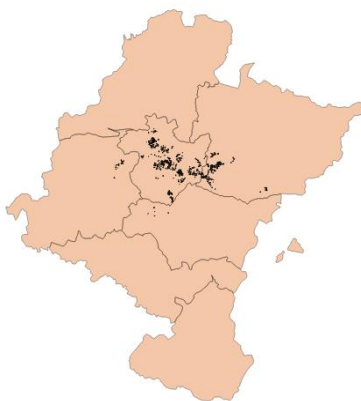


Figura 2. Mapa de comarcas de Navarra y ubicación de parcelas de estudio

Para el presente trabajo se realizó una selección de los dos cultivos más representativos de la zona, trigo blando (*Triticum aestivum*) y cebada (*Hordeum vulgare*), cereales de invierno cultivados en secano.

La Cebada (*Hordeum vulgare*) es una planta herbácea anual perteneciente a la familia Poaceae. Se aprovecha para alimentación animal, para biomasa, para bioetanol y para alimentación humana, principalmente malta para cerveza. Se maneja tanto en secano como regadío. Se siembra en los meses de otoño y se recoge en junio.

El Trigo blando (*Triticum aestivum*) es una planta herbácea anual que pertenece a la familia Poaceae. Es la especie de trigo más cultivada en el mundo y se destina para alimentación animal y humana, para biomasa y para bioetanol. Se cultiva tanto en secano como regadío. Las variedades de invierno se siembran entre octubre y noviembre y la recolección se realiza en julio.

Parte de las parcelas de estudio se encuentran ubicadas dentro de una Zona Vulnerable a la contaminación por nitratos, en concreto la Zona 4, relacionada con la cuenca vertiente de la masa de agua superficial del río Robo. En la figura 3 se puede consultar la delimitación de las superficies territoriales, declaradas zonas vulnerables por la contaminación de nitratos procedentes de fuentes agrarias, según la

información geográfica publicada en la Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra, (IDENA).

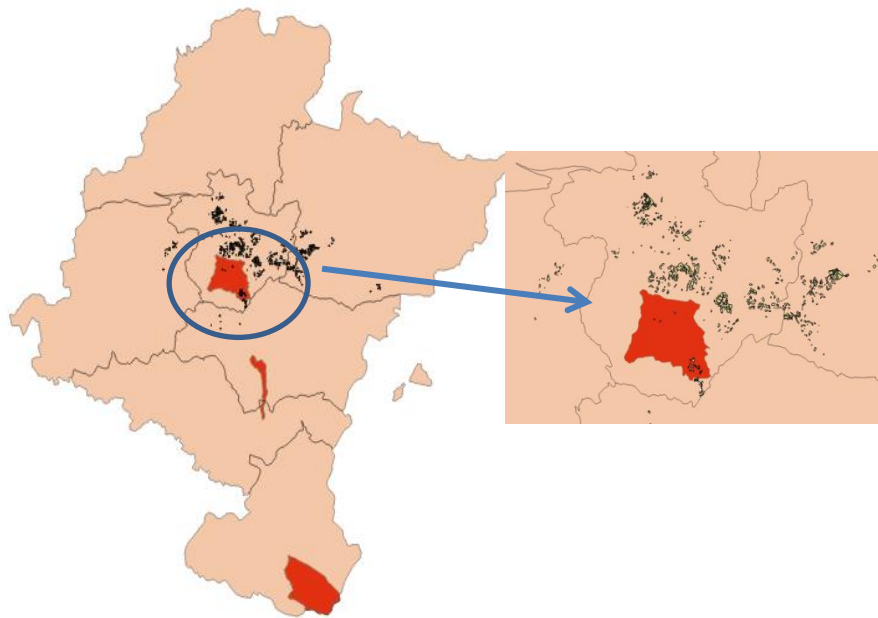


Figura 3. Zonas vulnerables a la contaminación por nitratos y ubicación de parcelas

3.2. FUENTES DE DATOS DE LAS PARCELAS

En la plataforma de servicios sigAGROAsesor se cargaron las parcelas del SIGPAC 2017. Estas parcelas están en un fichero en formato .shp, que contiene diferentes atributos como son la identificación de cada parcela mediante municipio, polígono, parcela y recinto y uso SIGPAC.

Los propietarios de las parcelas introdujeron los cultivos junto con el plan de abonado y rendimiento de cosecha de la campaña 2017 en sigAGROAsesor y esos datos constituyen el fichero base de trabajo, exportándose en formato csv. En el csv, además de estos datos, se exportó como identificador único el usuario junto la parcela agrícola.

El fichero de trabajo contiene información vectorial de un total de 370 parcelas agrícolas. En la Tabla 2 se muestra el número de parcelas y la superficie total de los cultivos objetivo. Esta superficie se calculó con QGIS una vez descontado el buffer de 10 metros tal y como se puede consultar en el apartado 3.7 del presente trabajo.

Tabla 2. Parcelas estudiadas

CULTIVO	NUMERO DE PARCELAS	SUPERFICIE TOTAL (ha)
Trigo blando	230	138
Cebada	140	83

3.3. DESCARGA DE IMÁGENES SENTINEL-2

La descarga de las imágenes Sentinel-2 se realizó desde la página de la ESA “Copernicus Open Acces Hub”: <https://scihub.copernicus.eu>

Para realizar la búsqueda de las imágenes a descargar, se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- Periodo de descarga: se buscaron imágenes con fechas comprendidas entre febrero de 2017 y junio de 2017. Los cereales estudiados son de invierno para la campaña agrícola 2017 y en el periodo comprendido entre estas fechas es cuando tiene lugar el mayor desarrollo vegetativo de los cultivos.
- Nivel de procesamiento: En el Open Hub se puede acceder a productos de nivel 1C (Top of Atmosphere Reflectance) y nivel 2A (Surface Reflectance). Para este trabajo se descargaron las de nivel 2A, ya que estas imágenes se proporcionan con la corrección atmosférica hecha.
- Zona de estudio y tiles de descarga: Aunque la superficie total de Navarra abarca 4 tiles, para este estudio se descargaron todas las imágenes en nivel 2A para los tiles TWN y TXN correspondiente con la zona de estudio de las parcelas de la Cooperativa de Orvalaiz.

Una vez filtradas las opciones, se muestran en el menú las imágenes disponibles para descargar y en el mapa se visualizan las huellas digitales de cada una las mismas.

Las fechas de descarga de las imágenes se pueden consultar en la Tabla 3. En varias fechas el porcentaje de nubosidad fue tan elevado que no se pudieron tomar como fuente fiable de datos.

Tabla 3. Fechas de descarga de imágenes

FECHAS IMÁGENES DESCARGADAS	IMÁGENES EMPLEADAS PARA EL TRABAJO
8/02/207	DESECHADA POR ALTO CONTENIDO DE NUBES
18/02/207	DESECHADA POR ESTAR IMAGEN DAÑADA -FALLOS
10/03/2017	EMPLEADA PARA TRABAJO
20/03/2017	EMPLEADA PARA TRABAJO

FECHAS IMÁGENES DESCARGADAS	IMÁGENES EMPLEADAS PARA EL TRABAJO
30/03/2017	DESECHADA POR ALTO CONTENIDO DE NUBES
9/04/2017	EMPLEADA PARA TRABAJO
19/04/2017	EMPLEADA PARA TRABAJO
29/04/2017	DESECHADA POR ALTO CONTENIDO DE NUBES
09/05/2017	DESECHADA POR ALTO CONTENIDO DE NUBES
19/05/2017	EMPLEADA PARA TRABAJO
29/05/2017	DESECHADA POR ALTO CONTENIDO DE NUBES
18/06/2017	EMPLEADA PARA TRABAJO

3.4. ARCHIVOS DESCARGADOS DE IMÁGENES SENTINEL-2

Las imágenes Sentinel-2 se distribuyen en un formato definido según la especificación Standard Archive Format for Europe (SAFE). Este formato, designado como el estándar de la ESA, contiene en una carpeta un archivo principal denominado manifest.safe, archivos binarios de imagen (Measurement), archivos de metadatos en formato xml, anotaciones y archivos de pre-visualización (quicklooks y kmIs).

La nomenclatura de los archivos descargados se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Nomenclatura imágenes descargadas de Sentinel.

En la Tabla 4 se muestran las bandas descargadas en cada imagen.

Tabla 4. Bandas descargadas para imágenes Sentinel 2A

Banda	Resolución	Longitud de onda central	Descripción
B1	60 m	443 nm	Ultra azul (Costa y Aerosol)
B2	10 m	490 nm	Azul
B3	10 m	560 nm	Verde
B4	10 m	665 nm	rojo
B5	20 m	705 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B6	20 m	740 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B7	20 m	783 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B8	10 m	842 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B8a	20 m	865 nm	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B9	60 m	940 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B10	60 m	1375 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B11	20 m	1610 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B12	20 m	2190 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)

Fuente: [Sentinel-2 Resolución espacial](#)

4. METODOLOGÍA

Como paso previo al análisis de la relación entre los índices de vegetación con diferentes dosis de fertilización nitrogenada se procedió a realizar un pre-procesamiento de las imágenes descargadas de SENTINEL-2. Este procesamiento consistió en un remuestreo de las imágenes y mosaicado para unir los dos tiles en uno solo y una vez finalizado este proceso, se calcularon los índices de vegetación. Con el objetivo de minimizar el efecto de las nubes sobre los índices calculados, se aplicaron las máscaras correspondientes a los índices ya calculados.

El siguiente paso fue extraer la información estadística de los índices de vegetación calculados para las parcelas agrícolas de la Cooperativa de Orvalaiz. Una vez que se obtuvieron los valores promedios de los índices en diferentes fechas para las parcelas, se unieron con los datos de producción y abonado que los usuarios de la plataforma SIGAgroasesor habían introducido durante la campaña agrícola.

Finalizado el proceso de generación y recopilación de todos los datos de parcelas agrícolas, dosis de abonado (UFN), rendimiento (kg/ha) y valores de índices de vegetación para diferentes fechas, se realizó el análisis estadístico de los datos y la obtención de la curvas temporales comparativas de diferentes índices de vegetación según dosis de abono nitrogenado aplicado en parcelas, tal y como se detalla en los siguientes subapartados:

4.1. DETERMINACIÓN DE ESTADOS FENOLÓGICOS DEL TRIGO Y LA CEBADA EN LA CAMPAÑA 2017

El estudio de los eventos periódicos naturales involucrados en la vida de las plantas se denomina fenología (Villalpando and Ruiz, 1993). Estos fenómenos se relacionan con el clima de la localidad en que ocurre.

Para la elaboración de este TFM se contó con información de los estados fenológicos de los cultivos durante toda la campaña 2017. La fenología se obtuvo de la plataforma sigAGROasesor a través del módulo de fenología en las Herramientas de Ayuda a la decisión (HAD), permitiendo la modelización del ciclo del cultivo en campaña real. Las claves de este módulo de Fenología son:

- Visualización de estados fenológicos a nivel de cultivo-parcela agrícola
- Integración en los motores de cálculo de las HAD que utilizan los datos de fenología.
- Posibilidad de incorporar correcciones con datos reales tomados por los agricultores en cada parcela (seguimientos)
- Caracterización de estados BBCH a nivel de cultivo/Tipo Varietal/Variedad mediante Integral térmica

La fenología de los cultivos se gestiona a nivel de cultivo, definiéndose los estados disponibles para cada cultivo, así como los índices BBCH y los grados acumulados para alcanzar cada uno de estos estados.

Esta definición de grados es genérica para todos los varietales, variedades de ese cultivo y para cualquier zona agroclimática donde se vaya a cultivar, no obstante, es posible afinar más los grados de los estados en base a estos tres niveles.

Para la determinación de los estados fenológicos se seleccionó una parcela tipo en la zona y se consultó la fenología prevista y ocurrida para los cultivos estudiados, trigo y cebada a través del módulo de trazabilidad para dos fechas límite de siembra, el 15 de octubre y el 30 de octubre de 2016. La estación agroclimática que se tomó para los cálculos es la situada en Arazuri (estación automática propiedad del Gobierno de Navarra-INTIA).





Al entrar en el calendario de fenología, la fecha del calendario se sitúa en la fecha actual, los estadios anteriores se estiman con la integral térmica sobre datos reales de campaña de la estación de Arazuri, y los estadios posteriores utilizan los 7 días de predicción más los datos históricos de la estación.

El calendario marca los estadios más importantes para cada cultivo, y permite para estos estadios BBCH, realizar modificaciones (seguimientos) para adecuar la respuesta particular del cultivo en campaña.

En la Tabla 5 se muestran los estadios fenológicos para el trigo y cebada en las fechas en las que se dispone de imágenes. Se ha indicado la aparición de la hoja bandera, dada la importancia que esta fase representa en los cereales. La hoja bandera es la última hoja que emerge del tallo y se encuentra posicionada justo por debajo de la espiga o panícula en las gramíneas. La morfología de la hoja bandera afecta significativamente al rendimiento de las gramíneas, calidad del grano, madurez y otros parámetros. Las características de la hoja bandera como forma, tamaño, contenido de clorofila y capacidad fotosintética son los parámetros considerados importantes que determinan el rendimiento en cereales.

Como se puede observar en la Tabla 5, en este trabajo se dispone de imágenes Sentinel-2 próximas a la aparición de la hoja bandera, fase importante de estudio en la fenología de ambos cultivos.

Tabla 5. Estados fenológicos del trigo y cebada en la campaña 2017.

	FECHAS	ESTADOS FENOLÓGICOS		
		SIEMBRA 15 DE OCTUBRE 2016	SIEMBRA 30 DE OCTUBRE 2016	
TRIGO BLANDO	10_03_2017	BBCH-30-925º	BBCH-21-614º	
	20_03_2017	BBCH-32-1175º	BBCH-30-926º	
	07_04_2017	Hoja		
		bandera		
	09_04_2017	BBCH-39-1363º	BBCH-32-1182º	
	19_04_2017	BBCH-39-1363º	BBCH-32-1182º	
	24_04_2017			
	19_05_2017	BBCH-65-1702º	BBCH-55-1561º	
	18_06_2017	BBCH-89-2321º	BBCH-85-2161º	
CEBADA	10_03_2017	BBCH-32-1056º	BBCH-30-801º	
	20_03_2017	BBCH- 32-1506º	BBCH-30-801º	
	28_03_2017	Hoja		
		bandera		
	09_04_2017	BBCH-39-1257º	BBCH-32-1501º	
	14_04_2017			
	19_04_2017	BBCH-55-1456º	BBCH-39-1250º	
19_05_2017	BBCH-65-1656º	BBCH-55-1450º		
18_06_2017	BBCH-89-2208º	BBCH-89-2206		

El cultivo cuya siembra fue el 15 de octubre de 2016 presenta un ciclo de cultivo más adelantado con respecto a siembras más tardías.

En la última fecha objeto de estudio (18 de junio de 2017) los Trigos con siembras más adelantadas llegaron a completar el ciclo, mientras que para las siembras del 30 de octubre el final del ciclo de cultivo tuvo lugar el 25 junio de 2017.

En el caso de la Cebada, para el 18 de junio se completó el ciclo de cultivo tanto en fechas tempranas como tardías. En las fechas tempranas se alcanza el BBCH-89 hacia el 8 de junio y en las siembras del 30 de octubre 10 días más tarde.

4.2 CÁLCULO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Para abordar el objetivo de este trabajo, se calcularon 17 índices de vegetación, considerándose como bandas del infrarrojo cercano tanto la banda del IRc de 10 m de resolución (banda 8) como las bandas del rededge (bandas 5 a 7) y la banda del IRc de 20m de resolución (banda 8A). Como se ha comentado en el apartado de introducción, para

obtener la máxima sensibilidad a la hora de estimar el contenido en pigmentos fotosintéticos en las cubiertas vegetales, las longitudes de onda se deben seleccionar lo más próximas a las bandas de absorción por parte de estos pigmentos, por lo que en este trabajo se tomó como banda del red edge la banda 7 que se aproxima a la 780 nm.

En la tabla 6 se pueden consultar los índices y las operaciones entre bandas empleadas en el cálculo de los mismos.

Tabla 6. Índices de vegetación calculados y operaciones entre bandas.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN CALCULADO	FÓRMULA EMPLEADA
GNDVI	$(B7-B3)/(B7+B3)$
IRECI	$(B7-B4)/(B5/B6)$
MCARI	$((B5-B4)-0.2(B5-B3))*(B5-B4)$
MTCI	$(B6-B5)/(B5-B4)$
NDI45	$(B7-B4)/(B7+B4)$
NDVI_8A	$(B8A-B4)/(B8A+B4)$
NDVI	$(B8-B4)/(B8+B4)$
NDVI_REDEGE	$(B7-B4)/(B7+B4)$
PSSRA	$B7/B4$
RVI_8A	$B4/B8A$
RVI	$B4/B8$
S2REP	$705+35*(((B7+B4)/2)-B5)/(B6-B5))$
SAVI_8A	$(1+0.5)*(B8A-B4)/(B8A+B4+0.5)$
SAVI	$(1+0.5)*(B8-B4)/(B8+B4+0.5)$
SAVI_REDEGE	$(1+0.5)*(B7-B4)/(B7+B4+0.5)$
MTVI2	$1.5*(1.2*(B8-B3)-2.5(B4-B3))/((2*B8+1)^2-(6*B8-5*(B4)^2)-0.5)^2$
MCARI/MTVI2	$((B5-B4)-0.2(B5-B3))*(B5-B4)/1.5*(1.2*(B8-B3)-2.5(B4-B3))/((2*B8+1)^2-(6*B8-5*(B4)^2)-0.5)^2$

Para el tratamiento y análisis geoespacial de todas las imágenes se utilizaron dos softwares, SNAP y QGIS. SNAP (Sentinel Application Platform) está desarrollado por la ESA como parte del programa Copernicus. Este Software es de libre acceso y constituye a día de hoy una de las herramientas más completas en el campo del análisis geoespacial. QGIS es un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto que permite crear, editar, visualizar, analizar y publica información geoespacial.

En la tabla 7 se muestra qué software se empleó para el cálculo de los índices.

Tabla 7. Software empleado en el cálculo de índices

INDICE	SOFTWARE
GNDVI	SNAP
IRECI	SNAP
MCARI	SNAP
MTCI	SNAP
NDI45	SNAP
NDVI_8A	SNAP
NDVI	SNAP
NDVI_REDEGE	QGIS
PSSRA	SNAP
RVI_8A	SNAP
RVI	SNAP
S2REP	SNAP
SAVI_8A	QGIS
SAVI	QGIS
SAVI_REDEGE	QGIS
MTVI2	QGIS
MCARI/MTVI2	QGIS

4.2.1 PROCESAMIENTO PREVIO DE LAS IMÁGENES

Como paso previo al cálculo de las imágenes de índices de vegetación, y puesto que en el cálculo de éstos intervienen bandas anchas, con 10 m de resolución espacial y bandas estrechas, con 20m de resolución espacial, es necesario remuestrear previamente las imágenes, en este caso, a 10m utilizando el método de vecino más próximo.

A continuación se realizó el mosaicado de las dos imágenes correspondientes a los 2 tiles descargados para que queden fusionadas en una sola imagen.

4.2.2 APLICACIÓN DE LA MÁSCARA DE NUBES A LAS IMÁGENES DE INDICES DE VEGETACIÓN

Las imágenes Sentinel-2 procesadas aplicando el método SEN2COR, desarrollado conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Aeroespacial Alemana (DLR) contienen, además de los valores en reflectividad del terreno (nivel 2A) de cada píxel, un producto clasificado en el que los píxeles de la imagen corresponden a alguna de las siguientes categorías:

0 -->NO_DATA

1 -->SATURATED_OR_DEFECTIVE

2 -->DARK_AREA_PIXELS

- 3 -->CLOUD_SHADOWS
- 4 -->VEGETATION
- 5 -->NOT_VEGETATED
- 6 -->WATER
- 7 -->UNCLASSIFIED
- 8 -->CLOUD_MEDIUM_PROBABILITY
- 9--> CLOUD_HIGH_PROBABILITY
- 10 -->THIN_CIRRUS
- 11 -->SNOW

A partir de esta clasificación, denominada “Quality Scene Classification” se realizó una reclasificación para asignar valor 1 a los píxeles válidos, es decir, aquellos clasificados como 4 (vegetación) o 5 (sin vegetación) y valor 0 al resto. De esta manera, al multiplicar los índices de vegetación por esta máscara, los píxeles válidos tienen el valor del índice y el resto, incluyendo nubes, sombras de nubes, sombras topográficas, nieve, etc. tienen valor 0.

4.2.3 EXTRACCIÓN DE ESTADÍSTICAS DE PARCELAS AGRÍCOLAS

El objetivo de este apartado es la extracción de información estadística de índices de vegetación para las parcelas agrícolas correspondientes a las parcelas de la Cooperativa de Orvalaiz.

Partiendo del archivo shape de las parcelas objeto de estudio se le aplicó un buffer de 10 metros de distancia con el fin de evitar el efecto borde, procediéndose a continuación al cálculo de las estadísticas (valores de los diferentes índices de vegetación por fecha disponible) a nivel de parcela

Señalar que todo el proceso se ejecutó con mediante el siguiente script desarrollado para QGIS utilizando la librería PyQGIS de Python (figura 5)

```
import os, fnmatch
from qgis.analysis import QgsZonalStatistics
# Cargar el archivo vectorial
# Indicar la ruta y nombre de la capa shape de parcelas
vector= QgsVectorLayer('G:\MASTER
GIS\TFM_abril_2018\DATOS_PARCELAS_ORVALAIZ\sig
piloto\sig_piloto_buffer_10m.shp','piloto', 'ogr')
```



```
QgsMapLayerRegistry.instance().addMapLayer(vector)
# Definir la carpeta donde están las imágenes de índices.
inFolder= 'G:\MASTER GIS\TFM_abril_2018\imagenes\INDICES_COMBINADOS\TOTAL_CON_MASCARAS'
#Buscar todas los ráster en carpetas y subcarpetas del directorio de trabajo
def findRasters (path, filter):
    for root, dirs, files in os.walk(path, filter):
        for file in fnmatch.filter(files, filter):
            yield os.path.join (root, file)
# Buscar en la carpeta de índices todas las imágenes con extensión tif
for raster in findRasters (inFolder, '*.tif'):
    # Separa la ruta en nombre del archivo y ubicación
    (infilepath, infilename)= os.path.split (raster)
    # Imprime en pantalla el nombre de cada imagen
    print infilename
    # Estadísticas zonales para el archivo vectorial de parcelas y todos los ráster con
    extensión tif.
    # Calcular los estadísticos, median, StDev, mean, max. Min.
    qgis.analysis.QgsZonalStatistics(vector, raster, attributePrefix=infilename,
rasterBand=1,
stats=QgsZonalStatistics.Statistics(QgsZonalStatistics.Mean)).calculateStatistics(None)
```

Figura 5. Script para el cálculo de estadísticas a nivel de parcela

Los archivos se generaron en formato .shp e incluyen toda la información del fichero de parcelas además de los atributos con las estadísticas de cada parcela, en la que incluyen los valores medios, máximos y mínimos de los píxeles, la mediana, la media y la desviación típica. Como valor representativo de cada parcela y fecha se utilizó la media y la desviación típica.

4.3 PREPARACIÓN DE LOS FICHEROS DE ANÁLISIS: DATOS DE ABONADO E IV POR PARCELA

Una vez calculadas las estadísticas de índices de vegetación para cada parcela, se cargó el dbf generado en QGIS, con el módulo Excel del software Microsoft Office 2010 para su posterior análisis.

La información relativa a las dosis de abonado nitrogenado y rendimiento de cada parcela se obtuvieron a partir de la herramienta sigAGROASESOR. En esta herramienta,

los propietarios de las parcelas introdujeron los cultivos junto con su plan de abonado y rendimiento de cosecha de la campaña 2017 y son precisamente esos datos los que se han utilizado en este trabajo para establecer posibles relaciones con los índices de vegetación en diferentes fechas.

Las dosis de abonado informadas en sigAGROASESOR se convirtieron a unidad fertilizante de nitrógeno (UFN). Esta medida se corresponde con la cantidad del elemento nutritivo que contiene un abono expresada en porcentaje o en Kg de elemento por cada 100 Kg de producto.

La unión de los datos de producción, abonado y todos los valores de índices de vegetación recogidos en los ficheros shape correspondientes se realizó utilizando los paquetes Access y Excel de Microsoft Office 2010.

Microsoft Access 2010 es un gestor de datos que utiliza los conceptos de bases de datos relacionales.

Los datos de producción y de abonado se unieron. Para ello se recogió por una parte la tabla de producción y por otra parte la tabla de abonado de SIGAgroasesor y se agruparon por Usuario_ugc con el fin de sumar las diferentes fechas de cosecha y de abonado de una misma parcela. Como resultado final se procedió a realizar una tabla de resultados con los siguientes datos:

- Usuario_Ugc
- Cultivo
- Variedad
- Valores medios por ugc para cada índice de vegetación en las diferentes fechas.
- Desviación estándar por ugc para cada índice de vegetación en las diferentes fechas.
- Sumatorio de UFN
- Rendimientos de cosecha

La tabla creada se exportó a excel. Se ordenó la tabla por el mismo orden que la hoja Excel para que los resultados de producción y abonado de las parcelas se añadieran correctamente.

4.4 ANÁLISIS DE RELACIONES ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y DOSIS DE ABONADO

Una vez que se dispuso de todos los datos de parcelas agrícolas, dosis de abonado (UFN), rendimiento (kg/ha) y valores de índices de vegetación para diferentes fechas se realizó el análisis estadístico de los datos.

4.4.1. CATEGORIZACIÓN DE LAS PARCELAS EN FUNCIÓN DE LAS UFN APLICADAS

Al analizar la relación entre dosis de abonado y valores de índices de vegetación por fechas no se obtuvo ninguna relación entre los datos, por lo que se decidió categorizar las parcelas en función de rangos de UFN. Los rangos de abonado se definieron en base a las recomendaciones de la sección de asesoramiento de cultivos extensivos de INTIA (Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias).

Para ello se establecieron varias categorías de abonado en función de unos rangos de abonado nitrogenado, UFN. Mientras que para el cultivo de cebada la dosis recomendada en la zona es de 150 UFN para el trigo la recomendación es de 170 UFN. En la Tabla 8 se establecen las categorías de abonado, 4 clases para el trigo y 3 clases para la cebada.

Tabla 8. Categorías de abonado en parcelas

	CATEGORIA	CLASE	UFN
TRIGO BLANDO	MUY BAJA	1	0-100
	BAJA	2	101-150
	CORRECTA	3	150-180
	ALTA	4	181-250
CEBADA	BAJA	1	0-120
	CORRECTA	2	121-180
	ALTA	3	181-250

4.4.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN CADA CATEGORÍA DE ABONADO

Para poder comparar las medias de los valores de los índices de vegetación en los diferentes grupos de abonado definidos, se pueden aplicar varias pruebas estadísticas dependiendo de si se cumplen una serie de supuestos de partida. Las pruebas paramétricas exigen que se cumpla la normalidad en la distribución de los datos, la igualdad de varianzas y la independencia de las observaciones, por lo que se hace necesario el estudio de la distribución de los datos.

Este estudio, considerando las cuatro categorías de datos para cada índice se realizó en dos scripts de R, uno para el trigo y otro para la cebada.

R es un lenguaje y entorno de programación enfocado al análisis estadístico y la representación de gráficos. Es un software libre que forma parte del sistema GNU y se distribuye bajo la licencia GNU GPL. El desarrollo de los scripts se efectuó mediante el software RStudio. Rstudio es un entorno de desarrollo integrado para R, que está disponible tanto en ediciones de código abierto como comerciales.

Los datos se representan mediante diagramas de caja (box-plot). Este tipo de gráficos están basados en cuartiles y suministran información sobre los valores mínimos y máximos, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución. En la figura 6 se incluye el script de R para el caso del

trigo. Cada rango de abonado se identifica como C1, C2, C3 y C4 (de muy bajo a alto) para el trigo y C1, C2, C3 (bajo, correcta y alto) para la cebada.

```
b = list.files(pattern="*.txt")  
  
###l loop, para repetir la accion: box-plot, i veces.  
###se indican el número de índices, en este caso 102  
for (i in 1:102){  
  assign(paste0("bb",i),read.table(b[i],header=T, sep="\t", dec="."))  
}  
  
###crea una lista de los archivos .txt que se llaman "bbb"  
lista<-mget(paste0( "bb" , 1:102))  
  
###crear las figuras y se guardan en el directorio  
for (i in 1:length(lista)){  
  na = gsub(".txt", "",b[i])  
  tiff(file=paste(na,".tiff",sep=""),width = 20, height = 15, units = 'cm', res = 300)  
  #par(mar=c(5.1,4.1,2.1,2.1))  
  box-plot(lista[[i]], col="pink", main=na,ylab=na,xlab="Tratamiento"  
    ,at = c(1,2,3,4),names = c("C1", "C2", "C3", "C4"))  
  dev.off()  
}
```

Figura 6. Script para obtener diagrama de cajas en R

4.4.3 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN FUNCIÓN DE LAS DOSIS DE ABONADO

Una vez calculados los valores promedios de los índices para cada categoría de abonado nitrogenado, se representaron las curvas temporales para cada índice de vegetación. Con estas curvas se pretende analizar la evolución de los valores de los índices durante el ciclo de cultivo además de comprobar si existen diferencias entre las curvas temporales de índices de vegetación en función de las distintas dosis de abonado consideradas.

Para la representación de los datos se empleó el módulo Excel del software Microsoft Office 2010.



4.4.4 ANÁLISIS DE DIFERENCIAS ENTRE CATEGORÍAS DE ABONADO: PRUEBA DE KRUSKALL-WALLIS.

Como se ha comentado en el apartado 4.4.1, no se obtuvo ninguna relación al trabajar con datos absolutos de dosis de abonado e índices de vegetación. Por este motivo se trabajó con categorías de dosis de abonado.

Tal y como se puede observar en el apartado de resultados, se observan diferencias entre las curvas temporales de índices de vegetación con distintas dosis de abonado y se trató de comprobar si esas diferencias se pueden considerar significativas, así como determinar qué índices permiten detectar mejor esas diferencias y en qué fechas las distintas dosis de abonado tienen mayor efecto en los valores de radiancia que detecta el sensor y por lo tanto, en los IV calculados a partir de las imágenes.

Una vez estudiada la distribución de los datos según se ha comentado en el apartado 4.4.2, se comprueba que los datos a comparar no cumplen los requisitos para poder aplicar pruebas paramétricas, por lo que se utilizó la prueba de Kruskall-Wallis para determinar si podía analizarse la existencia o no de diferencias significativas entre los valores de los índices de vegetación entre las distintas categorías de abonado. Ya que se trata de una prueba no paramétrica esta prueba no asume normalidad en los datos.

En el test Kruskall-Wallis la hipótesis nula y alternativa se pueden formular del siguiente modo:

- Hipótesis nula (H_0): Se examina la hipótesis de que las muestras provengan de la misma población o de poblaciones de idéntico comportamiento.
- Hipótesis alternativa (H_1): no todas las muestras provienen de la misma población.

En el test de Kruskall-Wallis se ordenan todas las observaciones de menor a mayor y se le asigna a cada una de ellas su rango, cuando se obtenga la suma de rangos para cada uno de los grupos (R_i) es de esperar que, si se cumple la hipótesis nula, todos los grupos tengan un valor similar. Partiendo de esta idea se calcula el estadístico H como:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^K \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Se asume que el estadístico H sigue una distribución χ^2 con k-1 grados de libertad (siendo k el número de grupos a comparar). Este estadístico siempre va acompañado de un valor de probabilidad asociado. Normalmente se nombra como sig (bilateral) o P-valor. Este valor es el que determina si el estadístico calculado ha resultado significativo.

El test Kruskall-Wallis se aplicó utilizando con el módulo xlstat para Microsoft Excel. Este módulo ofrece un conjunto de herramientas para el análisis de los datos.

4.5. RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN ACUMULADOS Y DOSIS DE FERTILIZACIÓN

En este apartado se pretende analizar la relación entre los valores de índices de vegetación acumulados en cada parcela y las UFN aplicadas en dicha parcela. A priori es de esperar que una mayor dosis de UFN se corresponda con un mayor desarrollo del cultivo y por tanto con un mayor valor de IV. Todas estas relaciones se analizaron a nivel de parcela.

Para representar los valores acumulados de los índices de vegetación se calculó el sumatorio de los valores para las 6 fechas de estudio.

Cada valor calculado se corresponde con una dosis de abono nitrogenado. Para la representación de los datos se empleó el módulo Excel del software Microsoft Office 2010.

Para mostrar tendencias de datos en el gráfico creado, se agregó una línea de tendencia lineal. En este tipo de línea los datos son lineales si el patrón en sus puntos de datos es similar a una línea y se calculó el valor de R^2 .

El valor de R^2 (Coeficiente de correlación) en regresión lineal, es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2}$$

(Donde, σ_{XY} es la covarianza de XY, σ_X es la desviación típica de la variable X y σ_Y es la desviación típica de la variable Y. Si el valor se aproxima a 1 mayor correlación existirá entre las variables.

4.6. RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN ACUMULADOS Y RENDIMIENTO

En este apartado se pretende analizar la relación entre los valores de índices de vegetación acumulados en cada parcela y el rendimiento obtenido en dicha parcela. Es de esperar que un mayor valor de rendimiento se corresponda con un mayor desarrollo del cultivo y por tanto con un mayor valor de IV. Todas estas relaciones se analizaron a nivel de parcela.

Para representar los valores acumulados de los índices de vegetación se calculó el sumatorio de los valores para las 6 fechas de estudio.



Para mostrar tendencias de datos en el gráfico creado, se agregó una línea de tendencia lineal. En este tipo de línea los datos son lineales si el patrón en sus puntos de datos es similar a una línea y se calculó el valor de R^2 (Coeficiente de determinación) al igual que en el apartado 4.5.

4.7. CURVA UFN-RENDIMIENTO

Mediante la representación de esta curva se pretende analizar la relación entre dosis de abonado y rendimiento. Esta relación se analizó a nivel de parcela. En principio se podría esperar que una mayor dosis de abonado se traduzca en un mayor rendimiento de cosecha.

Para la representación de los datos se empleó el módulo Excel del software Microsoft Office 2010. Se eligen los gráficos de puntos o dispersión y al igual que en el punto anterior se mostraron tendencias de datos en el gráfico creado, y se calculó el valor del coeficiente de correlación, R^2 .

5. RESULTADOS

5.1. RESULTADOS DE LA CATEGORIZACIÓN DE PARCELAS EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE ABONADO

Aunque el fichero de trabajo inicial contaba con 230 parcelas de trigo y 140 parcelas de cebada, no pudieron emplearse todas ya que en la plataforma SIGAgroasesor no todos los usuarios habían introducido su plan de abonado y algunos de los datos introducidos se desecharon por considerarse erróneos. Finalmente el fichero de trabajo estaba formado por 164 parcelas para trigo y 101 parcelas para la cebada. En la tabla 9 se puede consultar el número de parcelas consideradas para cada rango de abonado.

Tabla 9. Parcelas en cada rango de abonado

	CATEGORIA	UFN	NUMERO PARCELAS
TRIGO BLANDO	MUY BAJA	0-100	25
	BAJA	101-150	68
	CORRECTA	150-180	10
	ALTA	181-250	61
CEBADA	BAJA	0-120	59
	CORRECTA	121-180	9
	ALTA	181-250	33

5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN CADA CATEGORÍA DE ABONADO

Este estudio se realiza para conocer si la distribución de los datos sigue una distribución normal. Del estudio de la distribución de los datos tanto para la cebada como para el trigo se observa que, en general, los datos son asimétricos, la mayoría de los datos se ubican en la parte superior o inferior de la gráfica. Esta asimetría indica que los datos pueden no estar distribuidos normalmente.

La dispersión de los datos es variable por rangos de tratamiento y por fechas. La fecha del 19 de mayo es la que presenta los valores menos homogéneos.

Una vez analizada la distribución de los datos y comprobarse que no siguen una distribución normal se elige el test de Kruskal-Wallis como prueba estadística de análisis no paramétrica.

Los diagramas de cajas para el trigo y para la cebada para cada índice se pueden consultar en el ANEXO 1.

5.3 ANÁLISIS DE LAS CURVAS TEMPORALES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA TRIGO

En los gráficos que se presentan a continuación se representa la evolución temporal del valor promedio de los índices estudiados agrupados en los 4 rangos de tratamiento de fertilización nitrogenada. Las escalas de los gráficos no son constantes para facilitar la visualización de los datos.

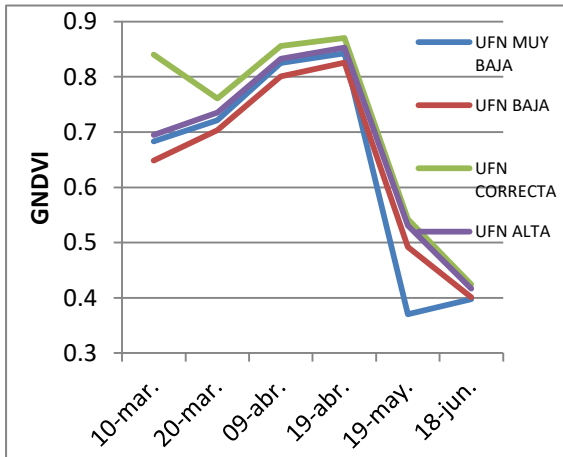


Figura 7. Curva temporal del GNDVI trigo

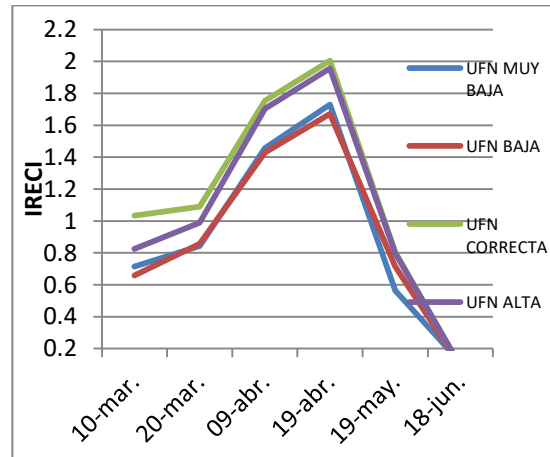


Figura 8. Curva temporal del IRECI trigo

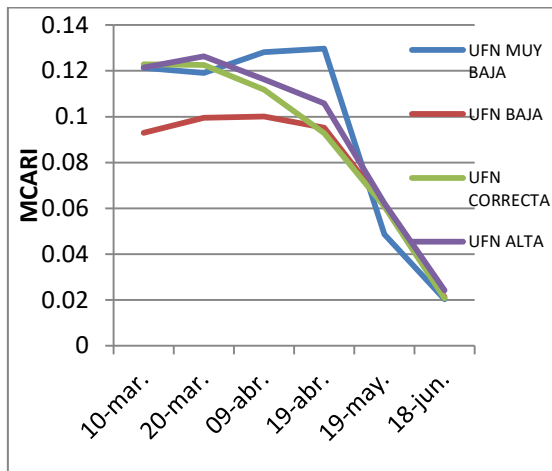


Figura 9. Curva temporal del MCARI trigo

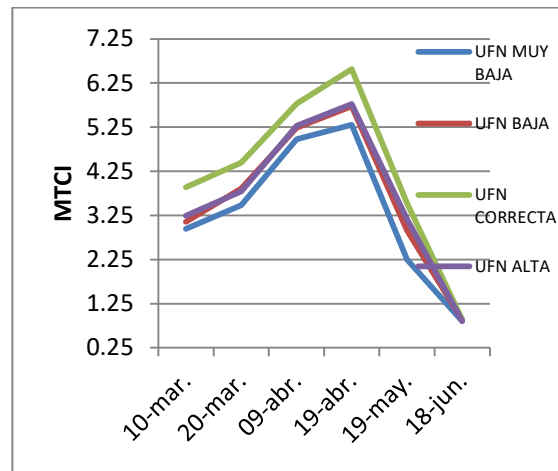


Figura 10. Curva temporal del MTCl trigo

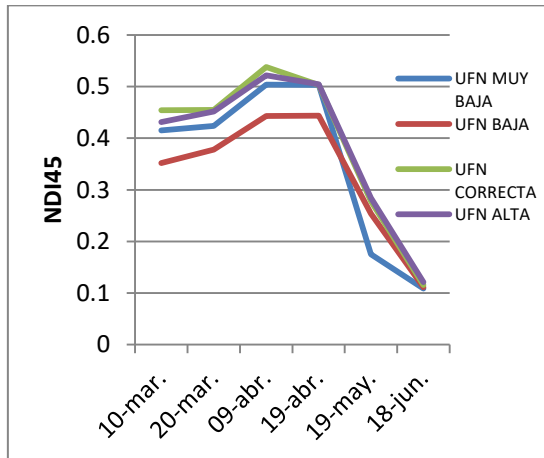


Figura 11. Curva temporal del NDI45 trigo

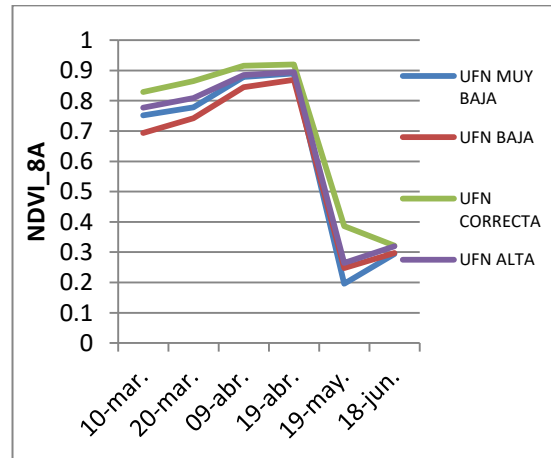


Figura 12. Curva temporal del NDVI_8A trigo

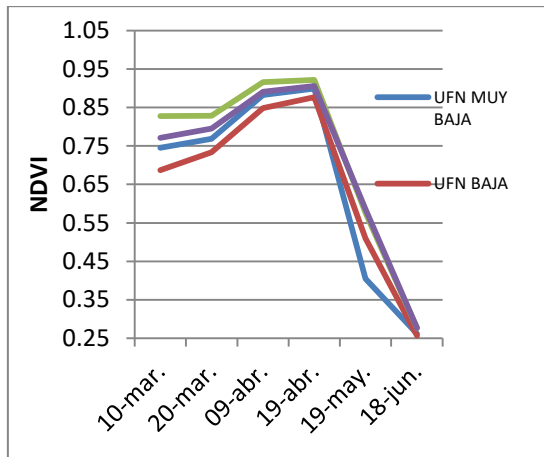


Figura 13. Curva temporal del NDVI trigo

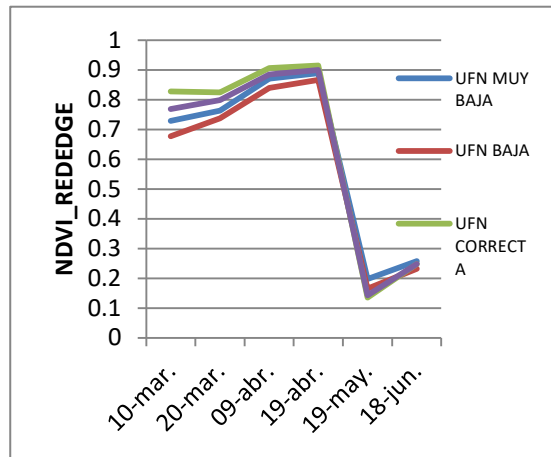


Figura 14. Curva temporal del NDVI_REDEGE trigo

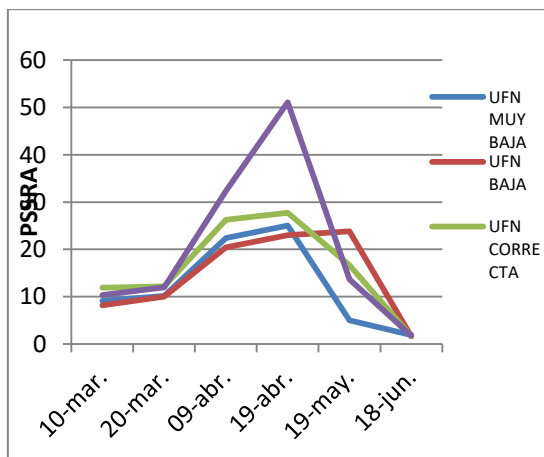


Figura 15. Curva temporal del PSSRA trigo

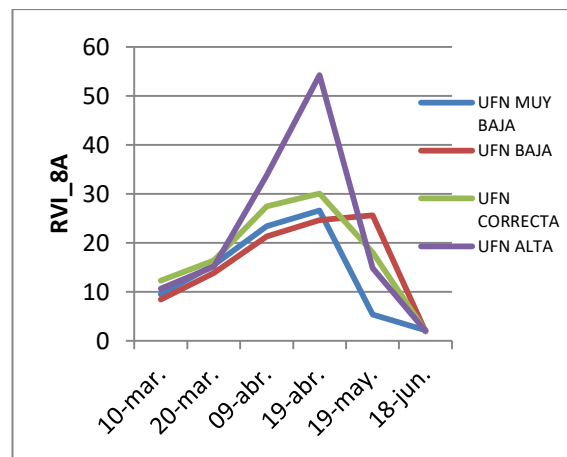


Figura 16. Curva temporal del RVI_8A trigo

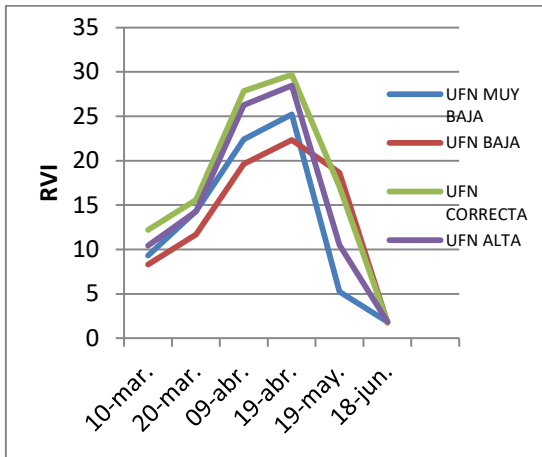


Figura 17. Curva temporal del RVI para trigo

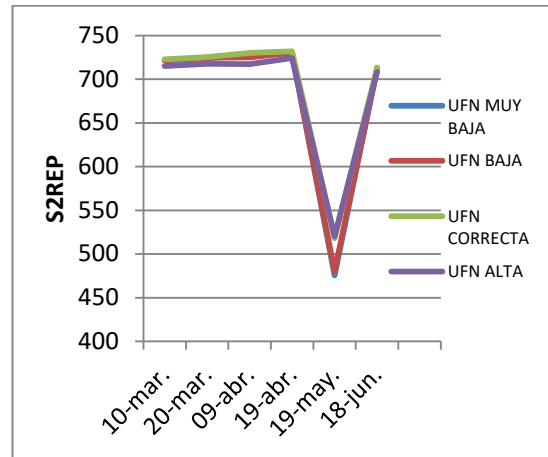


Figura 18. Curva temporal del S2REP para trigo

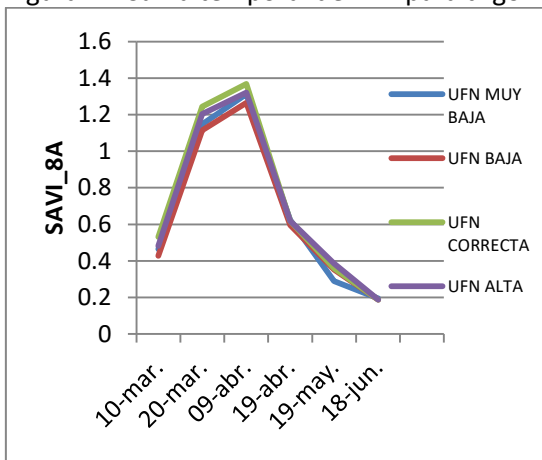


Figura 19. Curva temporal del SAVI_8A trigo

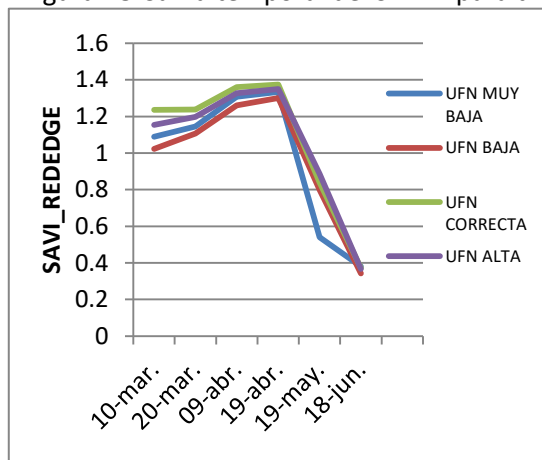


Figura 20. Curva temporal del SAVI_REDEEDGE trigo

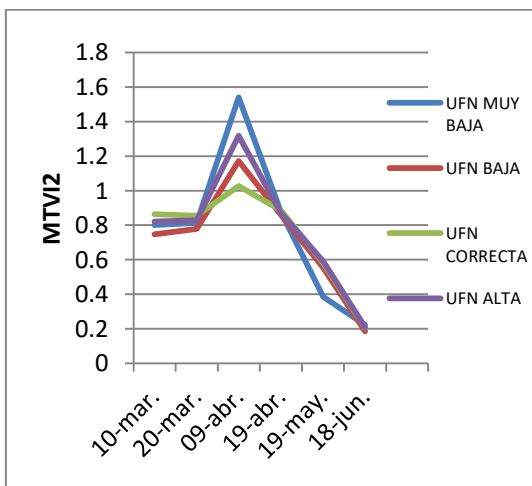


Figura 21. Curva temporal del MTVI2 trigo

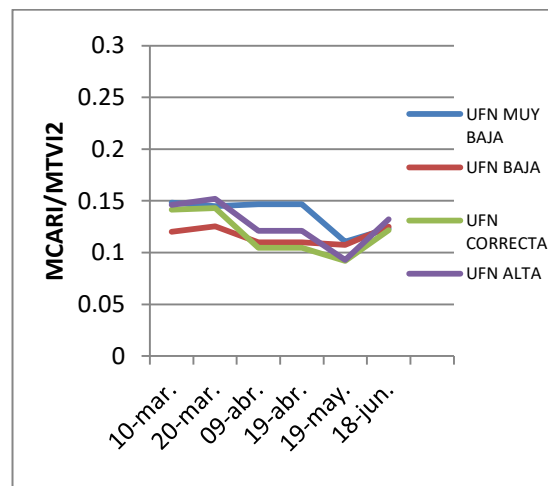


Figura 22. Curva temporal del MCARI/MTVI2 trigo

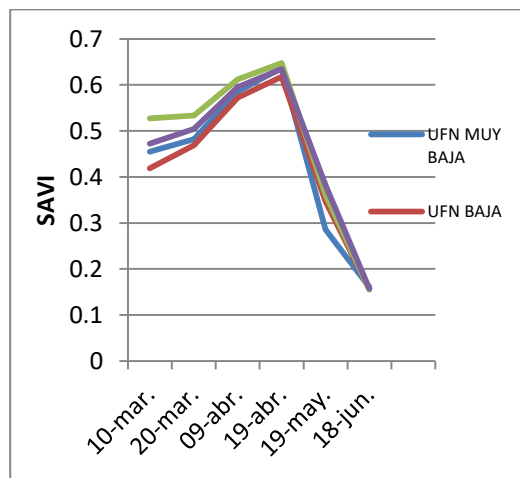


Figura 23. Curva temporal del SAVI trigo

Todas las curvas temporales a excepción de la curva del índice S2 REP siguen un patrón de resultados similar. Desde el 10 de marzo hasta el 19 de abril (9 de abril para las curvas de SAVI_8A y MTVI2) la curva tiene pendiente positiva, es decir conforme avanza el ciclo fenológico del cultivo los valores de los índices van aumentando. A partir de ese rango de fechas (9-19 de abril), la pendiente es negativa, coincidiendo con el fin de encañado, lo que significa que un avance en el ciclo de cultivo se traduce en menor valor de índice. Este modelo es el mismo para todos los rangos de abonado.

En todos los índices excepto en MCARI, PSSRA, RVI_8A, MTVI2 y MTVI2/MCARI el rango que da mayores valores en los índices se corresponde con la categoría de abonado que se considera correcta (150-180 UFN), seguida del rango de abonado muy alto (181-250 UFN). Este significa que un mayor aporte en abono nitrogenado no se ha traducido en un mayor valor de índice.

La respuesta de los índices MCARI, MTVI2 y su cociente MCARI/MTVI2 al abonado nitrogenado es similar. El mayor valor lo presenta la dosis muy baja, y el menor valor es para la correcta.

Hay dos índices que siguen el mismo modelo de evolución de datos, el RVI_8A y el PSSRA. En estos índices el mayor valor lo presenta la dosis alta, y el menor valor es para la dosis baja.

Si se relacionan las fechas con los estados fenológicos calculados, se observa que para siembras tempranas, el análisis de los datos se inició con el comienzo de encañado. Para el 19 de abril los trigos estaban en fin de encañado con la hoja bandera completamente desarrollada y llegaron al 19 de mayo en floración, con un 50% de antenas maduras.

Para las siembras más retrasadas el análisis de los datos se inició con el comienzo de ahijado. Para el 19 de abril los trigos estaban en encañado 2 nudos con el segundo nudo perceptible a 2 cm del primer nudo y llegaron al 19 de mayo a espigado, con un 50% de las espigas emergidas.

5.4 ANÁLISIS DE LAS CURVAS TEMPORALES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA CEBADA

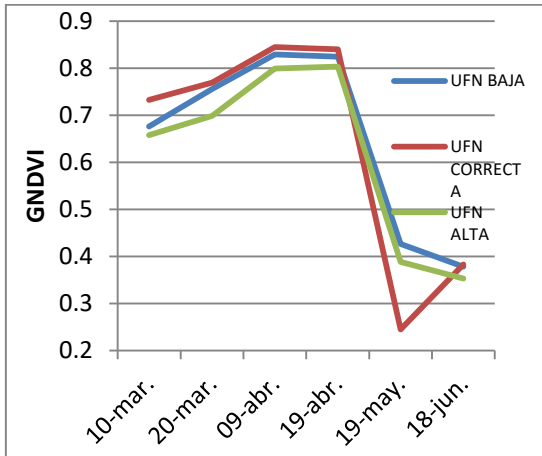


Figura 24. Curva temporal del GNDVI cebada

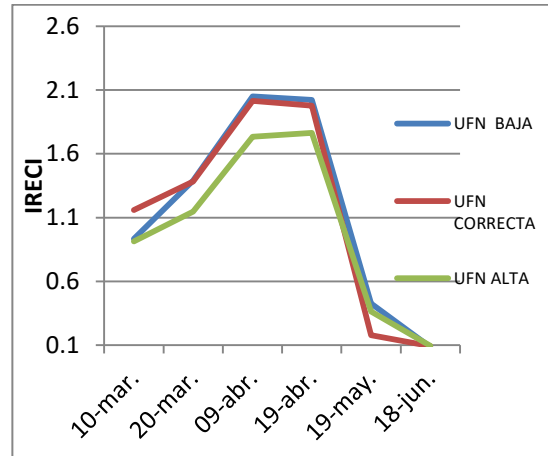


Figura 25. Curva temporal del IRECI cebada

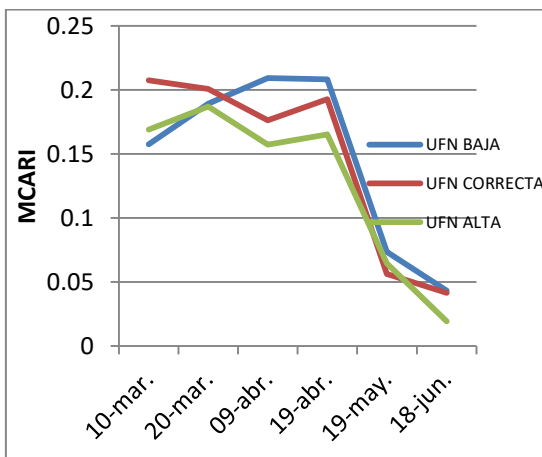


Figura 26. Curva temporal del MCARI cebada

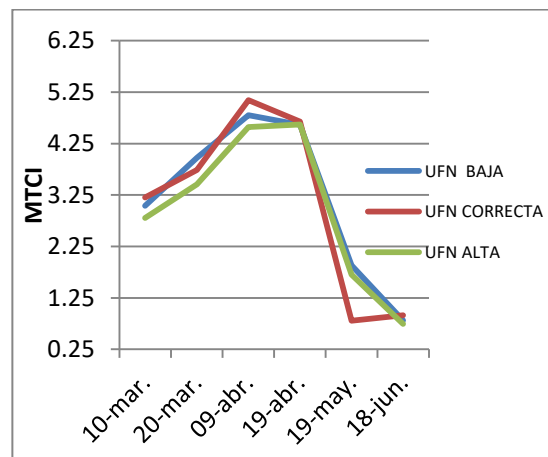


Figura 27. Curva temporal del MTCI cebada

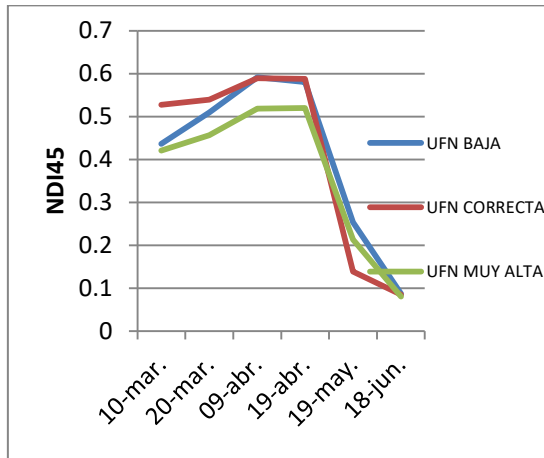


Figura 28. Curva temporal del NDI45 cebada

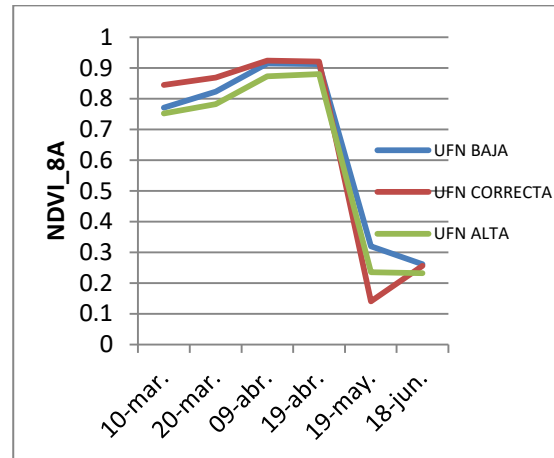


Figura 29. Curva temporal del NDVI_8A cebada

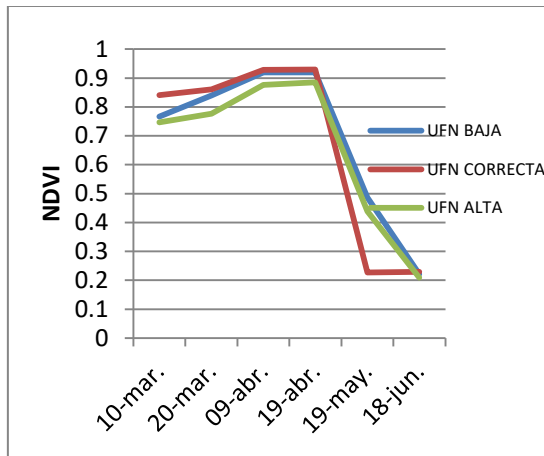


Figura 30. Curva temporal del NDVI cebada

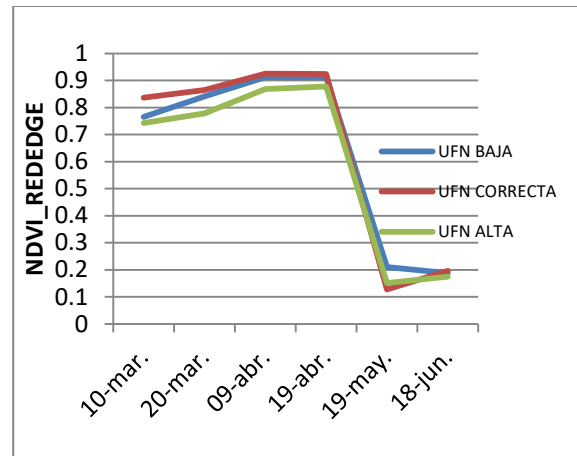


Figura 31. Curva temporal del NDVI_REDEGE cebada

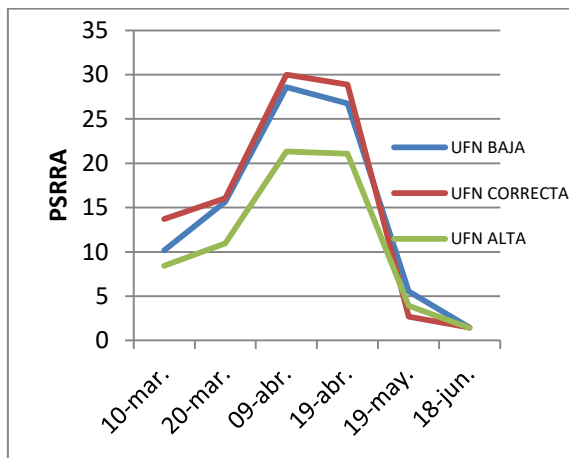


Figura 32. Curva temporal del PSSRA cebada

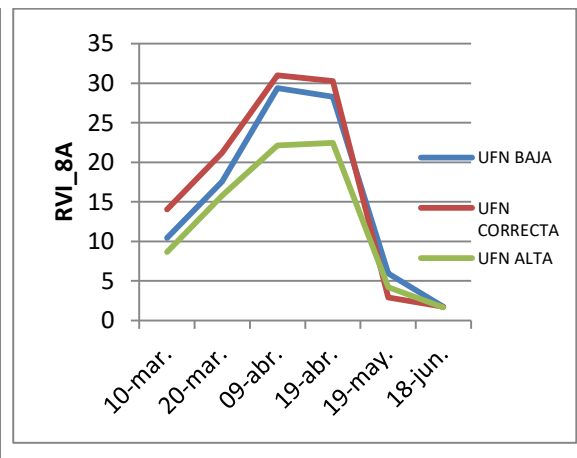


Figura 33. Curva temporal del RVI_8A cebada

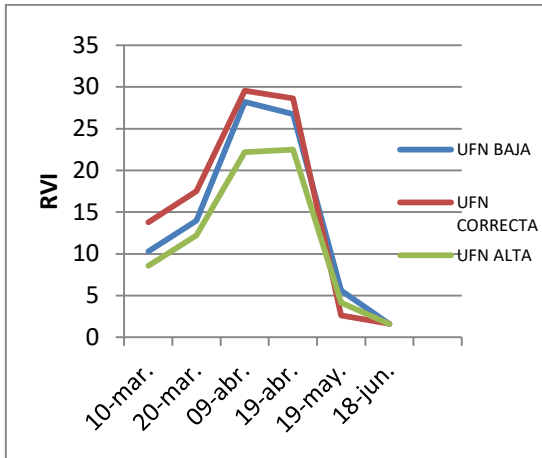


Figura 34. Curva temporal del RVI para cebada

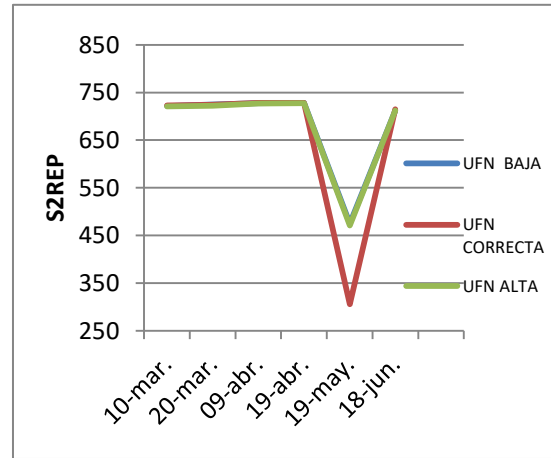


Figura 35. Curva temporal del S2REP cebada

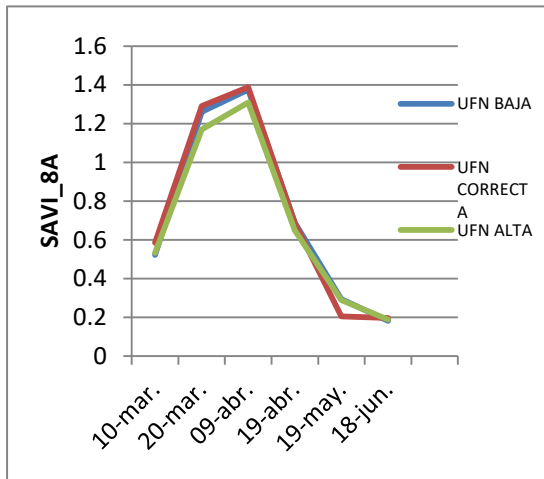


Figura 36. Curva temporal del SAVI_8A cebada

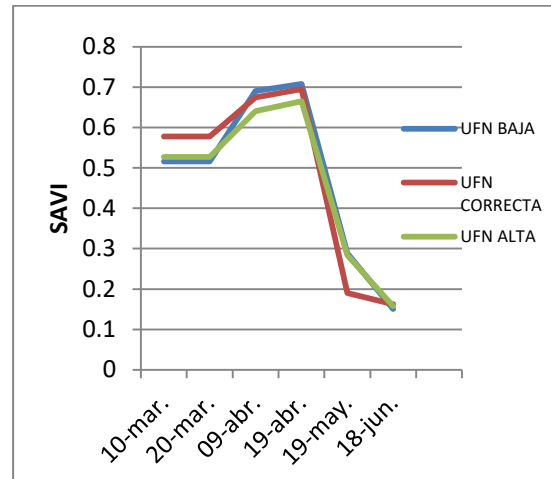


Figura 37. Curva temporal del SAVI cebada

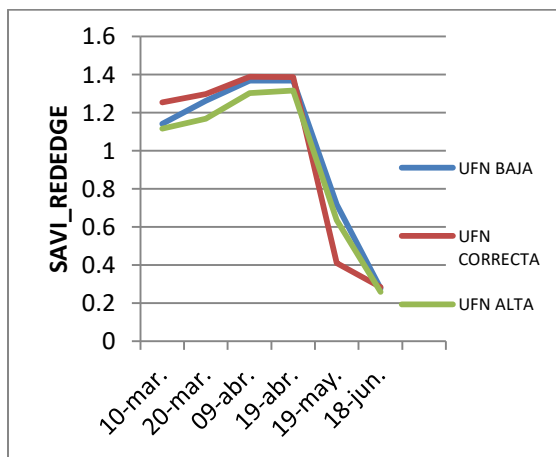


Figura 38. Curva temporal del SAVI_REDEDEGE

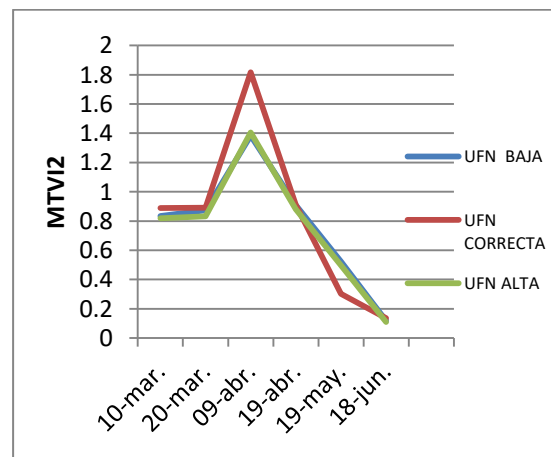


Figura 39. Curva temporal del MTVI2 cebada

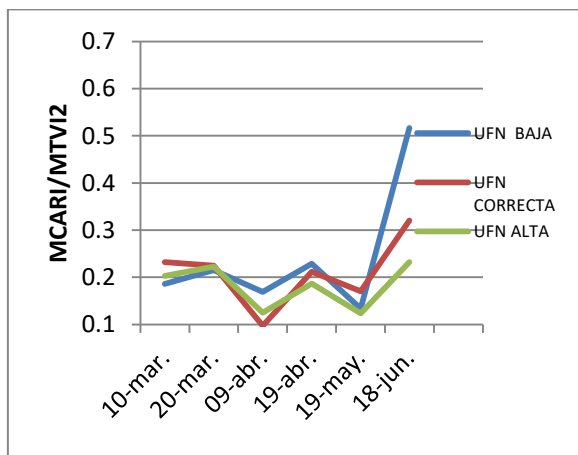


Figura 40. Curva temporal del MCARI/MTVI2
cebada

Todas las curvas temporales a excepción de la curva del índice SAVI_8A, MCARI, PSSRA, MTVI2 Y MCARI/MTVI2 siguen el mismo patrón de resultados. Desde el 10 de marzo hasta el 19 de abril la curva tiene pendiente positiva, es decir conforme se avanza en el tiempo los valores de los índices van aumentando. A partir del 19 de abril la pendiente es negativa, coincidiendo con el fin de encañado, lo que significa que un avance en el ciclo de cultivo se traduce en menor valor de índice. Este modelo es el mismo para todos los rangos de abonado. En los índices SAVI_8A, PSSRA y MTVI2 los valores aumentan hasta el 9 de abril, fecha a partir de la cual la pendiente se vuelve negativa.

En todos los índices excepto en MCARI, S2REP y MTVI2/MCARI el rango que da mayores valores en los índices se corresponde con la categoría de abonado que se considera correcta (121-180 UFN), mientras que el menor valor se obtiene con el rango de abonado alto (181-250 UFN). Esto significa que un mayor aporte en abono nitrogenado no se ha traducido en un mayor valor de índice. En el índice S2REP los valores son muy similares, llegando casi a solaparse hasta la fecha del 19 de abril en la que la dosis de abonado correcta es la que valores más bajos da.

Hay tres índices que siguen el mismo modelo de evolución de datos, el RVI, RVI_8A y el PSSRA.

Si se relacionan las fechas con los estados fenológicos calculados, se observa que para siembras tempranas, el análisis de los datos se inició con encañado, 2 nudos. Para el 19 de abril las cebadas estaban en espigado y llegaron al 19 de mayo en floración, con un 50% de antenas maduras.

Para las siembras más retrasadas el análisis de los datos se inició con el comienzo de encañado. Para el 19 de abril las cebadas estaban en fin de encañado, con la hoja bandera completamente desarrollada y llegaron al 19 de mayo a espigado, con un 50% de las espigas emergidas.

5.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE KRUSKALL-WALLIS

A la hora de analizar los datos del test de Kruskal-Wallis si el valor de P-valor es menor que 0,05, entonces se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existen diferencias significativas entre la clases estudiadas con un nivel de significación del 5%.

En la Tabla 10 se muestra en qué fechas las diferencias entre clases de abonado son significativas después de realizar el test Kruskal-Wallis para el cultivo del trigo.

Tabla 10. Resultado del test Kruskal-Wallis para el trigo

FECHAS	GNDVI	IRECI	MCARI
10_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
20_03_2017	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
09_04_2017	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
19_04_2017	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	1	4	4

FECHAS	MTCI	NDI45	NDVI_8A
10_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
20_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
09_04_2017	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
19_04_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	3	4	3

FECHAS	NDVI	NDVI_REDEGE	PSRRA
10_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
20_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
09_04_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
19_04_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	3	3	2

FECHAS	RVI_8A	RVI	S2REP
10_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
20_03_2017	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
09_04_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
19_04_2017	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA

FECHAS	RVI_8A	RVI	S2REP
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	2	4	0

FECHAS	SAVI_8A	SAVI	SAVI_REDEEDGE
10_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
20_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
09_04_2017	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
19_04_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	3	2	3

FECHAS	MTVI2	MCARI/MTVI2
10_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
20_03_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
09_04_2017	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
19_04_2017	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	3	4

Como se puede observar en los datos, no hay ningún índice en el que para todas las fechas estudiadas las diferencias entre los 4 rangos de abonado nitrogenado resulten significativas.

Existe un grupo de índices que discrimina las distintas clases de abonado con 4 fechas significativas y son IRECI, MCARI, NDI45, RVI y MCARI/MTVI2. En todos ellos las fechas en las que las diferencias son significativas son las 4 primeras.

El índice que peor discrimina las clases es el S2REP con 0 fechas significativas.

En el final del ciclo de cultivo no hay ningún índice que pueda discriminar correctamente las distintas categorías de abonado.

Estos resultados muestran que los índices de vegetación que presentan diferencias significativas entre rangos de abonado lo hacen en el estadio fenológico de encañado. Se considera en este momento el fin de crecimiento vegetativo. A partir de este momento, los valores de los índices comienzan a decrecer ya que después de la floración, las hojas pierden su color verde ya que el nitrógeno es redistribuido a los granos.

Para los índices NDVI se han calculado 3 variantes (NDVI, NDVI_8A y NDVI_REDEGE) y se observa que el resultado es el mismo con cualquiera de estos índices, con 3 fechas significativas.

En el caso del grupo de índices SAVI se han calculado también variantes (SAVI, SAVI_8A y SAVI_REDEGE) y en el índice SAVI solo se discriminan las categorías de abonado en 2 fechas, mientras que en el resto son 3 las fechas en las que las diferencias son significativas.

Para el caso del índice RVI, como se ha comentado anteriormente este índice está entre el grupo que mejores resultado presenta con 4 fechas significativas, mientras que en el RVI_8A solo hay 2 fechas con diferencias significativas.

En la Tabla 11 se muestra en qué fechas las diferencias entre clases de abonado son significativas después de realizar el Test Kruskal-Wallis para el cultivo de la cebada.

Tabla 11. Resultado del test de Kruskal-Wallis para la cebada

FECHAS	GNDVI	IRECI	MCARI
10_03_2017	SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
20_03_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
09_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	4	3	3

FECHAS	MTCI	NDI45	NDVI_8A
10_03_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
20_03_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
09_04_2017	NO SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_04_2017	NO SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_05_2017	SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	3	4	4

FECHAS	NDVI	NDVI_REDEGE	PSRRA
10_03_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
20_03_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
09_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	4	4	4

FECHAS	RVI_8A	RVI	S2REP
10_03_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
20_03_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
09_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
19_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	4	4	2

FECHAS	SAVI_8A	SAVI	SAVI_REDEEDGE
10_03_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
20_03_2017	SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
09_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	3	2	4

FECHAS	MTVI2	MCARI/MTVI2
10_03_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
20_03_2017	SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
09_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_04_2017	SIGNIFICATIVO	SIGNIFICATIVO
19_05_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
18_06_2017	NO SIGNIFICATIVO	NO SIGNIFICATIVO
SUMATORIO FECHAS SIGNIFICATIVAS	4	3

Como se puede observar en los datos, al igual que para el trigo no hay ningún índice en el que para todas las fechas estudiadas las diferencias entre los 3 rangos de abonado nitrogenado resulten significativas.

El grupo de índices que discrimina las distintas clases con 4 fechas significativas son GNDVI, NDI 45, NDVI_8A, NDVI, NDVI_REDEEDGE, PSSRA, RVI_8A, RVI, SAVI_REDEEDGE Y MTVI2. En todos ellos las fechas en las que las diferencias son significativas son las 4 primeras.

Los índices que peor discriminan las clases son el S2REP y el SAVI con 2 fechas significativas.

Al igual que en el trigo, al final del ciclo de cultivo no hay ningún índice que pueda discriminar correctamente las distintas categorías de abonado. Estos resultados muestran igual que lo comentado para el trigo, que los índices de vegetación que presentan diferencias significativas entre rangos de abonado lo hacen en el estadio

fenológico de encañado. A partir de este momento, los valores de los índices comienzan a decrecer ya que después de la floración, las hojas pierden su color verde ya que el nitrógeno es redistribuido a los granos.

Para los índices NDVI se han calculado 3 variantes (NDVI, NDVI_8A y NDVI_REDEEDGE) y se observa que el resultado es el mismo con cualquiera de estos índices, con 4 fechas significativas.

En el caso del grupo de índices SAVI se han calculado también variantes (SAVI, SAVI_8A y SAVI_REDEEDGE) siendo el SAVI_REDEEDGE el índice que mejor discrimina los tratamientos.

Para el caso del índice RVI, como se ha comentado anteriormente este índice está entre el grupo que mejores resultado presenta con 4 fechas significativas, al igual que el RVI_8A.

5.6 RELACION ENTRE VALORES ACUMULADOS DE INDICES Y FERTILIZACION NITROGENADA

En el Anexo 2 se puede consultar la representación gráfica de los valores acumulados de cada índice con la dosis de abono nitrogenado en UFN para el trigo y la cebada.

En la tabla 12 se presentan los datos del coeficiente de correlación para cada relación estudiada para el trigo y en la tabla 13 para la cebada.

Tabla 12. Coeficiente de correlación para la relación entre valores acumulados de índices y UFN para trigo

ACUMULADO INDICE/UFN	VALOR R ²
GNDVI/UFN	0.0404
IRECI/UFN	0.0747
MCARI/UFN	0.0217
MTCI/UFN	0.0371
NDI45/UFN	0.0614
NDVI/UFN	0.0504
NDVI_REDEEDGE/UFN	0.0012
NDVI_8A	0.0436
PSSRA	0.0404
RVI_8A/UFN	0.0370
RVI/UFN	0.0182
S2REP/UFN	0.0123
SAVI_82/UFN	0.0385
SAVI/UFN	0.0392

ACUMULADO INDICE/UFN	VALOR R ²
SAVI_REDEGE/UFN	0.0491
MTVI2/UFN	0.0145
MCARI/MTVI2/UFN	0.0242

Tabla 13. Coeficiente de correlación para la relación entre valores acumulados de índices y UFN para cebada

ACUMULADO INDICE/UFN	VALOR R ²
GNDVI/UFN	0.1159
IRECI/UFN	0.1097
MCARI/UFN	0.0956
MTCI/UFN	0.211
NDI45/UFN	0.1394
NDVI/UFN	0.1203
NDVI_REDEGE/UFN	0.1639
NDVI_8A	0.1427
PSSRA	0.1459
RVI_8A/UFN	0.1266
RVI/UFN	0.1094
S2REP/UFN	0.0422
SAVI_82/UFN	0.0987
SAVI/UFN	0.0939
SAVI_REDEGE/UFN	0.1223
MTVI2/UFN	0.0168
MCARI/MTVI2/UFN	0.0515

Para el caso del trigo, se puede ver que hay una pendiente creciente de la línea de regresión y lo que marca es una tendencia creciente de los valores de los índices de vegetación a medida que aumenta la dosis nitrogenada. Los bajos valores del coeficiente de correlación indican una gran variabilidad de los datos alrededor de la línea de regresión, lo que dificulta el uso del modelo por si solo para realizar predicciones precisas.

Para el caso de la cebada, la pendiente decreciente de la línea de regresión marca una tendencia decreciente de los valores de los índices de vegetación a medida que aumenta la dosis nitrogenada. En este caso, con dosis bajas de abonado nitrogenado se consiguieron los valores más altos de los índices. Esto es debido a que estas parcelas tuvieron como cultivo precedente guisante (*Pisum sativum L.*), perteneciente a la

familia *Leguminosae*, cultivo fijador de nitrógeno, por lo que no se requirió un abonado tan alto.

Al igual que con el trigo, los bajos valores del coeficiente de correlación indican una gran variabilidad de los datos alrededor de la línea de regresión, lo que dificulta el uso del modelo por sí solo para realizar predicciones precisas.

5.7 RELACION ENTRE VALORES ACUMULADOS DE INDICES Y RENDIMIENTO

En el Anexo 3 se puede consultar la representación de los valores acumulados de cada índice con el rendimiento de cosecha para el trigo y la cebada.

En la tabla 14 se presentan los datos del coeficiente de correlación para cada relación estudiada para el trigo y en la tabla 15 para la cebada.

Tabla 14. Coeficiente de correlación para la relación entre valores acumulados de índices y rendimiento para trigo

ACUMULADO INDICE/RENDIMIENTO	VALOR R ²
GNDVI/RENDIMIENTO	0.0285
IRECI/ RENDIMIENTO	0.0864
MCARI/ RENDIMIENTO	0.1512
MTCI/ RENDIMIENTO	1E-05
NDI45/ RENDIMIENTO	0.1035
NDVI/ RENDIMIENTO	0.0251
NDVI_REDEEDGE/ RENDIMIENTO	0.049
NDVI_8A/RENIMIENTO	0.0187
PSSRA/RENDIMIENO	0.0972
RVI_8A/ RENDIMIENTO	0.0962
RVI/ RENDIMIENTO	0.1227
S2REP/ RENDIMIENTO	0.0004
SAVI_8A/ RENDIMIENTO	0.049
SAVI/ RENDIMIENTO	0.0273
SAVI_REDEEDGE/ RENDIMIENTO	0.0293
MTVI2/ RENDIMIENTO	0.1047
MCARI/MTVI2/ RENDIMIENTO	0.0985

Tabla 15. Coeficiente de correlación para la relación entre valores acumulados de índices y rendimiento para cebada

ACUMULADO INDICE/RENDIMIENTO	VALOR R ²
GNDVI/RENDIMIENTO	0.004
IRECI/ RENDIMIENTO	0.0044
MCARI/ RENDIMIENTO	0.0021
MTCI/ RENDIMIENTO	0.0518
NDI45/ RENDIMIENTO	0.0006
NDVI/ RENDIMIENTO	2E-06
NDVI_REDEGE/ RENDIMIENTO	0.0106
NDVI_8A/RENIMIENTO	1E-05
PSSRA/RENDIMIENO	0.0037
RVI_8A/ RENDIMIENTO	0.0116
RVI/ RENDIMIENTO	0.0079
S2REP/ RENDIMIENTO	0.0127
SAVI_8A/ RENDIMIENTO	0.0014
SAVI/ RENDIMIENTO	0.0008
SAVI_REDEGE/ RENDIMIENTO	4E-06
MTVI2/ RENDIMIENTO	0.0212
MCARI/MTVI2/ RENDIMIENTO	0.032

Si se analizan las figuras del Anexo 3 se puede observar que tanto para el trigo como para la cebada existe una pendiente creciente de la línea de regresión, marcando una tendencia creciente de los valores de los índices de vegetación a medida que aumenta el rendimiento obtenido en cosecha (más marcada dicha tendencia ascendente en el caso del trigo).

A la vista de los valores de las tablas 14 y 15 se puede afirmar que el modelo por sí solo no podría utilizarse como modelo predictivo de precisión. Los valores bajos de R² indican una gran variabilidad de los datos alrededor de la línea de regresión.

5.8. CURVA RESPUESTA ABONO NITROGENADO-RENDIMIENTO

En la figura 41 se aprecia una tendencia creciente en el rendimiento del trigo a medida que se aumentó la dosis de abono nitrogenado. El valor de R² es de aproximadamente 0.28 por lo que este modelo de regresión, sin incluir ninguna variable más, no podría utilizarse como modelo de predicción preciso de valor esperado de cosecha.

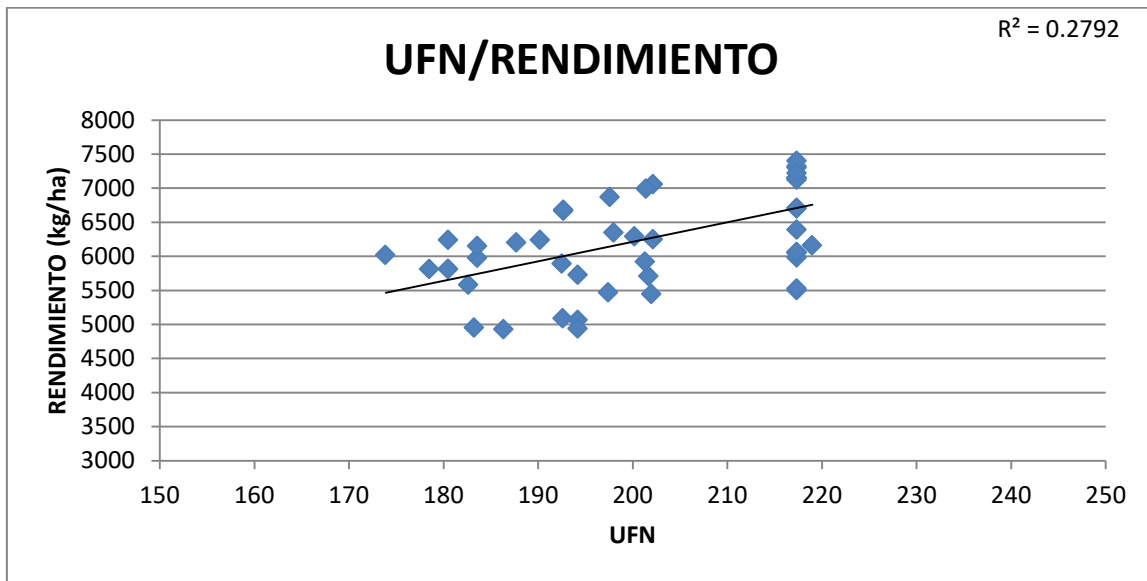


Figura 41. Curva respuesta de abono nitrogenado-rendimiento para trigo

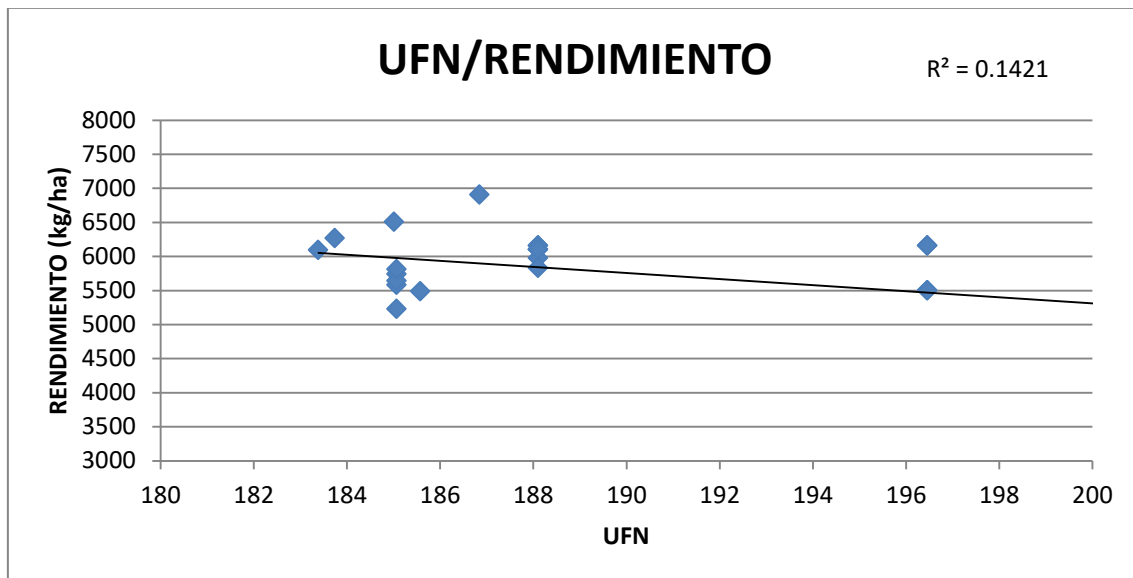


Figura 42. Curva de abono nitrogenado-rendimiento para cebada

En la figura 42 se aprecia una tendencia decreciente en el rendimiento de la cebada a medida que se aumentó la dosis de abono nitrogenado. El valor de R^2 es de aproximadamente 0.14 por lo que este modelo de regresión, sin incluir ninguna variable más, no podría utilizarse como modelo de predicción preciso de valor esperado de cosecha.

Las parcelas de cebada con valores de cosecha más altos son las que se tuvieron como cultivo precedente guisante, cultivo fijador de nitrógeno, y tras realizarse un análisis de Nitrógeno mineral en suelo se decidió aplicar menos cantidad de nitrógeno que otras parcelas, de ahí la pendiente decreciente de la línea de regresión.

6. DISCUSION

Los resultados de este trabajo muestran que los índices de vegetación que presentan diferencias significativas entre rangos de abonado para los dos cultivos estudiados lo hacen en el estadio fenológico de encañado. En el caso de los trigos que se sembraron el 15 de octubre habían alcanzado para la fecha del 19 de abril el fin de encañado con la hoja bandera completamente desarrollada y los que se sembraron el 30 de octubre estaban en fase avanzada de 2 nudos, a punto de pasar a fin de encañado. Para la cebada la fase de encañado se alcanza un poco antes que en el trigo ya que las cebadas que se sembraron el 15 de octubre para la fecha del 19 de abril se encontraban en comienzo de espigado con la fase de fin de encañado alcanzada y las que se sembraron el 30 de octubre estaban en fin de encañado con la hoja bandera completamente desarrollada. Para ambos cultivos, es en esta fase cuando tiene lugar la producción de nodos en el tallo principal, el número máximo de flores y por lo tanto el máximo potencial de rendimiento. Estos resultados van en la línea de lo publicado por diferentes fuentes bibliográficas, en las que se afirma que durante la fase de encañado la planta sufre una gran actividad fisiológica, siendo la extracción de elementos nutritivos del suelo muy elevada, sobre todo en nitrógeno (Moule, 1980) siendo el abonado nitrogenado un factor limitante del potencial del cultivo en esta fase de desarrollo.

Los índices que mejor discriminan los diferentes abonados nitrogenados en la fase de encañado para el trigo son: IRECI, MCARI, NDI45, RVI y MCARI/MTVI2. Tal y como indican Rodríguez et al. (2006) dos de estos índices (IRECI y NDI45) trabajan en la banda tomada como red edge, a 783 nm. Cilia et al. (2014) determinaron que el índice MCARI era buen indicador del contenido de nitrógeno como base del índice NNI. La banda 8A no está en ninguno de los índices con mayor respuesta a las diferencias de abonado nitrogenado.

Según los resultados obtenidos en la cebada, el grupo de índices que discrimina las distintas clases de abonado en la fase de encañado es mayor que en el trigo. Estos índices son: GNDVI, NDI 45, NDVI_8A, NDVI, NDVI_REDEEDGE, PSSRA, RVI_8A, RVI, SAVI_REDEEDGE Y MTVI2. El mayor número de índices puede ser debido a una mayor sensibilidad en la respuesta de la cebada frente al trigo en cuanto a la aplicación del nitrógeno, pero también debe tenerse en consideración el menor número de clases de abonado estudiados en la cebada, tres rangos frente a los cuatro del trigo. La banda del red edge de 780 nm está en seis de los índices que mejor discriminan la respuesta del abono con nitrógeno (GNDVI, NDI45, NDVI_REDEEDGE, PSSRA, SAVI_REDEEDGE) confirmando la experiencia de Cilia et al. (2014). La banda 8A a diferencia del trigo, si está en dos índices (NDVI_8A y RVI_8A) con mayor respuesta a las diferencias de abonado nitrogenado.

Tanto para el trigo como para la cebada, a partir de la fase de espigado hasta madurez fisiológica ningún índice discrimina las diferentes dosis de abonado.

Si se analizan las curvas temporales de los índices de vegetación en función de los rangos de abonado, en el caso del trigo, se observa que la fase de cultivo que presenta mayor incremento en los valores de los índices es la que va hasta el 19 de abril (9 de abril para SAVI_8A y MTVI2) y para la cebada, al igual que en el trigo, desde el 10 de marzo hasta el 19 de abril la curva tiene pendiente positiva (9 de abril para SAVI_8A, MCARI, PSSRA, MTVI2 Y MCARI/MTVI2). Este periodo se identifica con la fase de encañado como se ha comentado anteriormente, y se corresponde con las fechas en las que con la aplicación de diferentes dosis de abono nitrogenado se obtienen valores estadísticamente significativos.

Estos resultados ponen de manifiesto que es en la fase de encañado, hasta el momento en el que la hoja bandera está completamente desarrollada, cuando existe margen de reacción en los cultivos en su respuesta al abono nitrogenado. Se considera en este momento el fin de crecimiento vegetativo. De acuerdo con Blum (1985), en cereales como trigo y cebada la fotosíntesis de la hoja bandera tiene un papel primordial en el rendimiento de grano.

A partir de la aparición de la hoja bandera (aproximadamente 19 de abril) los valores de los índices comentados, comienzan a decrecer. Esto es debido a que después de la floración, tanto el trigo como la cebada extraen poco nitrógeno del suelo, por lo que los granos en desarrollo tienen que obtener casi todo su nitrógeno del que está almacenado en la planta, de las hojas verdes. Esta es la principal razón por la cual las hojas pierden su color verde y mueren ya que el nitrógeno es redistribuido a los granos. Cuanto menor sea la cantidad de nitrógeno almacenado, más rápidamente morirán las hojas. La cantidad de nitrógeno que ha sido almacenado depende de cuánto había disponible en el suelo antes de la antesis y de las prácticas de manejo del cultivo.

Si se analizan las dosis de abonado, en ambos cultivos, una mayor dosis de abonado no se ha traducido en un mayor valor del índice. Así, para el trigo, en 12 de los 17 índices estudiados (todos excepto MCARI, PSSRA, RVI_8A, MTVI2 y MTVI2/MCARI) los mayores valores de los índices se obtienen para el rango de abonado correcto, de 150 a 180 UFN, repitiéndose este resultado con la cebada, en la que todos los índices excepto en MCARI, S2REP y MTVI2/MCARI (14 índices estudiados) el rango que da mayores valores en los índices se corresponde con la categoría de abonado que se considera correcta de 121-180 UFN.

El índice S2 REP no se considera un índice adecuado en este estudio, ya que sigue un patrón diferente en las curvas temporales y por otra parte con este índice no se obtuvieron diferencias significativas en ninguna fecha de observación para el trigo y es con el que peores resultados se obtuvieron para la cebada.

En cuanto a la relación entre valores acumulados de índices y dosis de UFN o rendimiento, para los dos cultivos, los bajos valores del coeficiente de correlación indican una gran variabilidad de los datos alrededor de la línea de regresión, lo que dificulta el uso del modelo por si solo para realizar predicciones precisas. En un futuro, de cara a obtener un modelo de predicción fiable sería interesante añadir más

variables al modelo de modo que los predictores adicionales puedan incrementar la potencia explicativa verdadera del modelo.

De los gráficos de valores acumulados y dosis de UFN o rendimiento, se pueden extraer tendencias, lo que indica que la variable predictiva proporciona información sobre la respuesta aunque los puntos de los datos se sitúen lejos de la línea de regresión. Para el trigo, la tendencia de las dos curvas es positiva, por lo que valores altos de acumulados de índices se corresponden con valores altos de abono nitrogenado y valores altos de rendimiento. Para la cebada, con valores bajos de abonado se obtuvieron valores altos de índices acumulados y la curva de rendimiento es más plana que en el caso del trigo. Este comportamiento se pudo deber al cultivo precedente de las parcelas que menos dosis de abono nitrogenado recibieron, ya que se cultivaron tras barbecho y guisante, cultivo fijador de nitrógeno, por lo que no se requirió un gran aporte extra de abono nitrogenado mineral. Este hecho se puede encontrar en multitud de resultados que muestran cómo la introducción de leguminosas permite reducir las dosis de nitrógeno mineral a aportar a los cultivos cerealistas, aumentando al mismo tiempo su productividad. Un cereal cuando se siembra detrás de una leguminosa o un barbecho necesita significativamente menos nitrógeno mineral aportado que cuando se siembra detrás de otro cereal. Se puede hablar de un ahorro de 5 kg de N por cada tonelada de grano producido o el equivalente a 250 MJ/t de grano producido (IDAE, 2007). Estos resultados ponen en relieve la necesidad de que se efectúen análisis de Nitrógeno mineral (Nmin) en suelo antes de los abonados. Tal y como afirman Irañeta y col. (2002) este análisis en el caso de suelos con niveles altos de NMIN, pueden conseguir un ahorro significativo de fertilizantes minerales.

El rendimiento del cultivo depende de muchos factores, entre ellos la aplicación de fertilizantes, pero no se puede explicar el modelo exclusivamente con esta variable, no se pueden olvidar otros factores como por ejemplo, las propiedades del suelo, el riego, la genética de la planta, el clima, las prácticas culturales, control de plagas y enfermedades.

7. CONCLUSIONES

En primer lugar es necesario destacar que la metodología desarrollada ha demostrado que es posible determinar diferencias significativas entre los valores de los índices de vegetación en parcelas con diferentes rangos de abonado en la fase de encañado, fase más exigente en cuanto a abonado nitrogenado se refiere. Es en esta fase cuando existe margen de reacción en los cultivos en su respuesta al abono nitrogenado.

Los índices que mejor discriminan los diferentes rangos de abonados nitrogenados en la fase de encañado para el trigo son: IRECI, MCARI, NDI45, RVI y MCARI/MTVI2, mientras que para la cebada son: GNDVI, NDI45, NDVI_8A, NDVI, NDVI_REDEGE, PSSRA, RVI_8A, RVI, SAVI_REDEGE Y MTVI2. El mayor número de índices en la cebada puede ser debido a una mayor sensibilidad de la cebada frente al trigo en cuanto a la aplicación del nitrógeno, pero esta afirmación no es concluyente al haberse considerado un menor número de clases de abonado para este cultivo.

El índice S2REP no se considera un índice adecuado para discriminar dosis de abono nitrogenado en este estudio.

Un aspecto a destacar es que tanto para la cebada como para el trigo, los mayores valores de índice de vegetación se obtienen para los rangos de abonado correctos, por lo que una mayor dosis de abonado no se ha traducido en un mayor valor del índice y por lo tanto, de verdor o vigor. Sin embargo resulta difícil establecer una relación adecuada entre el valor de los índices de vegetación estudiados y la dosis de abonado nitrogenado. Un aspecto a evaluar en el futuro es la introducción de más variables que incrementen la potencia explicativa verdadera del modelo.

De los gráficos de valores acumulados y dosis de UFN o rendimiento, se pueden extraer tendencias. Para el trigo, la tendencia de las dos curvas es positiva, por lo que valores altos de acumulados de índices se corresponden con valores altos de abono nitrogenado y valores altos de rendimiento. Los altos valores acumulados de los índices para la cebada combinados con las bajas dosis de abono efectuados demuestran que es conveniente introducir leguminosas en los sistemas de producción para aprovechar su capacidad fijadora de nitrógeno.

Los resultados obtenidos para la cebada demuestran la importancia de conocer la fertilidad del suelo y la cantidad de nitrógeno que es capaz de suministrar por sí mismo. Este análisis de Nitrógeno mineral (Nmin) aporta gran información, por lo que es conveniente una analítica en suelo antes de la aplicación del abono.

Es importante recalcar la labor de los servicios de asesoramiento ofertados por distintos Centros de Investigación y Empresas de Transferencia de tecnología agraria que permiten dar pautas de asesoramiento, especialmente en zonas vulnerables a nitratos, lo que puede suponer un gran ahorro de nitrógeno, menos contaminación y más beneficio económico con una adecuada gestión del abonado.

8. BIBLIOGRAFIA

Chuvieco E., Huete A., 2010. *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*, CRC Press. ed. Boca Raton (USA)

Unión Europea 2015, Copernicus. La mirada de Europa sobre la tierra. doi: 10.2873/2338

Aguado, I., Chuvieco, E., Borén, R., Nieto, H., 2007. Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean areas. Applications in fire danger assessment. *Int. J. Wildl. Fire* 16. doi:10.1071/WF06136

Baret, F., Houlès, V., Guérif, M., 2007. Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: The case of nitrogen management. *J. Exp. Bot.* 58, 869–880. doi:10.1093/jxb/erl231

Barnes, E., Clarke, T., Richards, S., Colaizzi, P.D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R.J., Li, H., Moran, M.S., 2000. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data. *Proc. Fifth Int. Conf. Precis. Agric.* [CD Rom].

Blackmer, T.M., Schepers, J.S., Varvel, G.E., Walter-Shea, E.A., 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agron. J.* 88.

IDAE, 2007. Ahorro, Eficiencia energética y fertilización nitrogenada. doi: 978-84-96680-13-5

Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C.B., Jensen, N.O., Schelde, K., Thomsen, A., 2002. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sens. Environ.* 81, 179–193. doi:10.1016/S0034-4257(01)00342-X

Chen, P., 2015. A Comparison of Two Approaches for Estimating the Wheat Nitrogen Nutrition Index Using Remote Sensing. *Remote Sens.* 7, 4527–4548. doi:10.3390/rs70404527

Chen, P., Haboudane, D., Tremblay, N., Wang, J., Vigneault, P., Li, B., 2010. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. *Remote Sens. Environ.* 114, 1987–1997. doi:10.1016/j.rse.2010.04.006

Cilia, C., Panigada, C., Rossini, M., Meroni, M., Busetto, L., Amaducci, S., Boschetti, M., Picchi, V., Colombo, R., 2014. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. *Remote Sens.* 6, 6549–6565. doi:10.3390/rs6076549

Daughtry, C., 2000. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sens. Environ.* 74, 229–239. doi:10.1016/S0034-4257(00)00113-9

Cilia, C.; Panigada, C.; Rossini, M.; Meroni, M.; Busetto, L.; Amaducci, S.; Boschetti, M.; Picchi, V.; Colombo, R. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. *Remote Sens.* 2014, 6, 6549–6565.

(PDF) A Comparison of Two Approaches for.... Available from: https://www.researchgate.net/publication/275027979_A_Comparison_of_Two_Approaches_for_Estimating_the_Wheat_Nitrogen_Nutrition_Index_Using_Remote_Sensing [accessed Aug 20 2018].

Feng, W., Zhang, H.-Y., Zhang, Y.-S., Qi, S.-L., Heng, Y.-R., Guo, B.-B., Ma, D.-Y., Guo, T.-C., 2016. Remote detection of canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat by using water resistance vegetation indices from in-situ hyperspectral data. *F. Crop. Res.* 198, 238–246. doi:10.1016/j.fcr.2016.08.023

Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., Dextraze, L., 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* 81, 416–426. doi:10.1016/S0034-4257(02)00018-4

Moule, C, 1980. Céréales. Techniques d'avenir (agriculture). La Maison Rustique, Paris.

Hansen, P.M., Schjoerring, J.K., 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sens. Environ.* 86, 542–553. doi:10.1016/S0034-4257(03)00131-7

Lemaire, G., Jeuffroy, M.H., Gastal, F., 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *Eur. J. Agron.* 28, 614–624. doi:10.1016/j.eja.2008.01.005

Rodriguez, D., Fitzgerald, G.J., Belford, R., Christensen, L.K., 2006. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. *Aust. J. Agric. Res.* 57, 781–789. doi:10.1071/AR05361

Saberioon, M.M., Gholizadeh, A., 2016. Novel Approach for Estimating Nitrogen Content in Paddy Fields Using Low Altitude Remote Sensing System. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XLI-B1, 1011–1015. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1011-2016

Villalpando, J. y A. Ruiz, 1993. Observaciones Agrometeorológicas y su uso en la agricultura. Editorial Lumusa, México. p. 133.

Shi, S., Gong, W., Du, L., Sun, J., Yang, J., 2016. Potential Application of Novel Hyperspectral Lidar for Monitoring Crops Nitrogen Stress. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XLI-B8, 1043–1047. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B8-1043-2016

Irañeta, I., Armesto, A.P., Segura, S., Lafarga, A., Arregui, L.M., Baroja, E. y Quemada, M. “Herramientas de ayuda a la decisión para el manejo correcto de los

fertilizantes nitrogenados en cereales de invierno”. Navarra Agraria nº 133, pp. 6-16. 2002.

Thomas, J.R., Gausman, H.W., 1977. Leaf Reflectance vs. Leaf Chlorophyll and Carotenoid Concentrations for Eight Crops¹. *Agron. J.* 69, 799–802. doi:10.2134/agronj1977.00021962006900050017x

Tilling, A.K., O’Leary, G.J., Ferwerda, J.G., Jones, S.D., Fitzgerald, G.J., Rodriguez, D., Belford, R., 2007. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *F. Crop. Res.* 104, 77–85. doi:10.1016/j.fcr.2007.03.023

Wood, C.W., Reeves, D.W., Himelrick, D.G., 1993. Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: A review. *Proc. Agron. Soc. New Zeal.* 23, 1–9.

Yoder, B.J., Pettigrew-Crosby, R.E., 1995. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sens. Environ.* 53, 199–211. doi:10.1016/0034-4257(95)00135-N

ANEXOS

ANEXO 1. DIAGRAMA DE CAJAS (BOX-PLOT) PARA CADA INDICE

C1: UFN MUY BAJA. C2: UFN BAJA. C3: UFN CORRECTA. C4: UFN ALTA

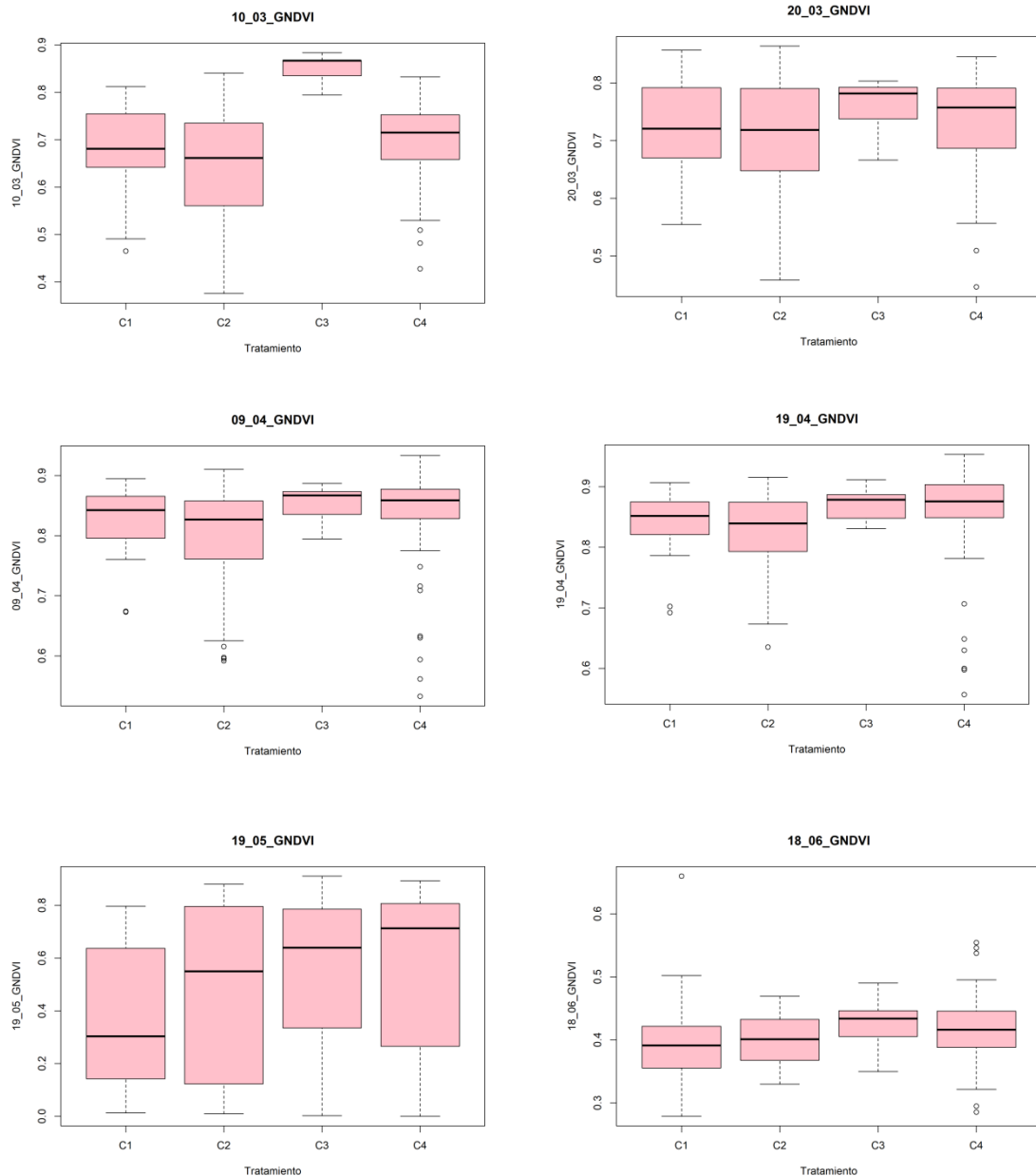


Figura 43. Diagramas de cajas (box-plot) datos de GNDVI para trigo

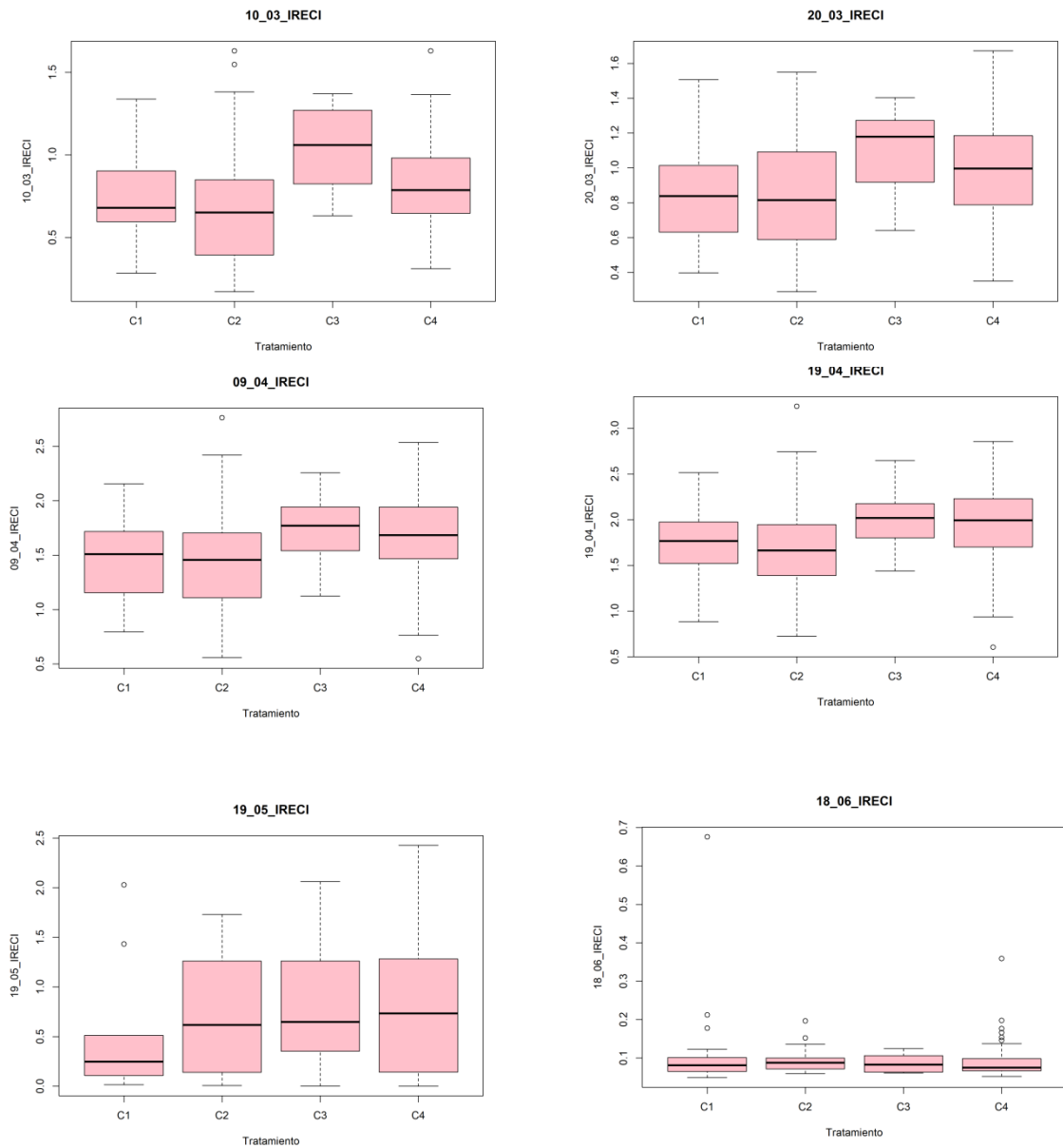


Figura 44. Diagramas de cajas (box-plot) datos de IRECI para trigo

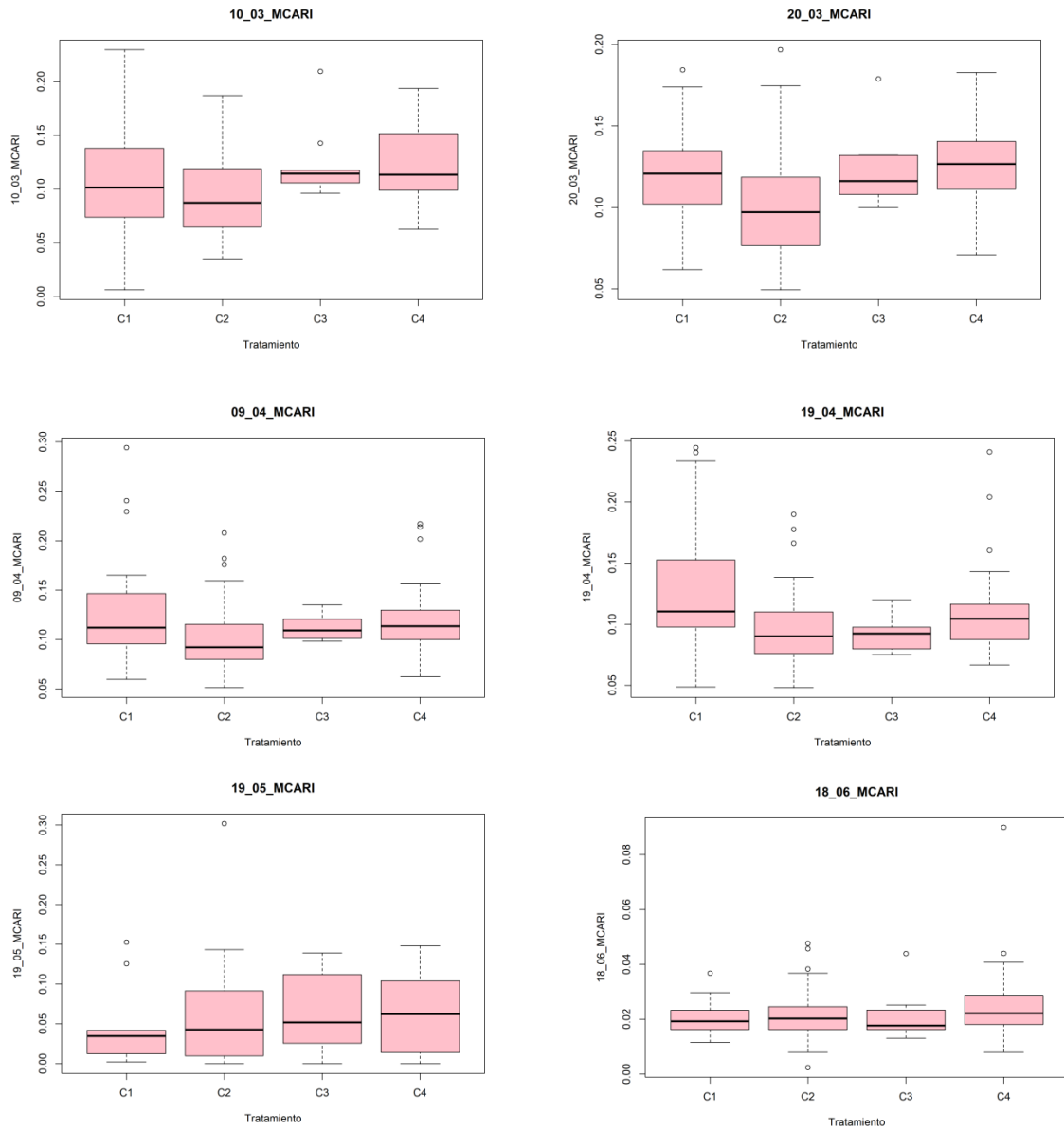


Figura 45. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MCARI para trigo

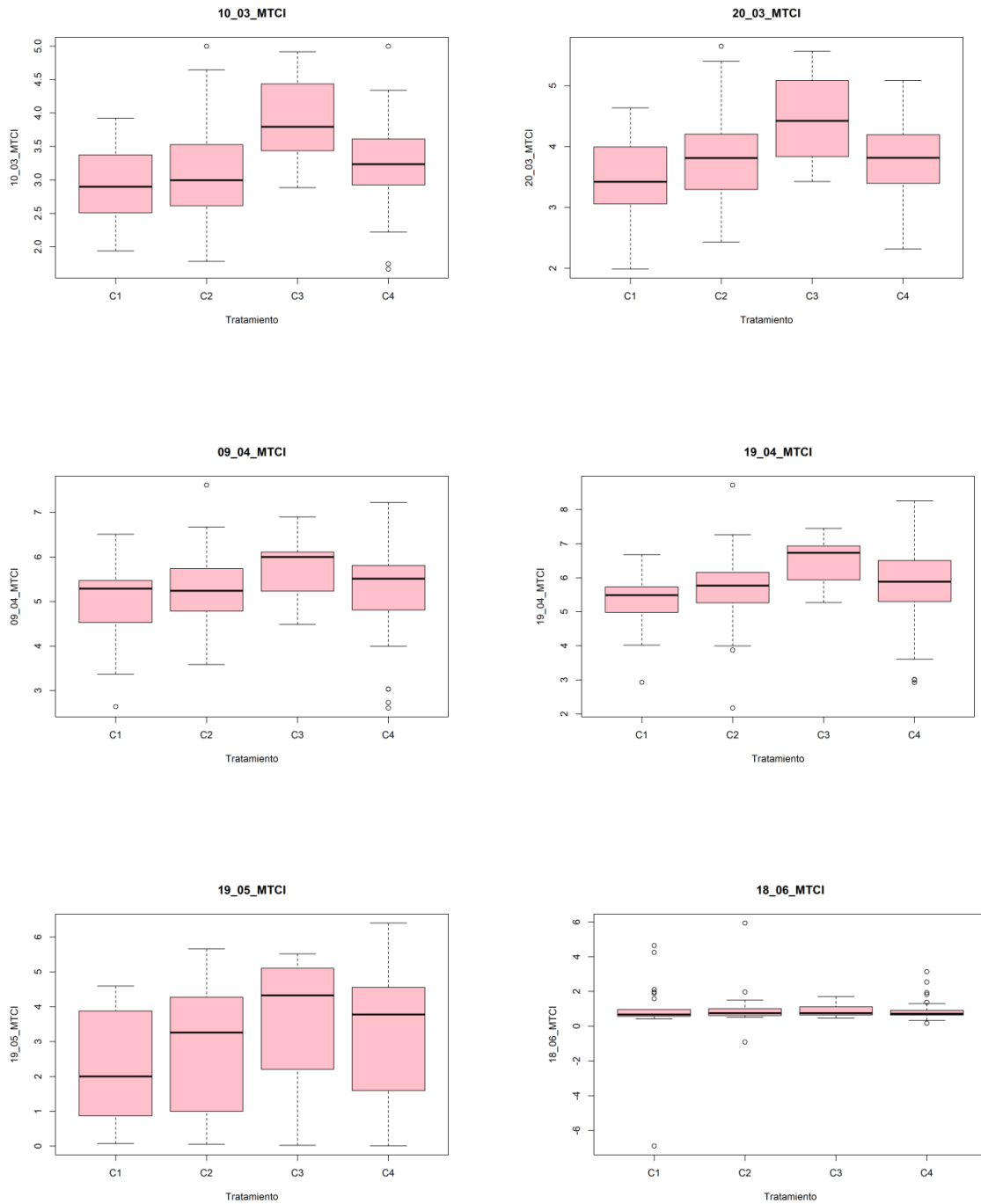


Figura 46. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MTCI para trigo

RELACIÓN ENTRE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SENTINEL 2A CON DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CEREALES DE INVIERNO EN LA CUENCA DE PAMPLONA (NAVARRA)

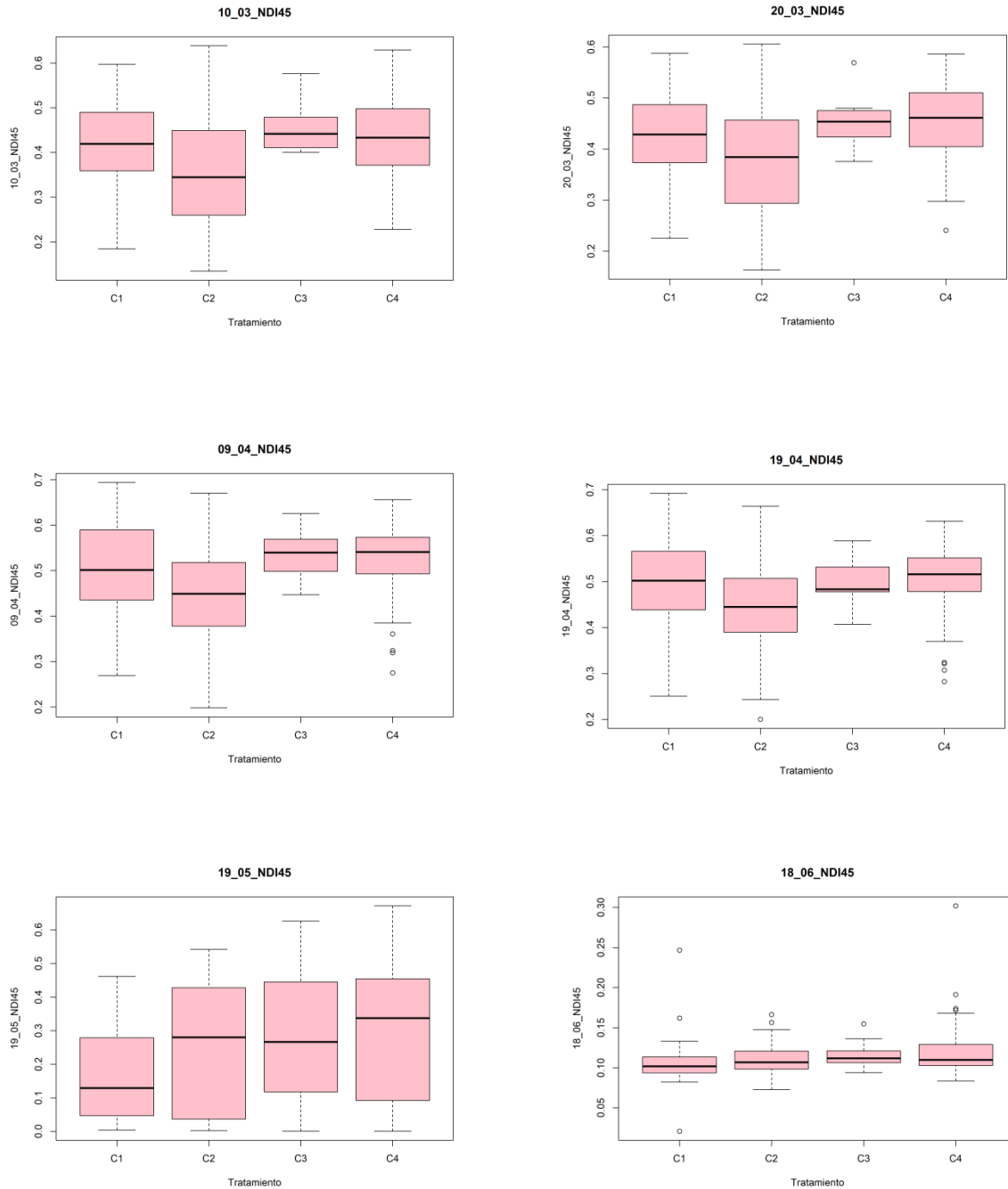


Figura 47. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDI45 para trigo

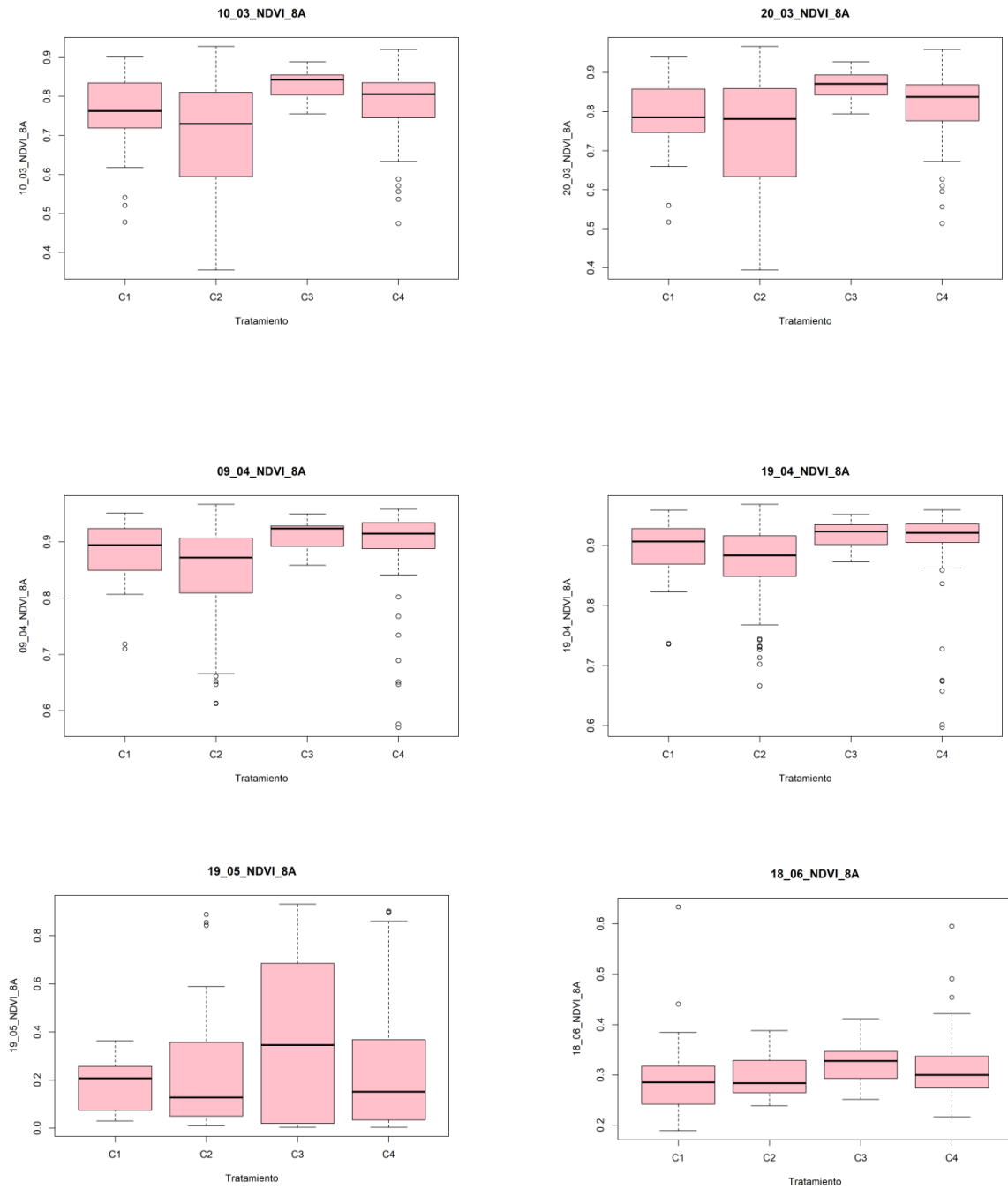


Figura 48. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI_8A para trigo

RELACIÓN ENTRE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SENTINEL 2A
 CON DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CEREALES DE INVIERNO EN LA
 CUENCA DE PAMPLONA (NAVARRA)

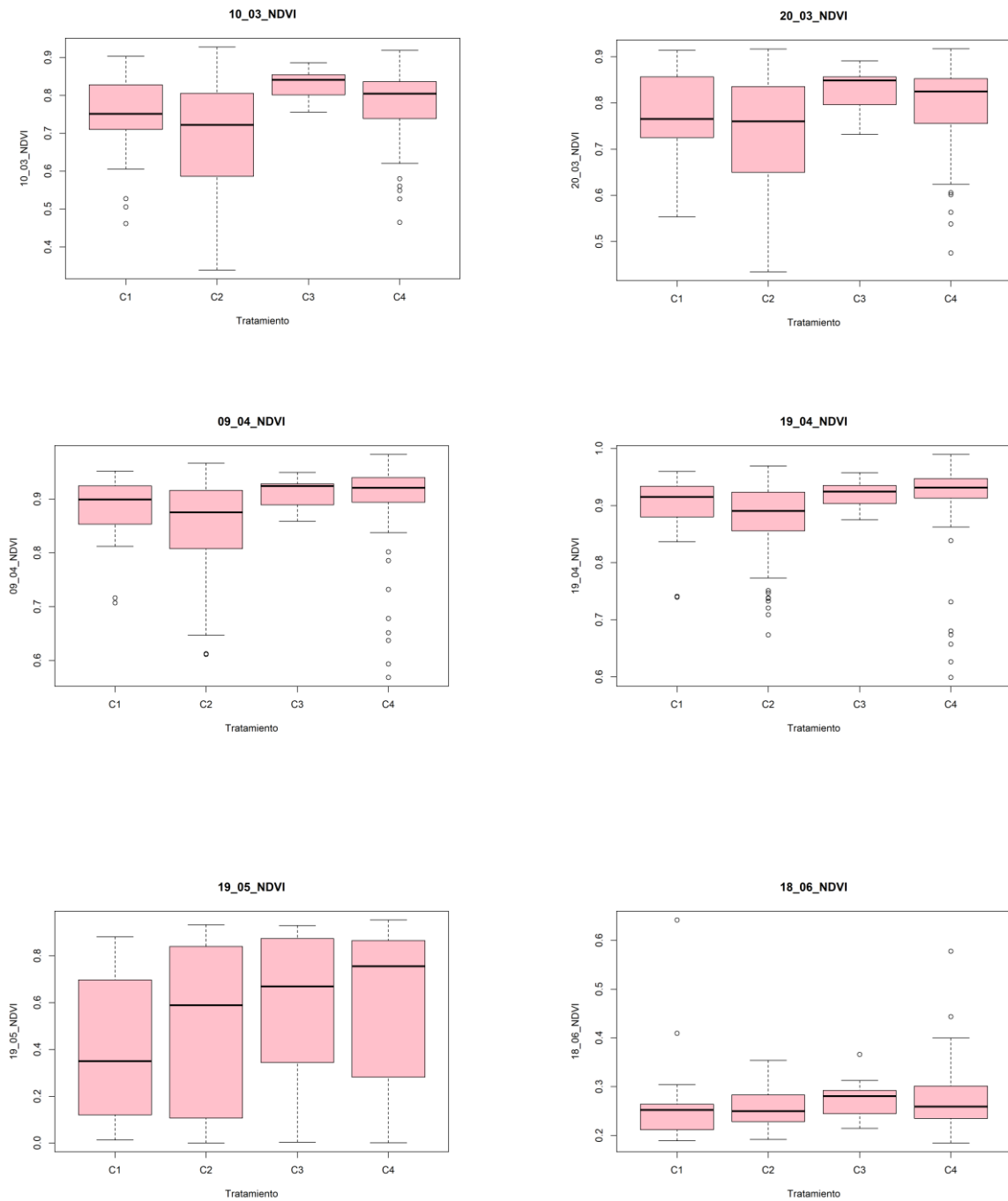


Figura 49. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI para trigo

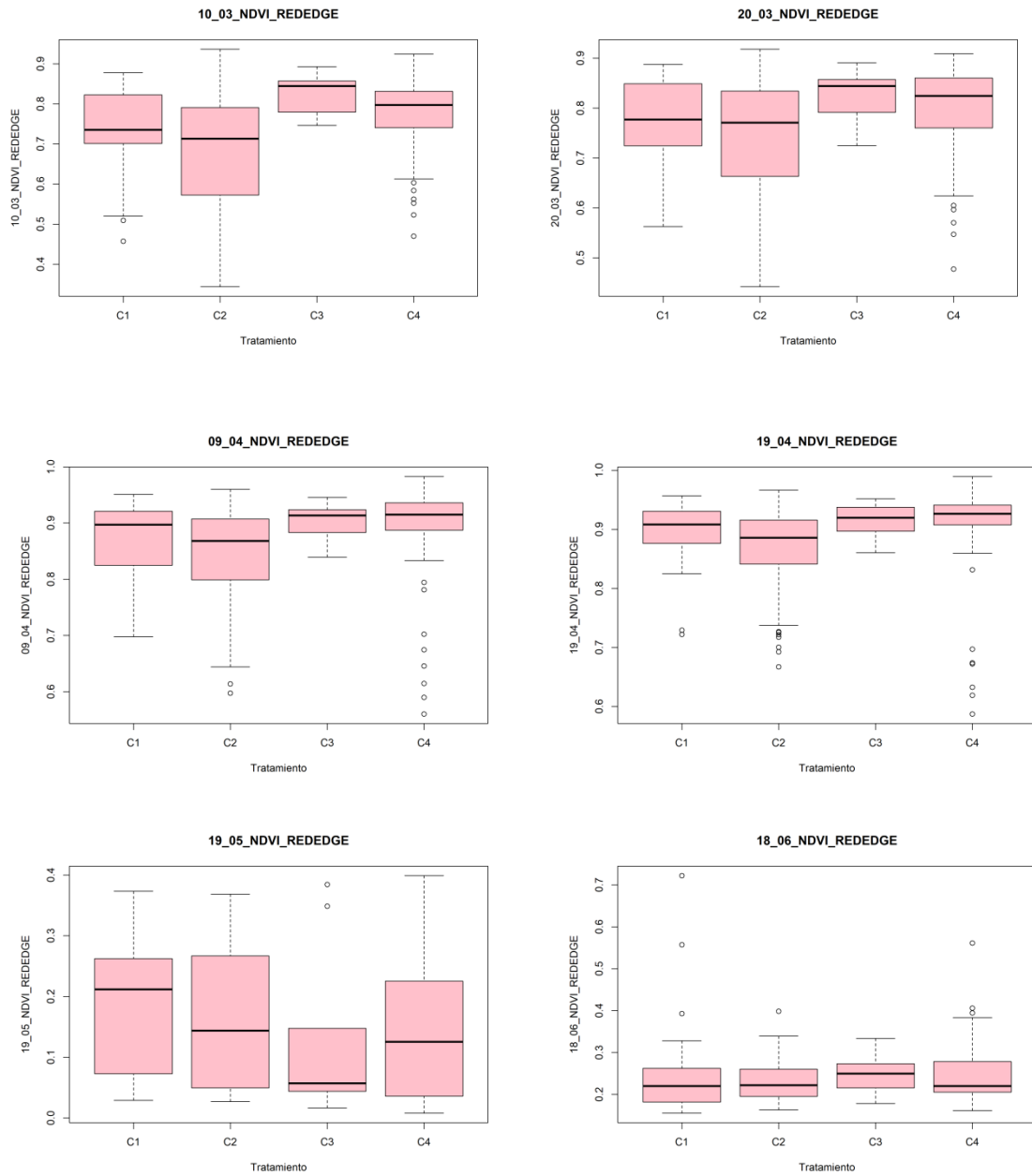


Figura 50. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI_REDEGE para trigo

RELACIÓN ENTRE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SENTINEL 2A
 CON DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CEREALES DE INVIERNO EN LA
 CUENCA DE PAMPLONA (NAVARRA)

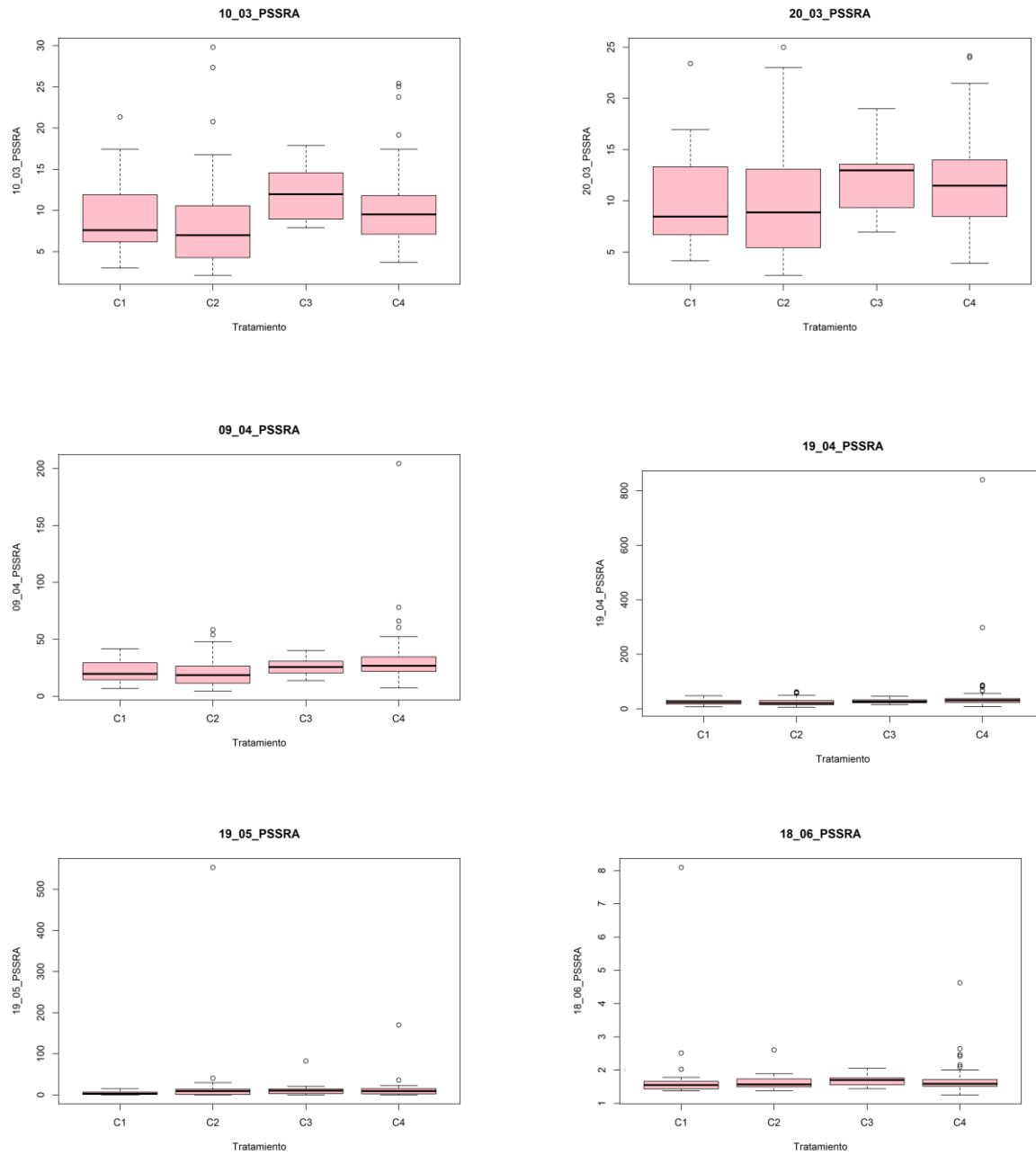


Figura 51. Diagramas de cajas (box-plot) datos de PSSRA para trigo

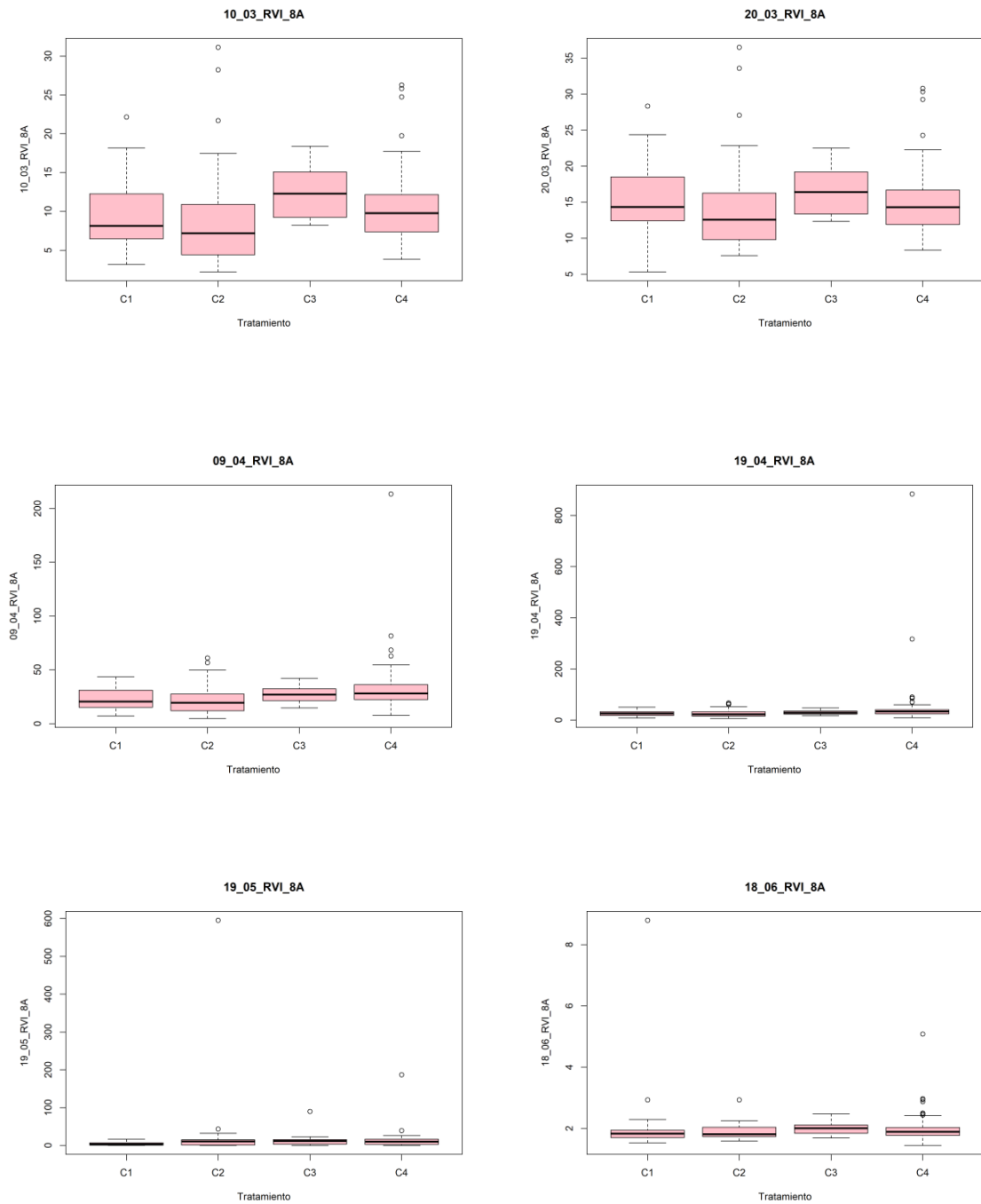


Figura 52. Diagramas de cajas (box-plot) datos de RVI_8A para trigo

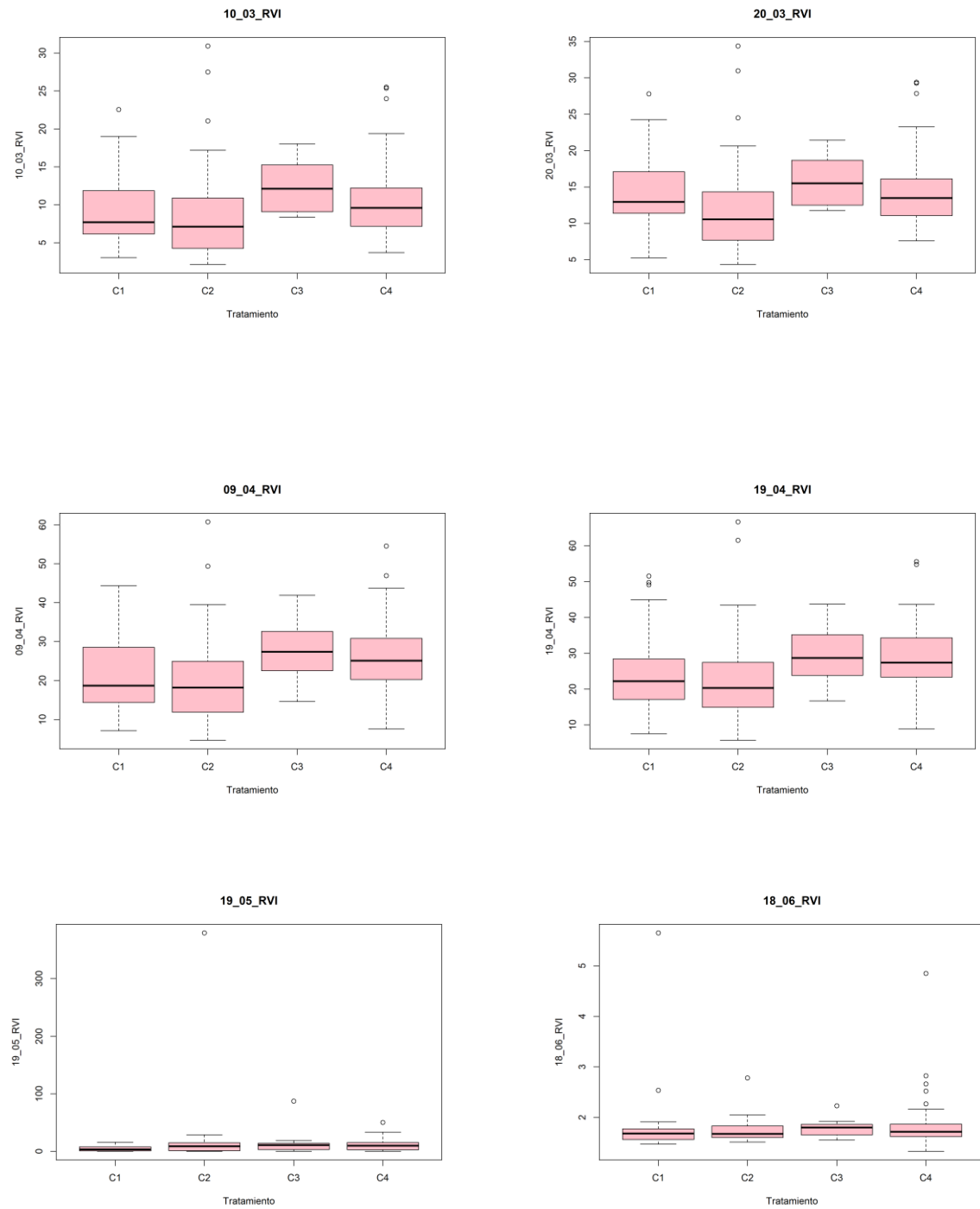


Figura 53. Diagramas de cajas (box-plot) datos de RVI para trigo

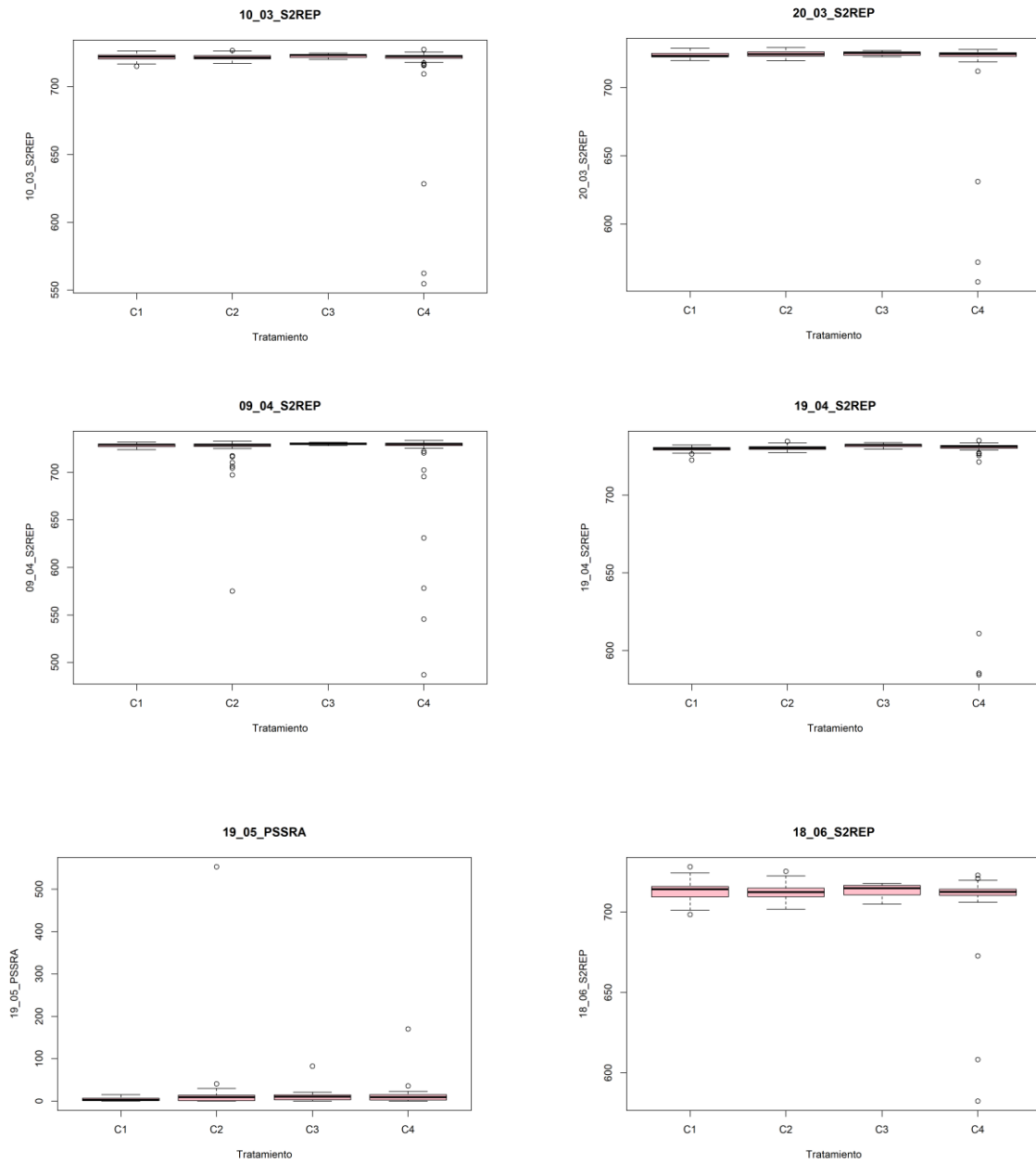


Figura 54. Diagramas de cajas (box-plot) datos de S2REP para trigo

RELACIÓN ENTRE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SENTINEL 2A CON DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CEREALES DE INVIERNO EN LA CUENCA DE PAMPLONA (NAVARRA)

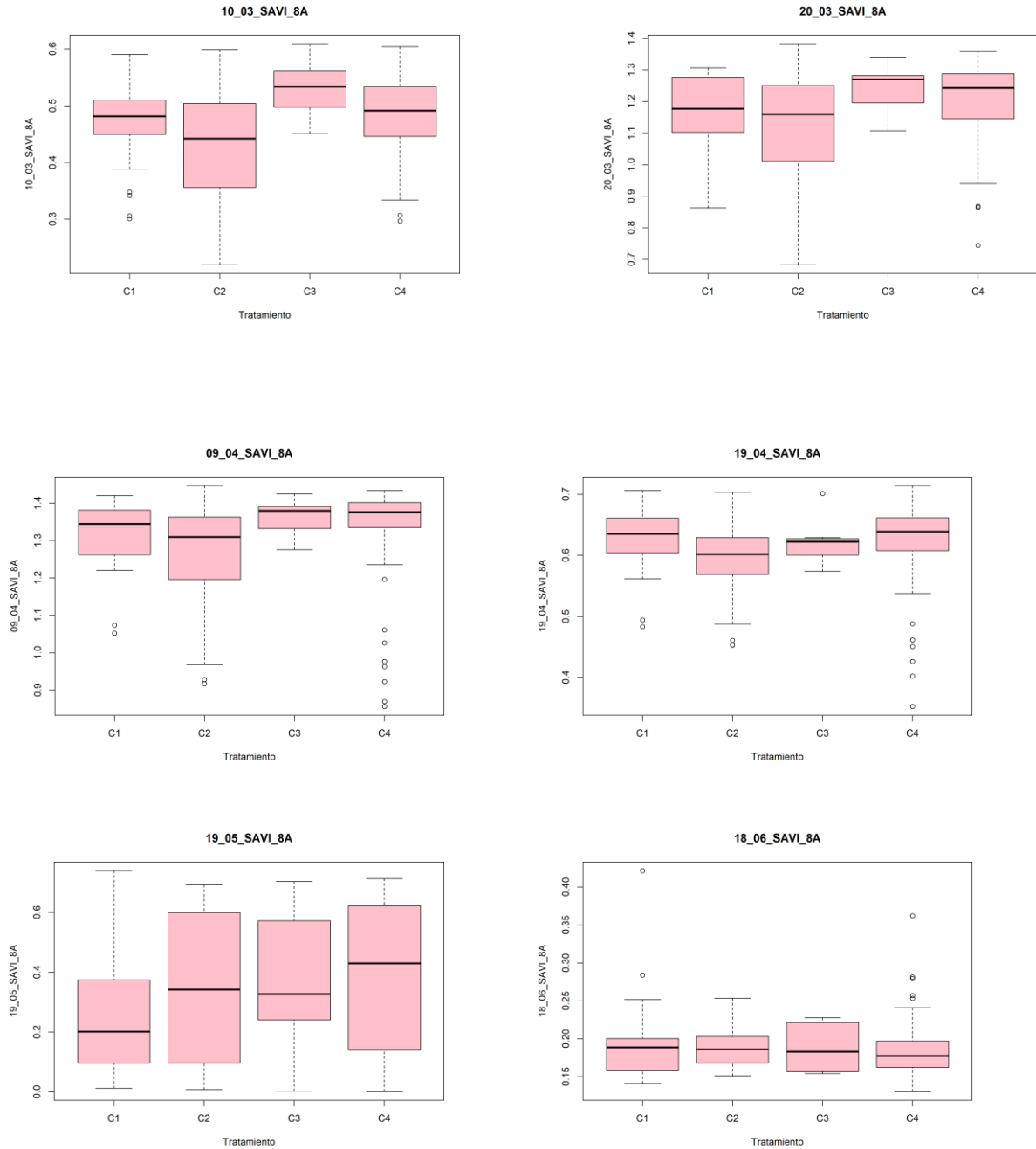


Figura 55. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI_8A para trigo

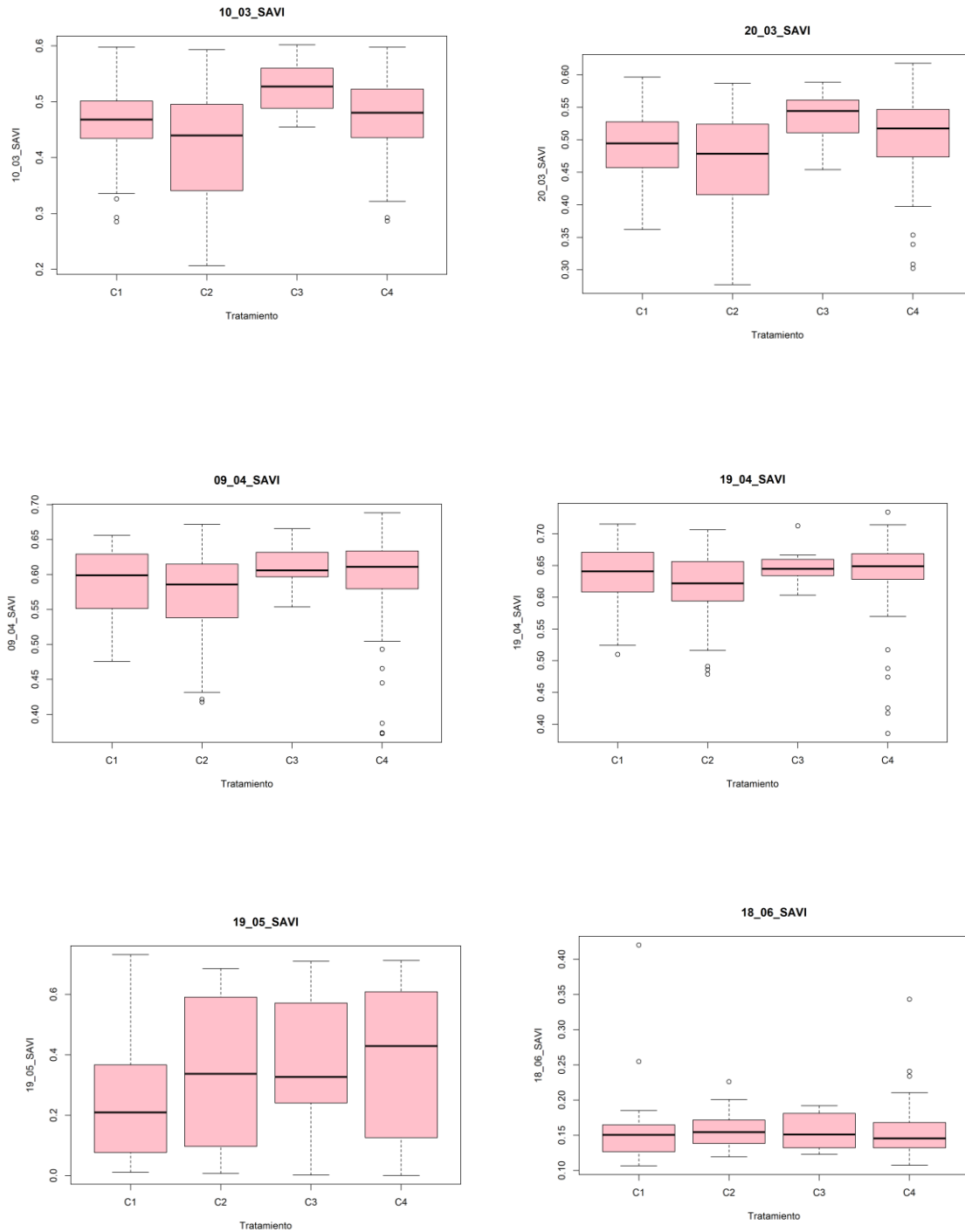


Figura 56. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI para trigo

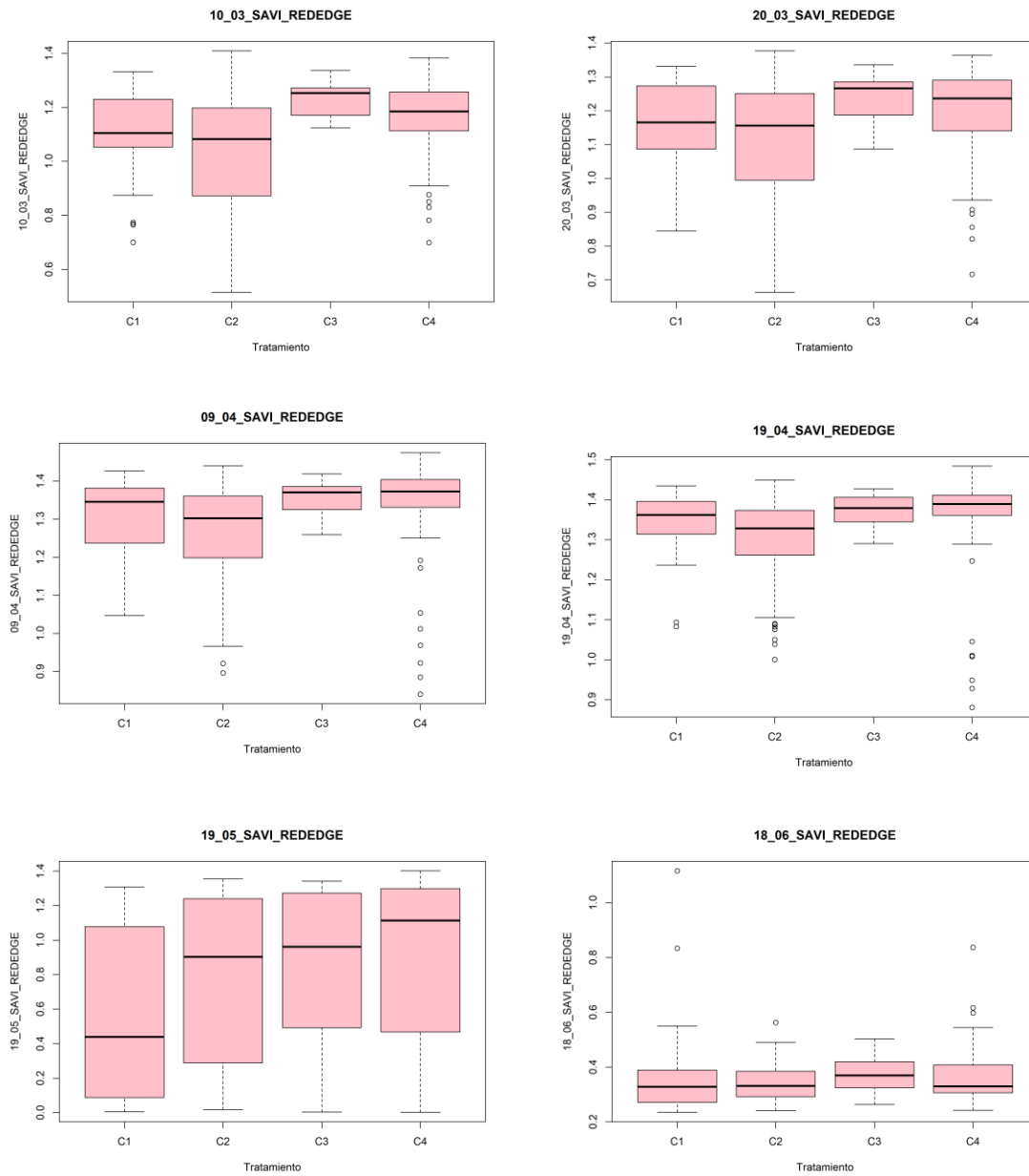


Figura 57. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI_REDEGE para trigo

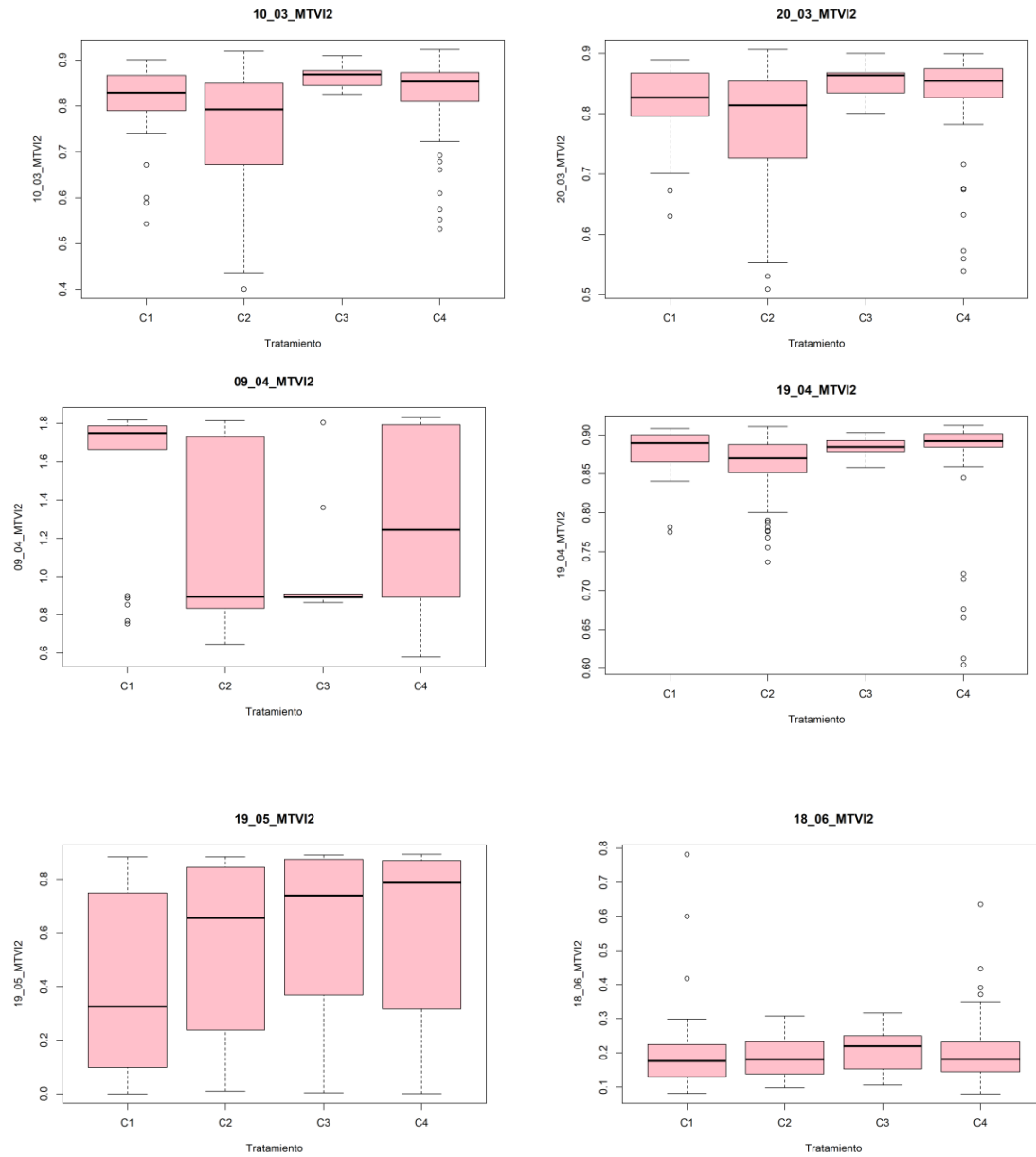


Figura 58. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MTVI2 para trigo

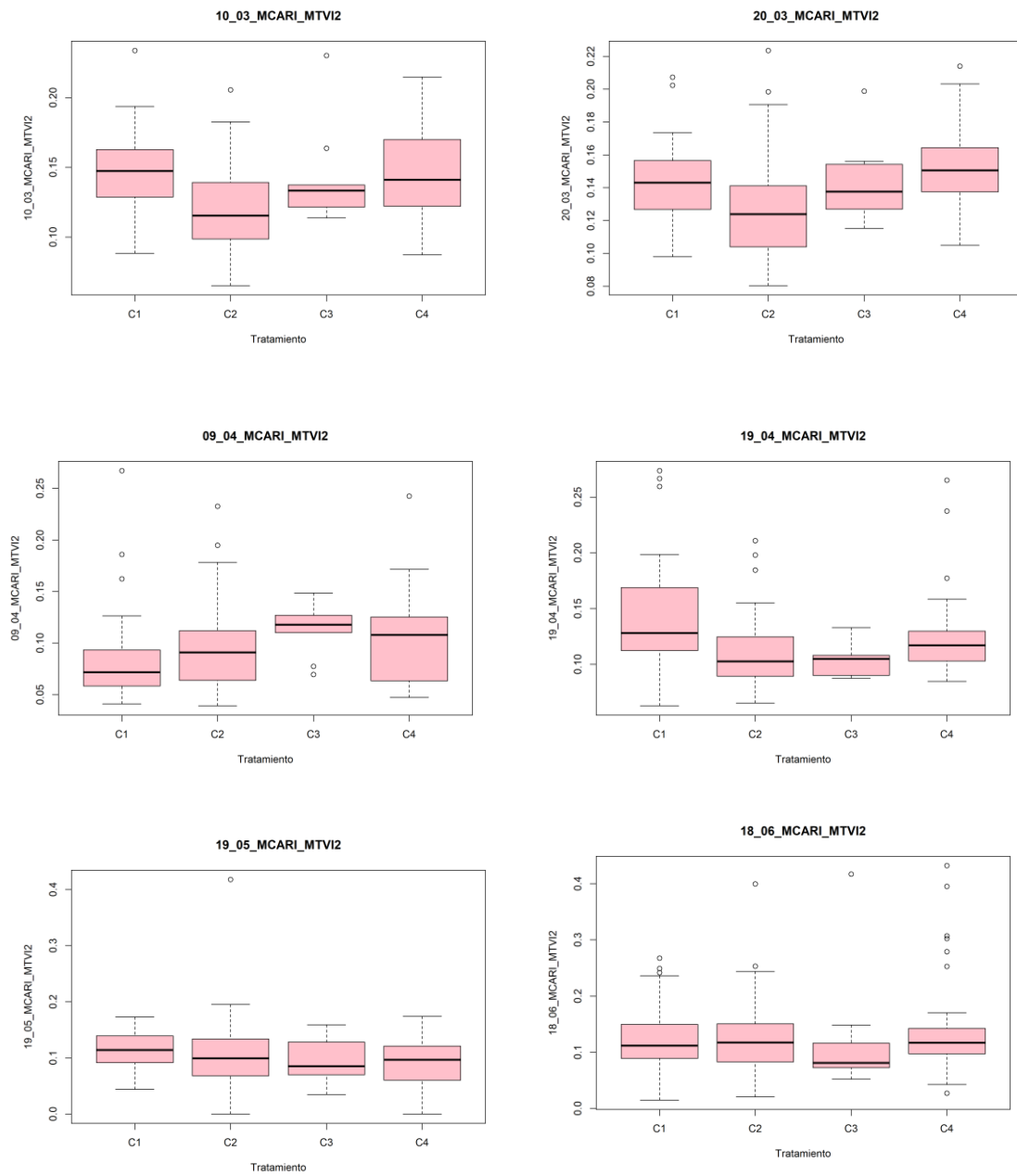


Figura 59. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MCARI/MTVI2 para trigo

CEBADA

C1: UFN BAJA. C2: UFN CORRECTA. C3: UFN ALTA.

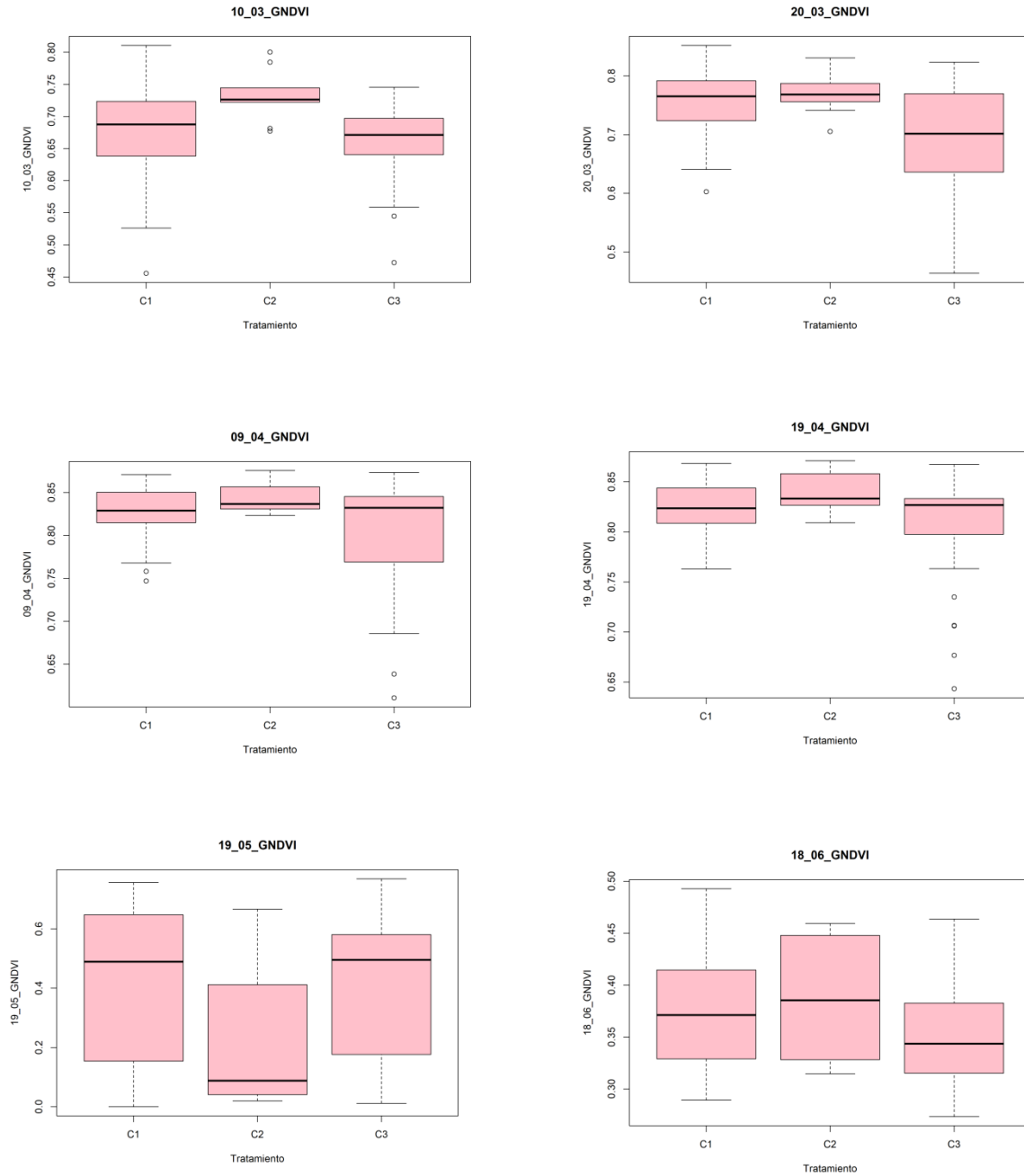


Figura 60. Diagramas de cajas (box-plot) datos de GNDVI para cebada

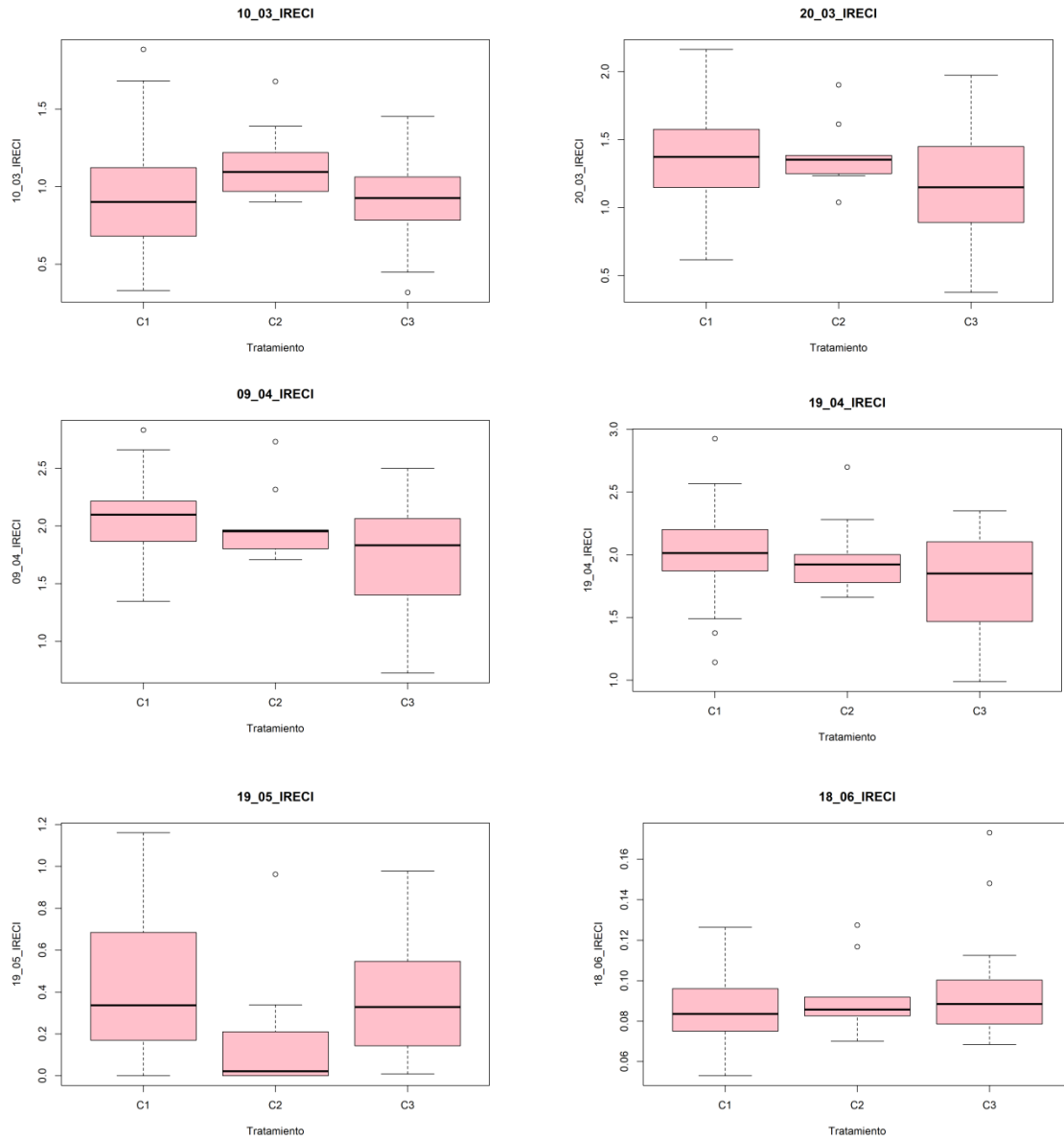


Figura 61. Diagramas de cajas (box-plot) datos de IRECI para cebada

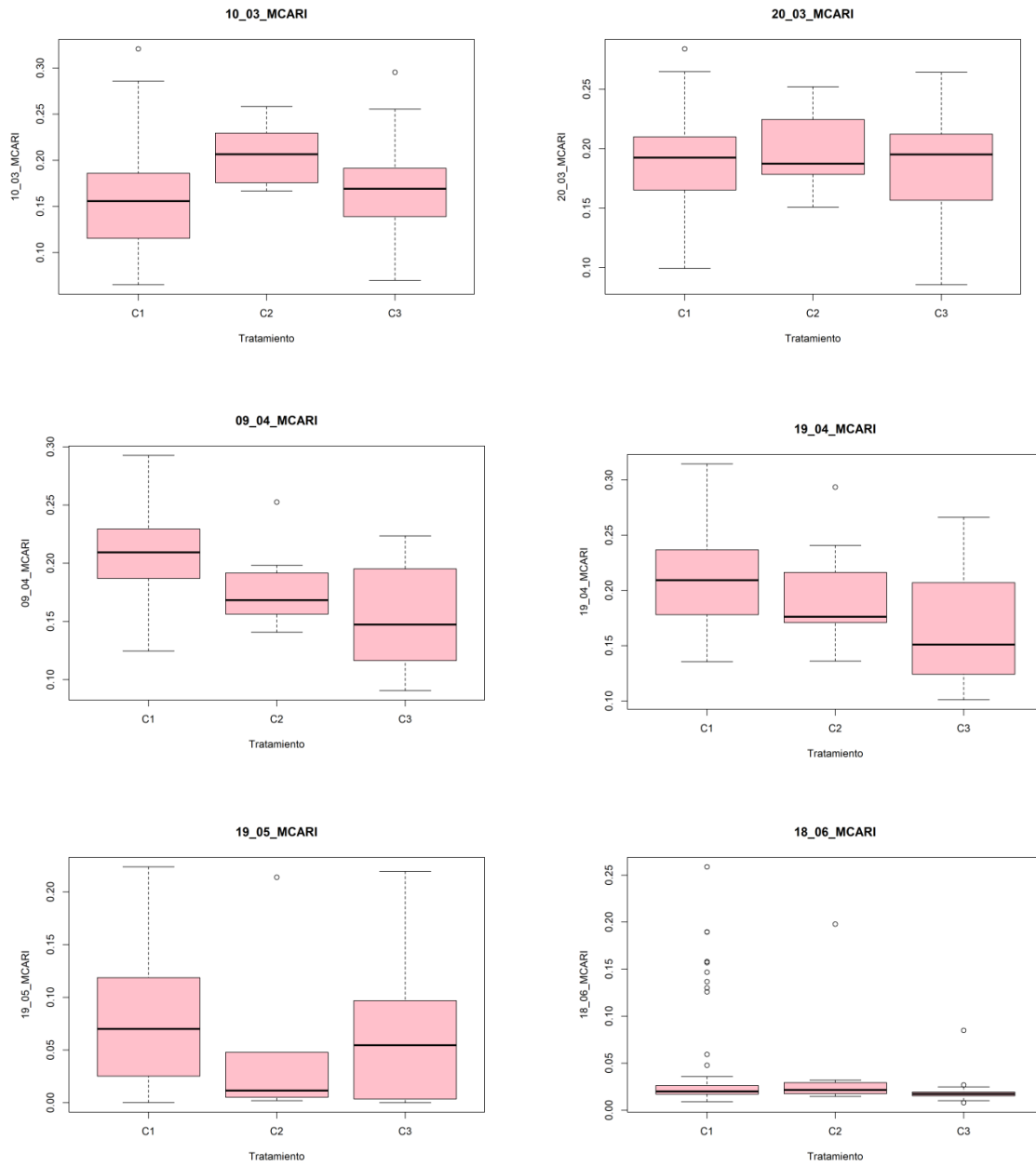


Figura 62. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MCARI para cebada

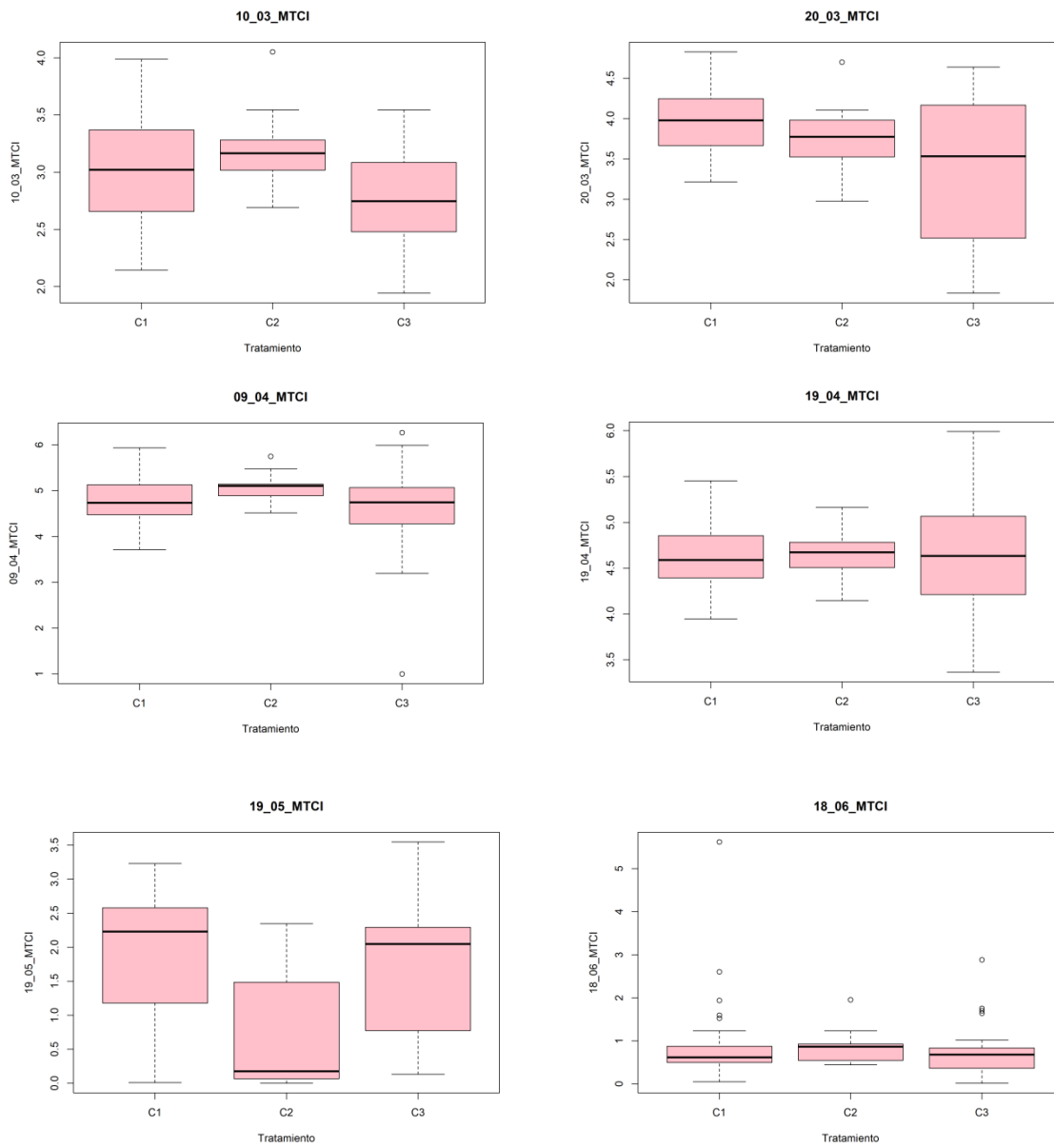


Figura 63. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MTCI para cebada

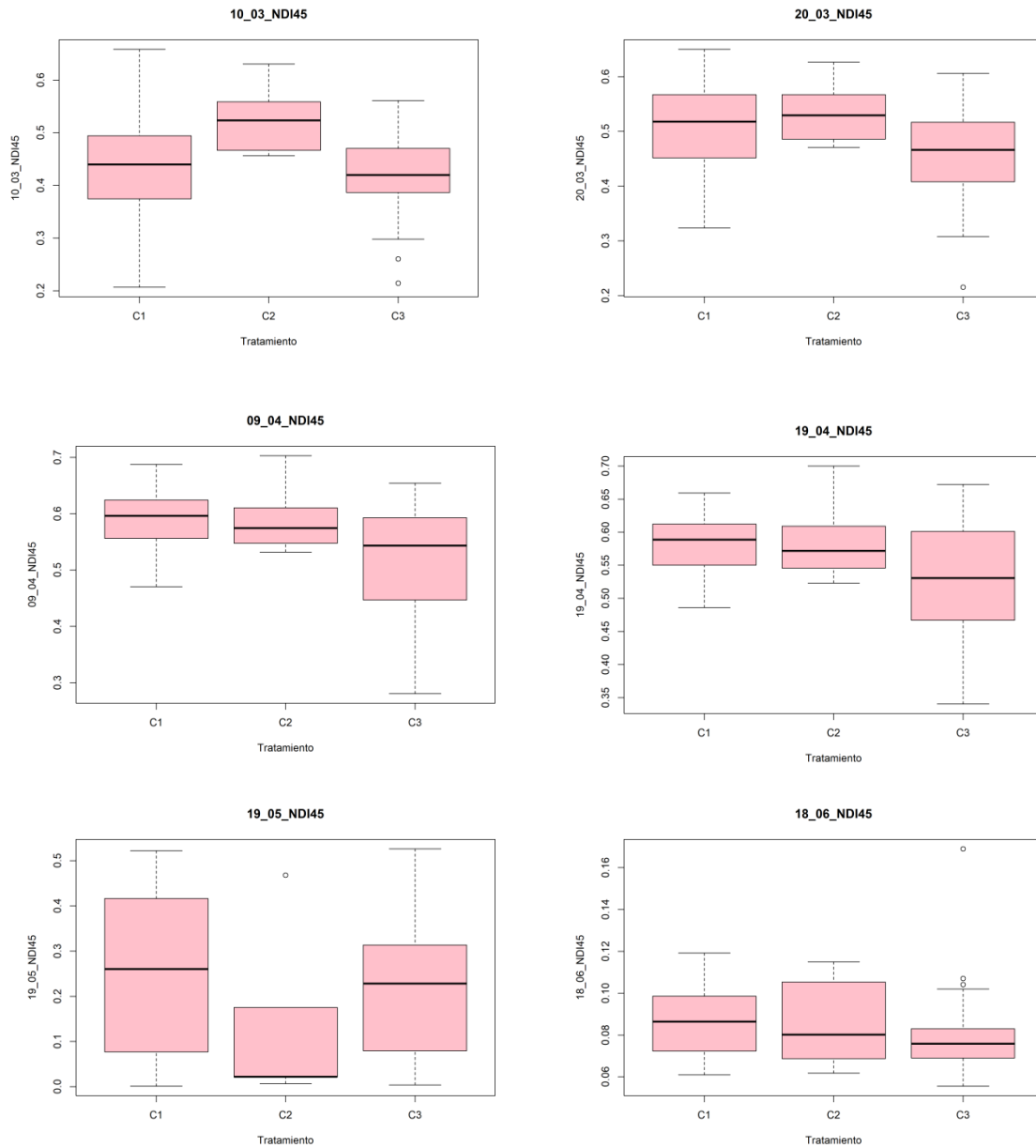


Figura 64. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDI45 para cebada

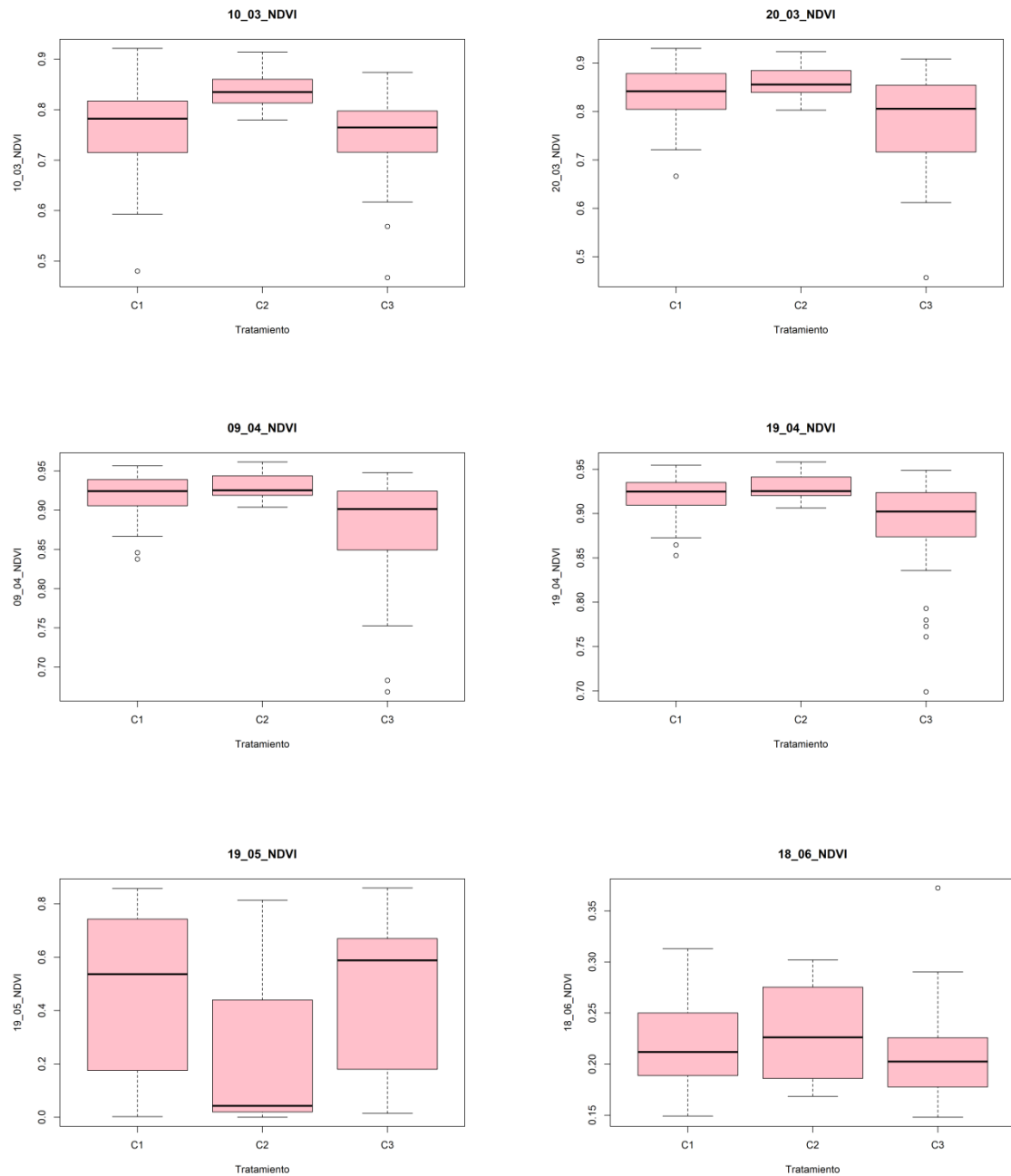


Figura 65. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI para cebada

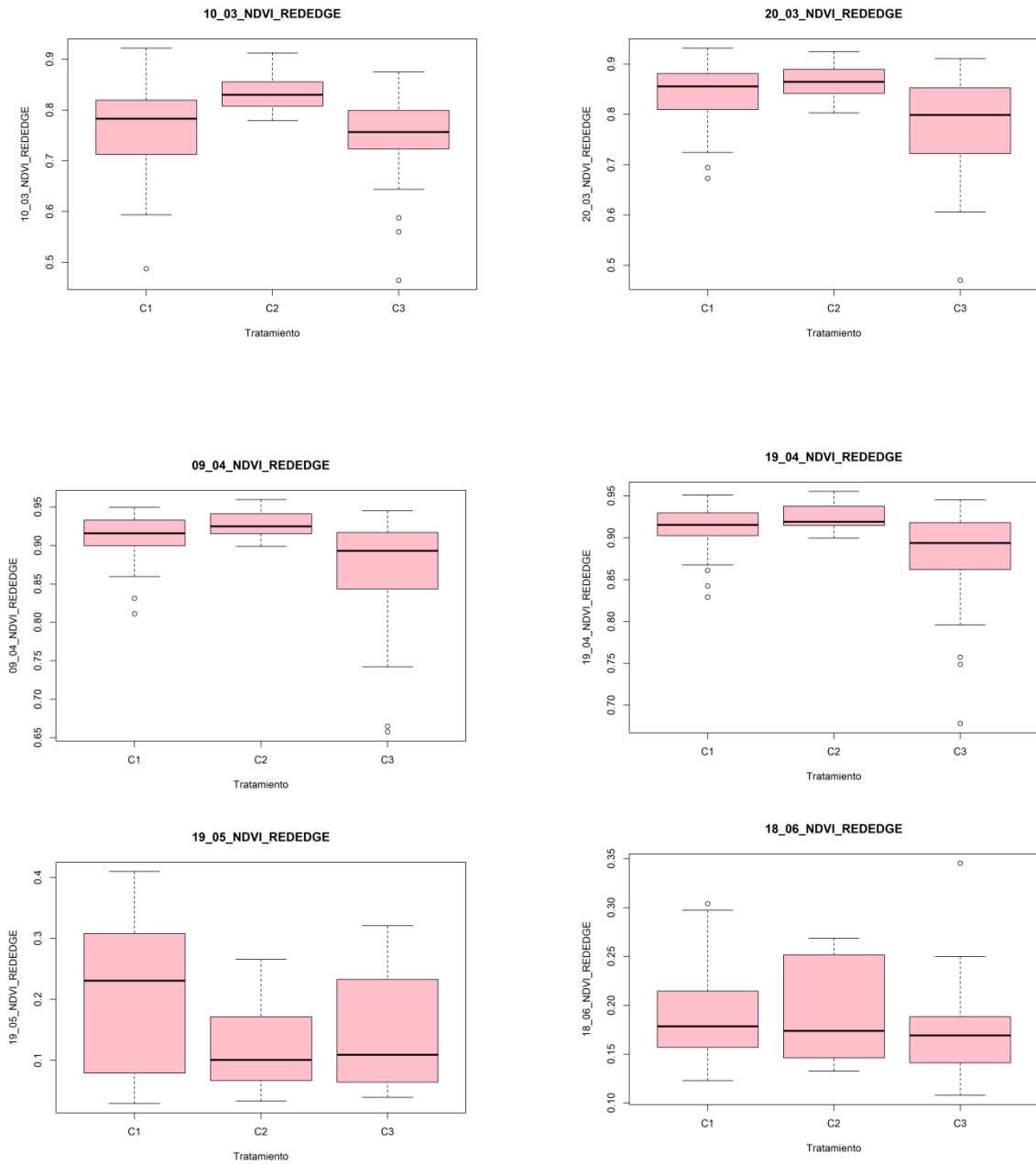


Figura 66. Diagramas de cajas (box-plot) datos de NDVI_REDEGE para cebada

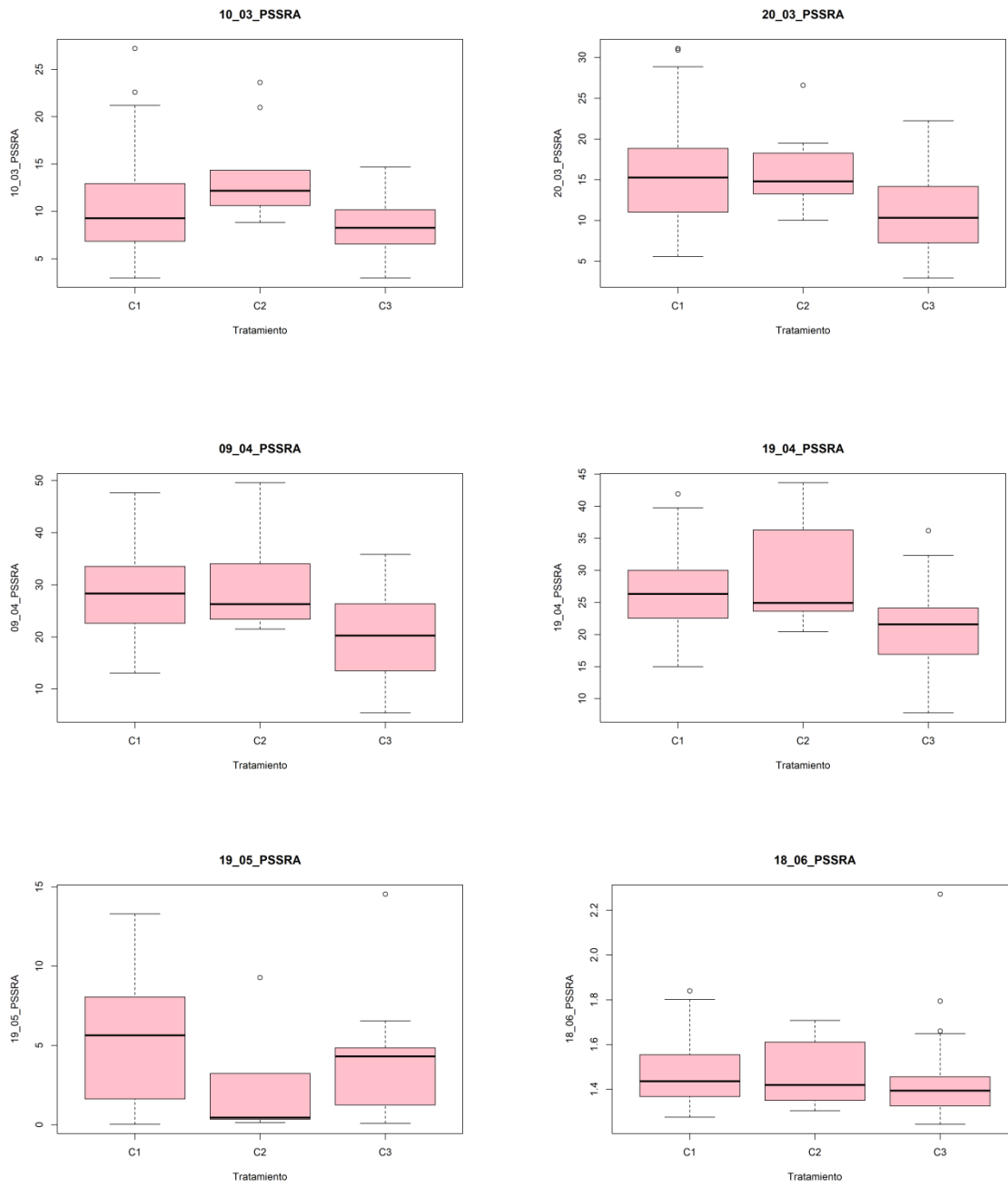


Figura 67. Diagramas de cajas (box-plot) datos de PSSRA para cebada

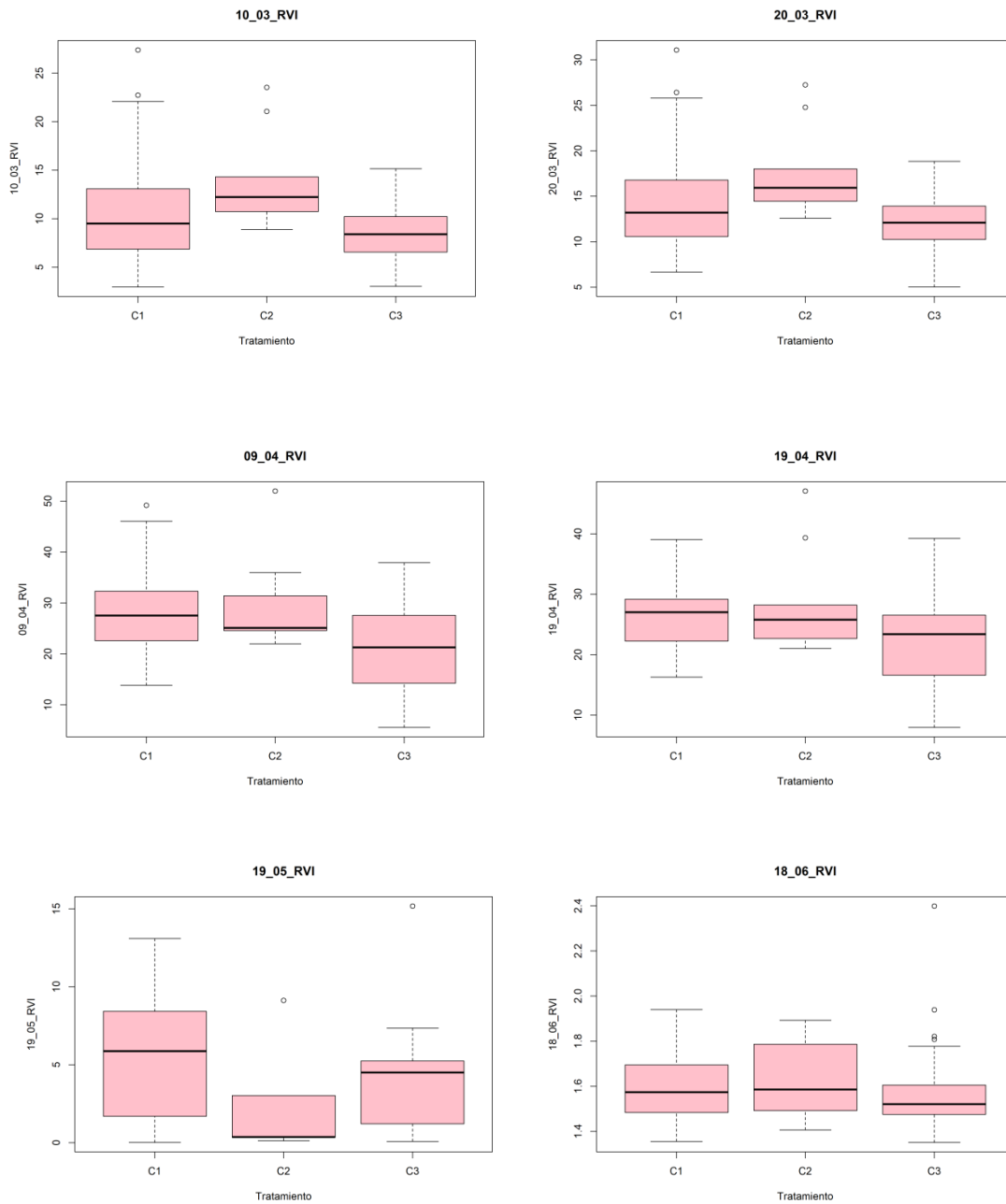


Figura 68. Diagramas de cajas (box-plot) datos de RVI para cebada

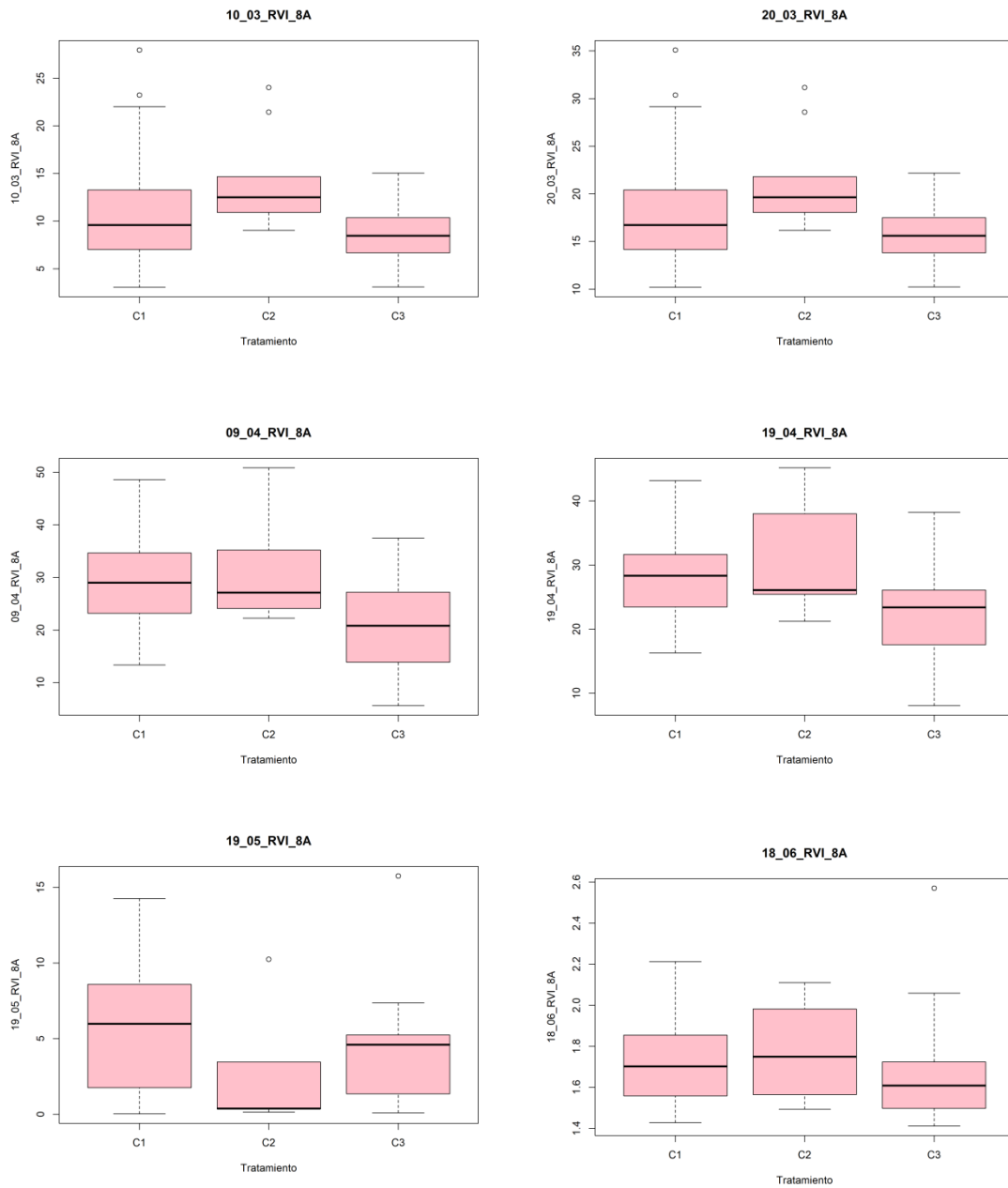


Figura 69. Diagramas de cajas (box-plot) datos de RVI_8A para cebada

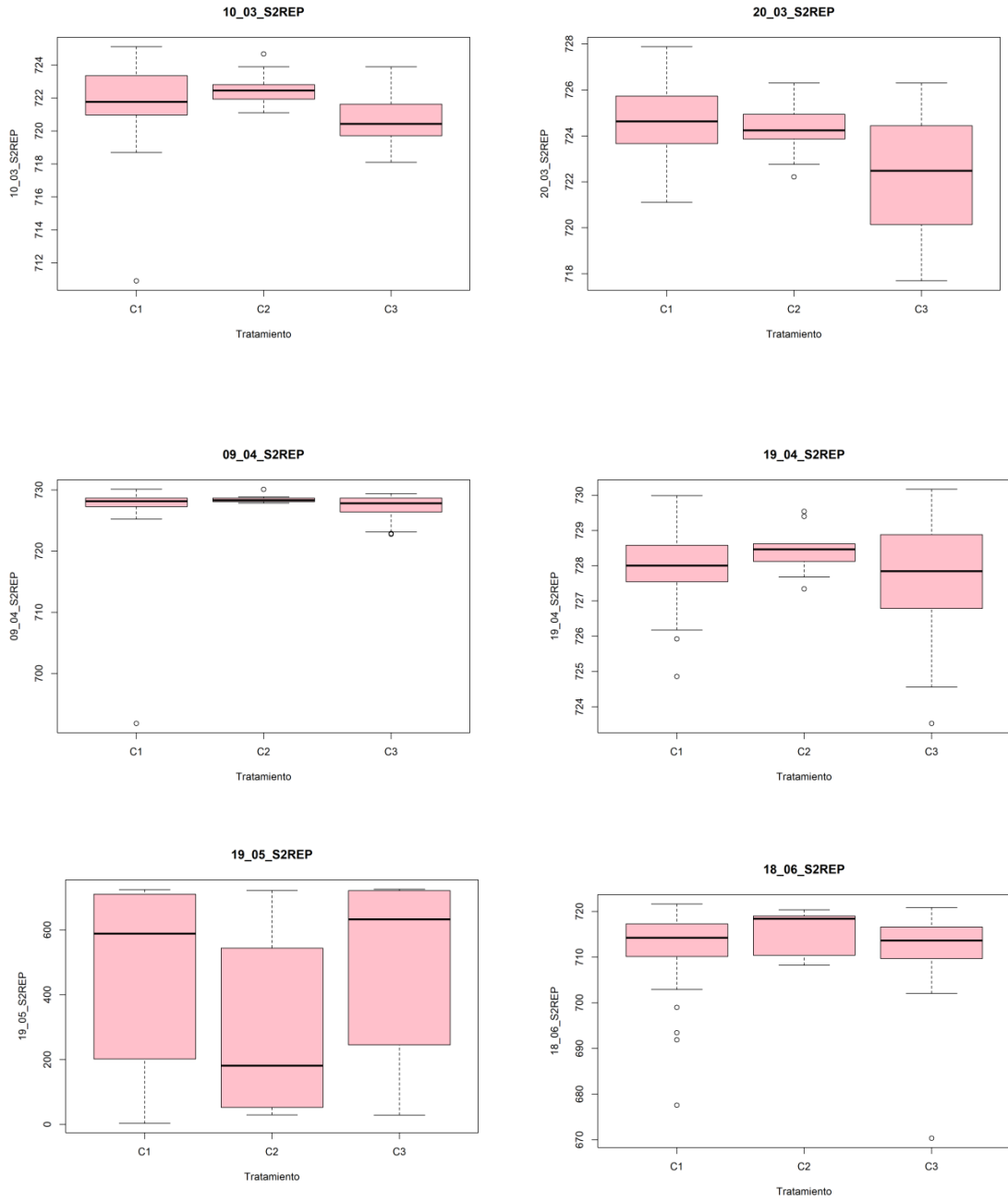


Figura 70. Diagramas de cajas (box-plot) datos de S2REP para cebada

RELACIÓN ENTRE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SENTINEL 2A
 CON DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CEREALES DE INVIERNO EN LA
 CUENCA DE PAMPLONA (NAVARRA)

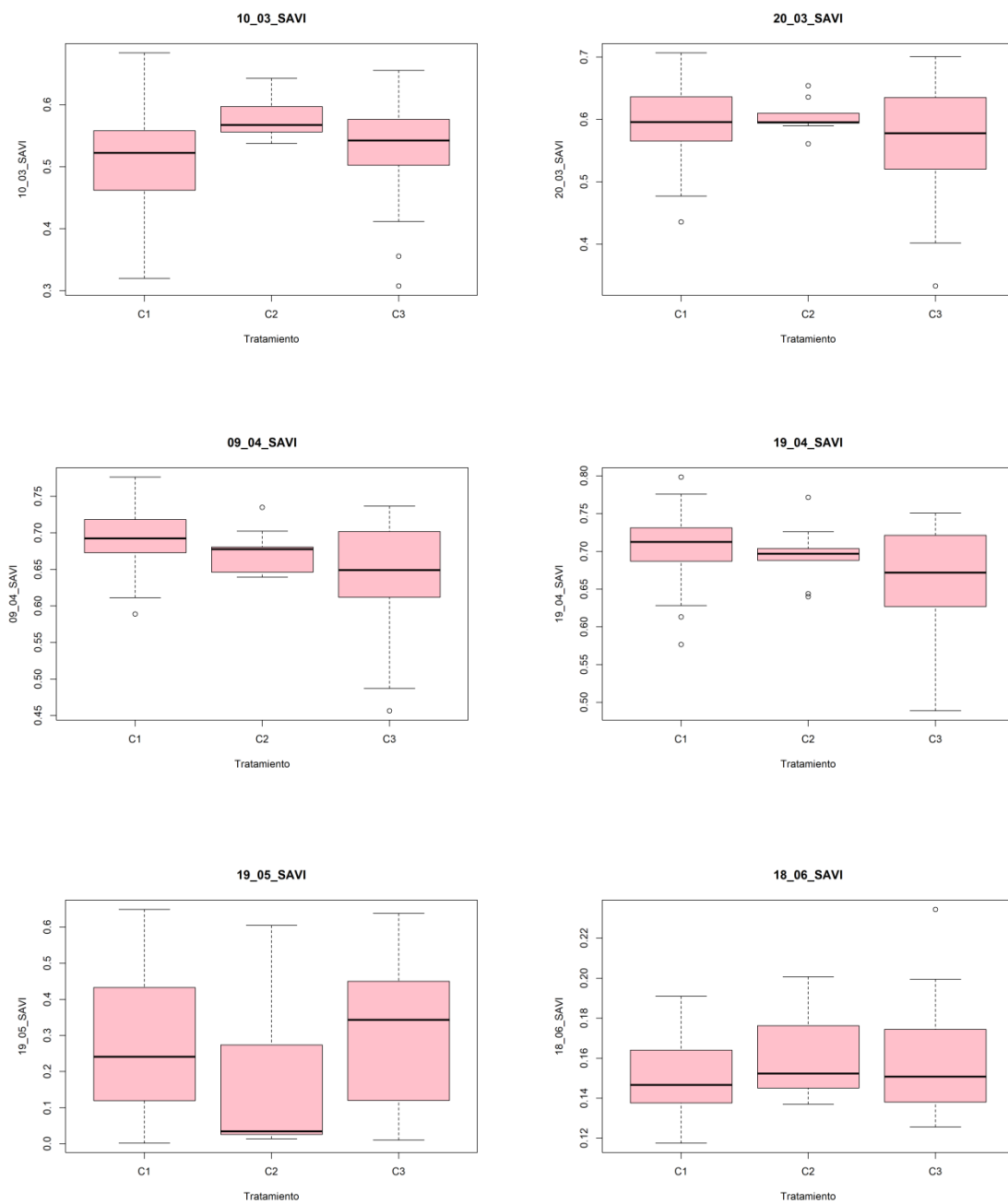


Figura 71. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI para cebada

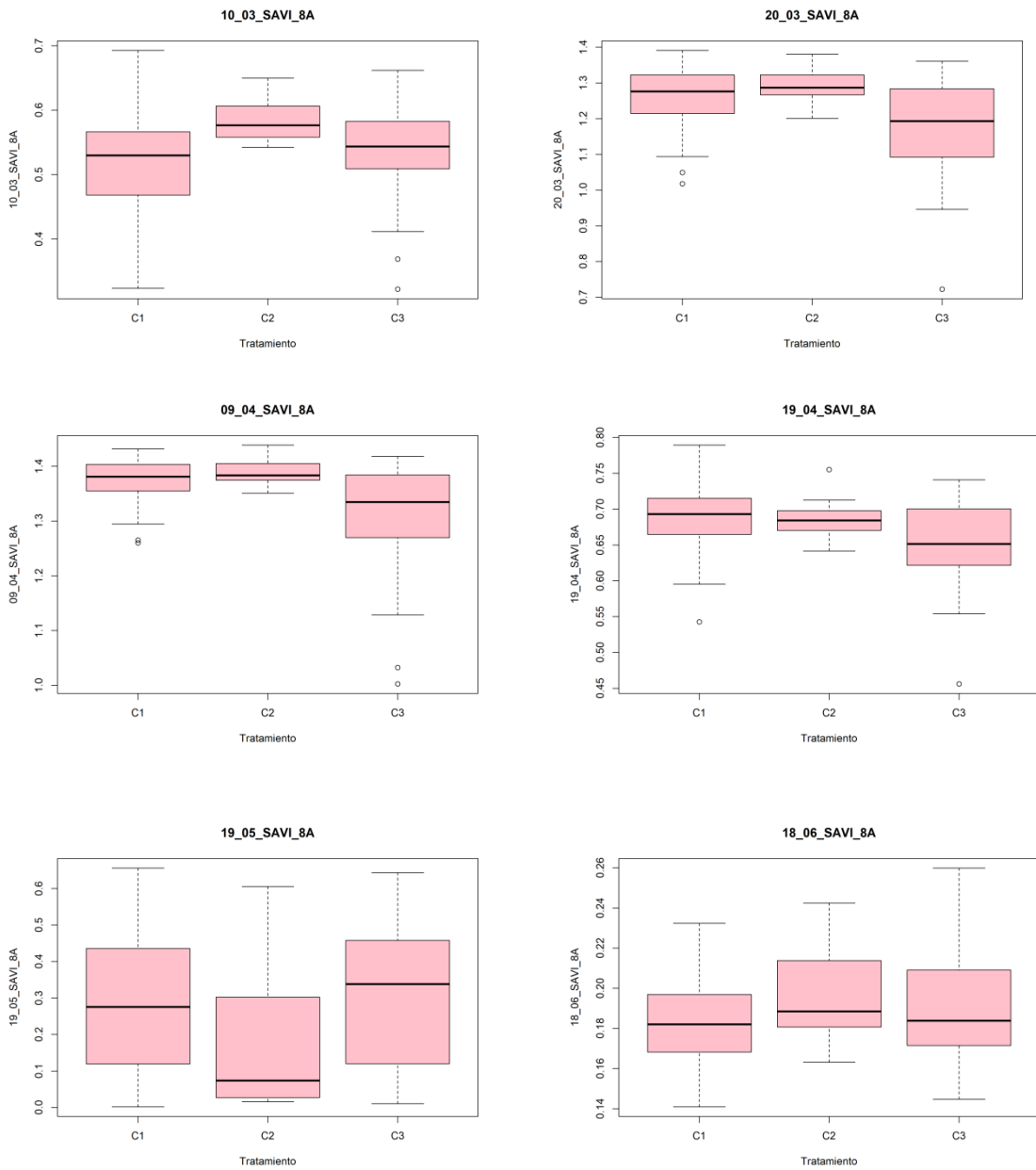


Figura 72. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI_8A para cebada

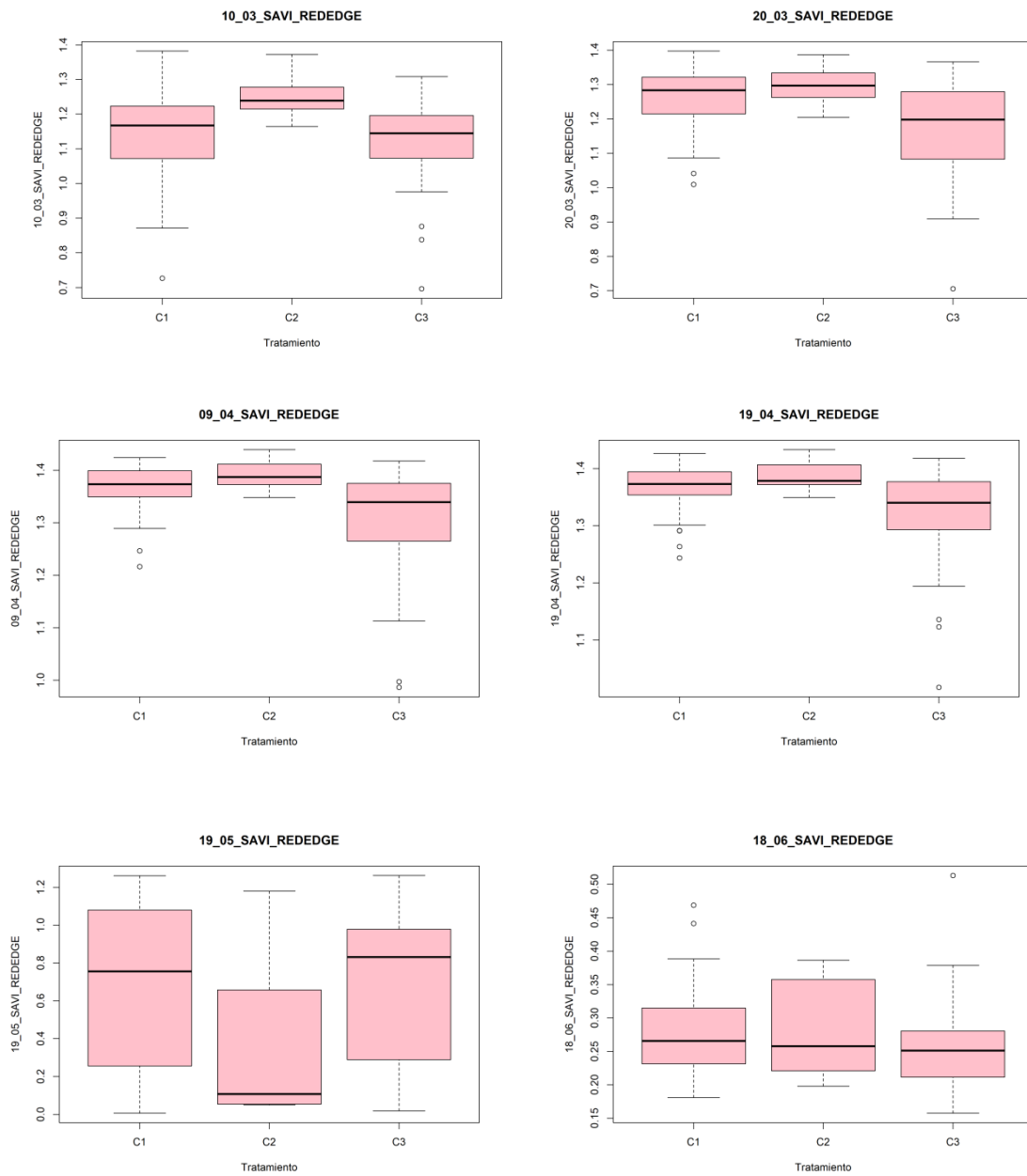


Figura 73. Diagramas de cajas (box-plot) datos de SAVI_REDEGE para cebada

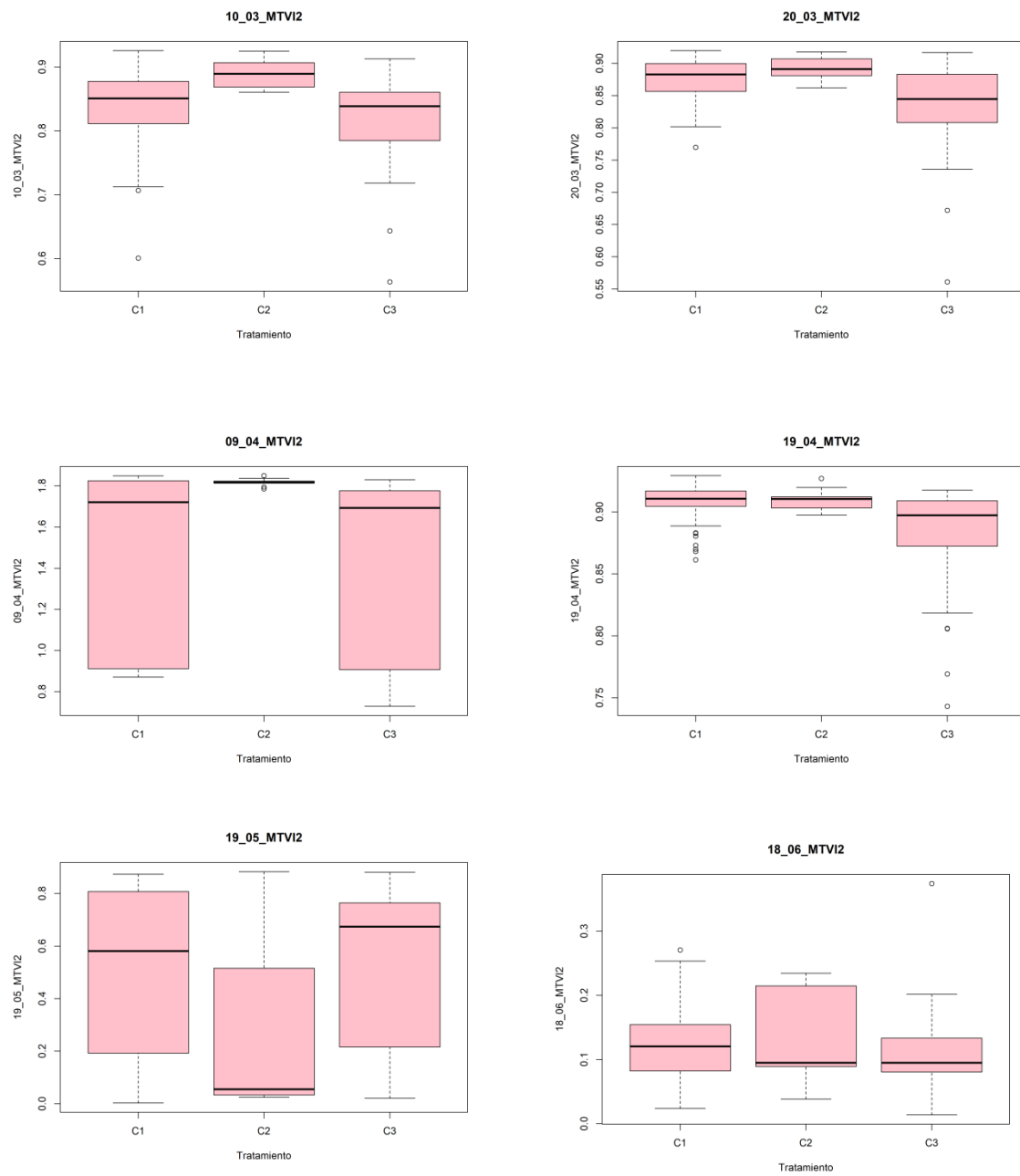


Figura 74. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MTVI2 para cebada

RELACIÓN ENTRE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SENTINEL 2A
 CON DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CEREALES DE INVIERNO EN LA
 CUENCA DE PAMPLONA (NAVARRA)

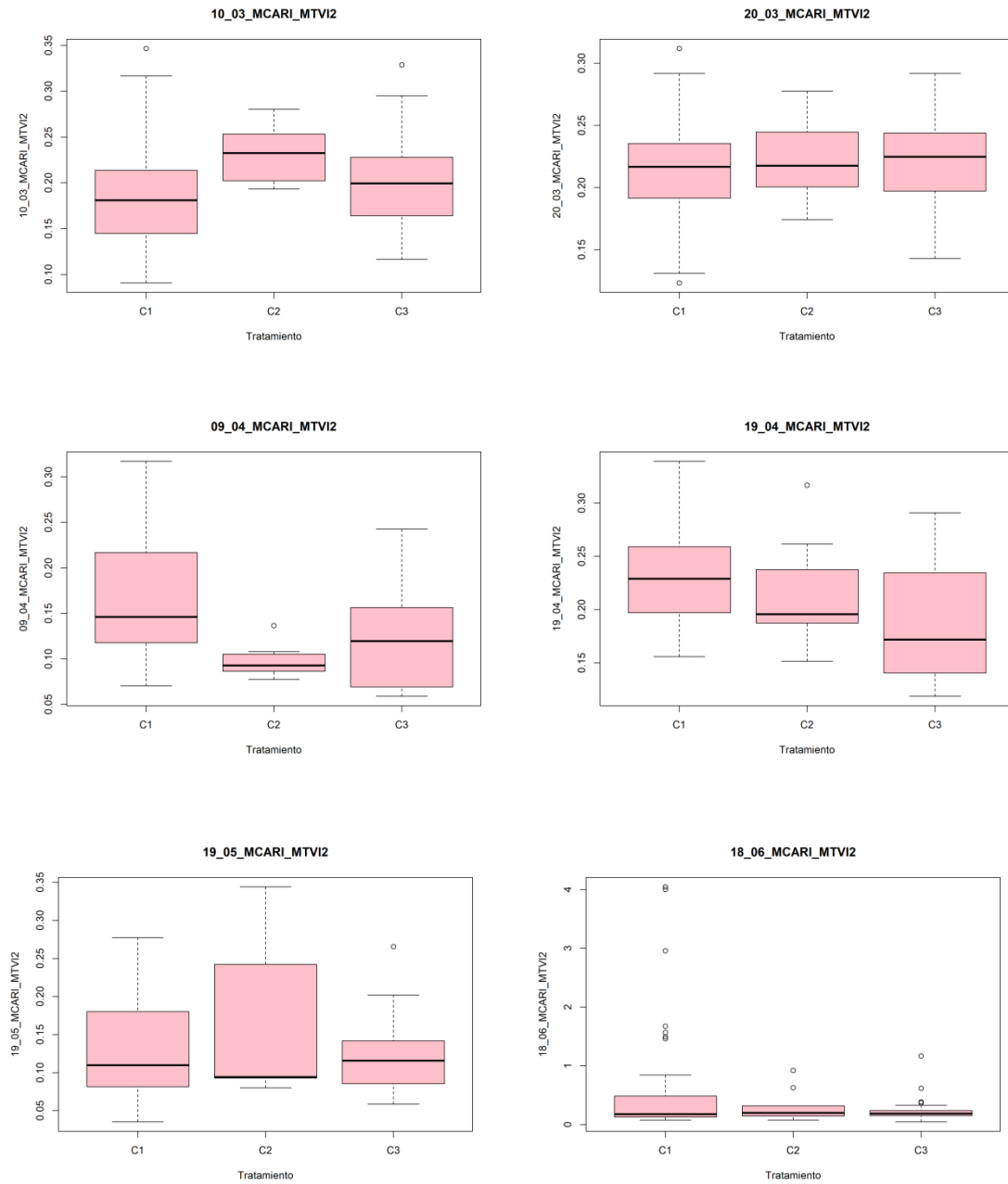


Figura 75. Diagramas de cajas (box-plot) datos de MCARI/MTVI2 para cebada

ANEXO 2. VALORES INDICES ACUMULADOS /UFN

CULTIVO TRIGO

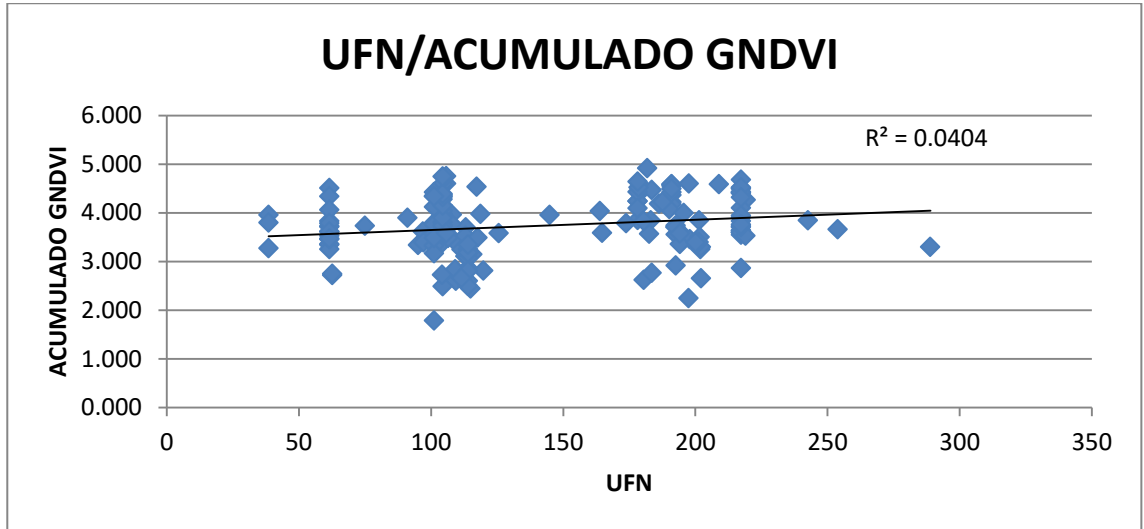


Figura 76. Representación valores acumulados GNDVI-UFN para trigo

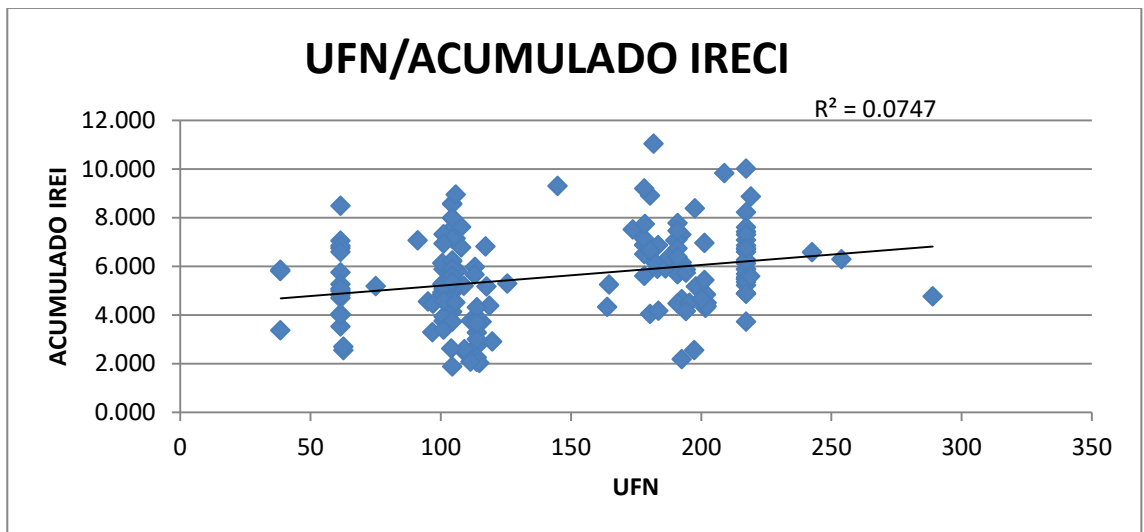


Figura 77. Representación valores acumulados IRECI-UFN para trigo

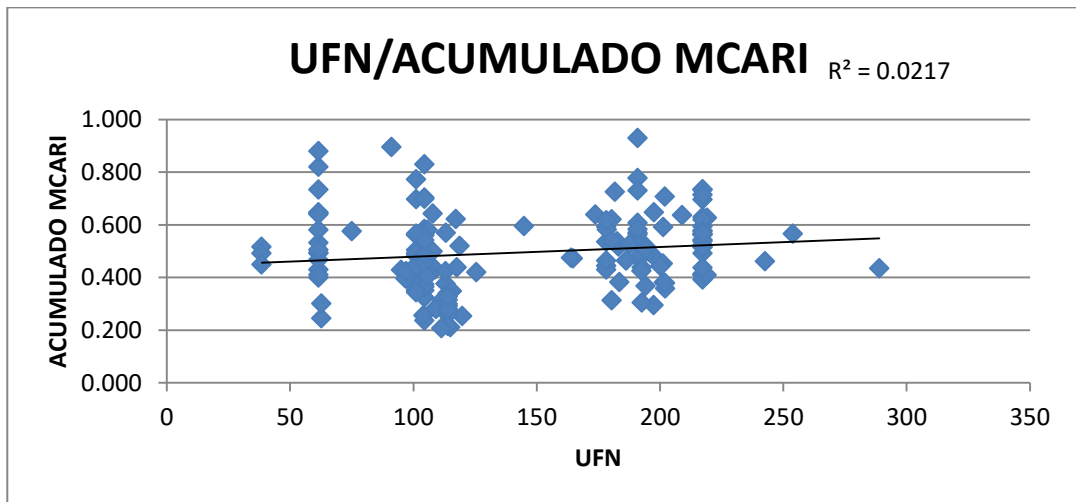


Figura 78. Representación valores acumulados MCARI-UFN para trigo

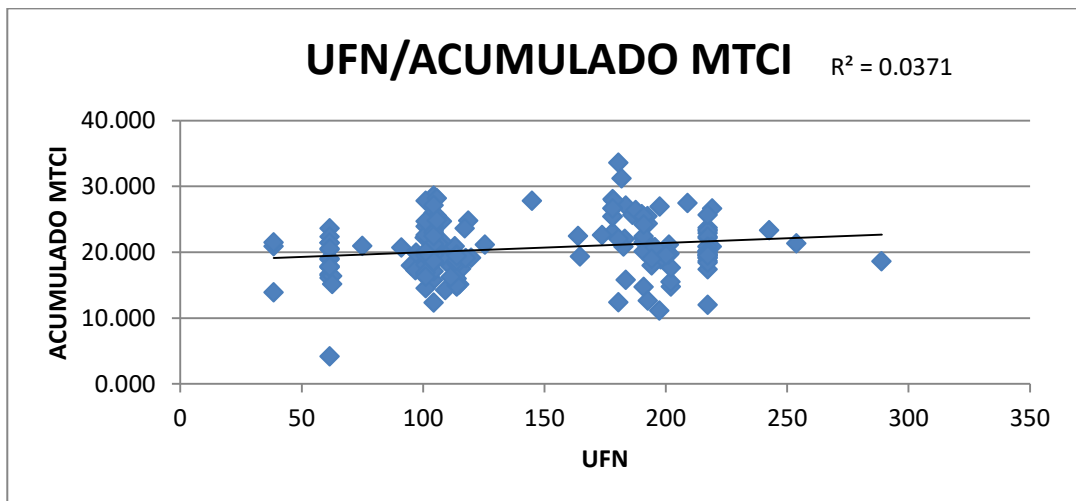


Figura 79. Representación valores acumulados MTCI-UFN para trigo

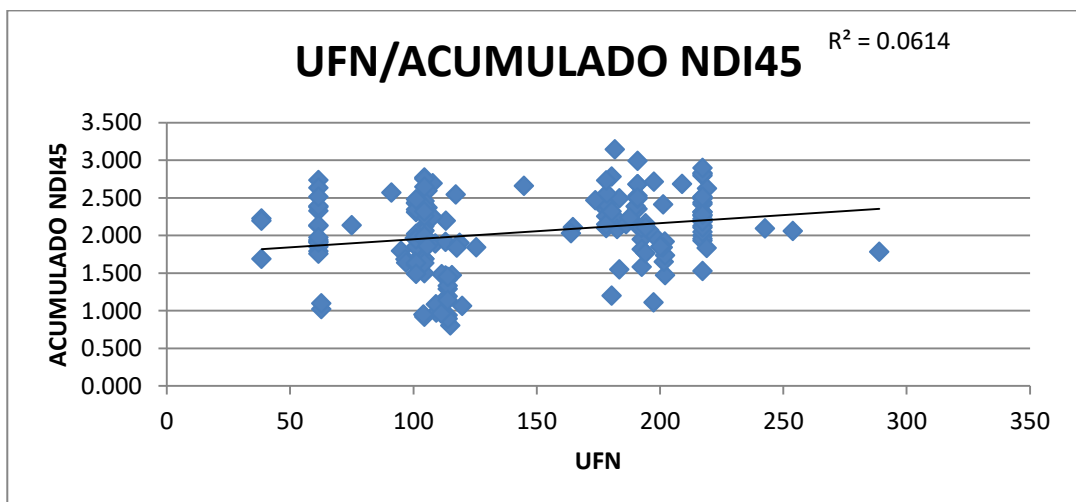


Figura 80. Representación valores acumulados NDI45-UFN para trigo

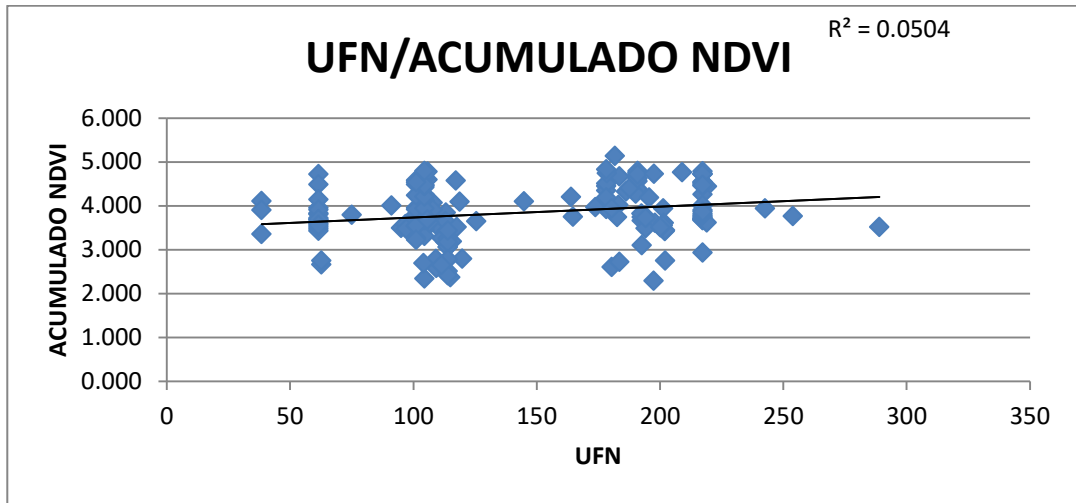


Figura 81. Representación valores acumulados NDVI-UFN para trigo

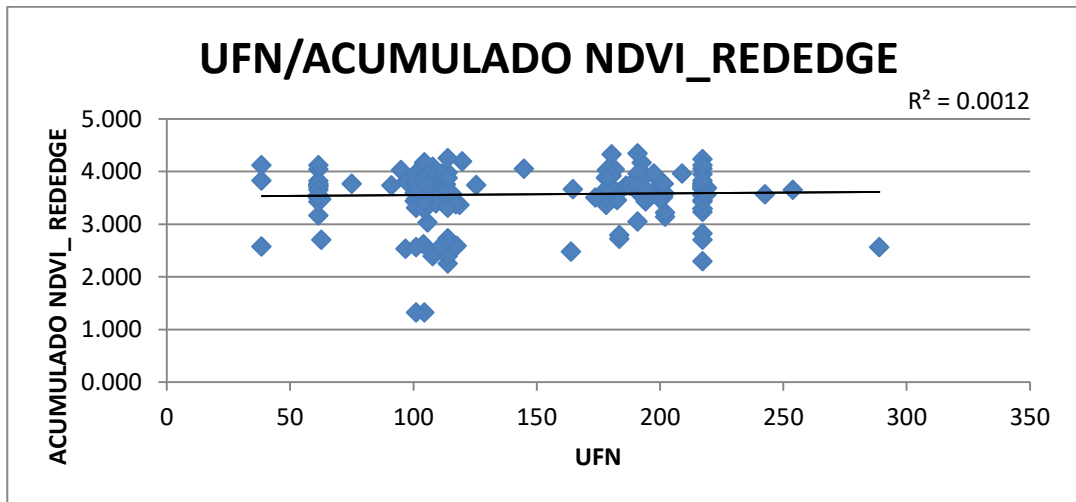


Figura 82. Representación valores acumulados NDVI_REDEEDGE-UFN para trigo

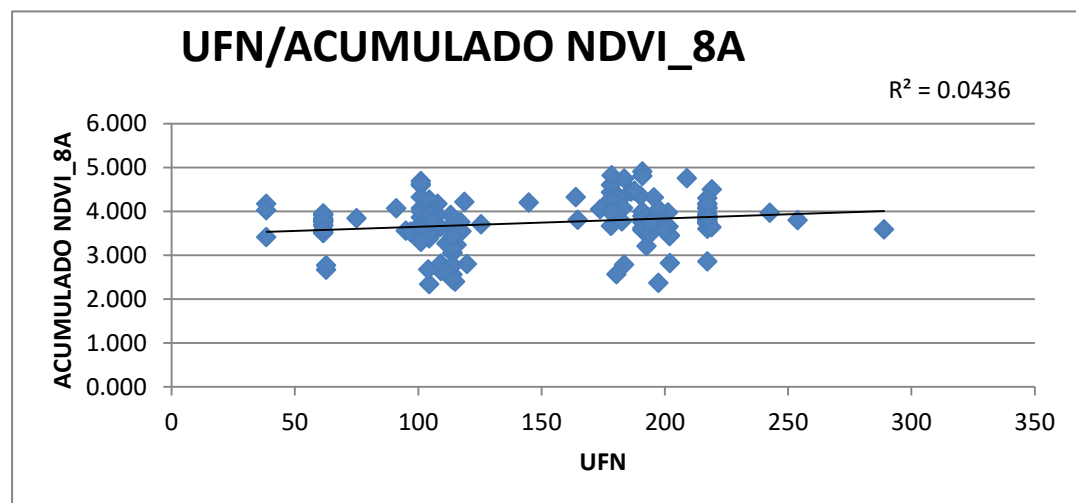


Figura 83. Representación valores acumulados NDVI_8A-UFN para trigo

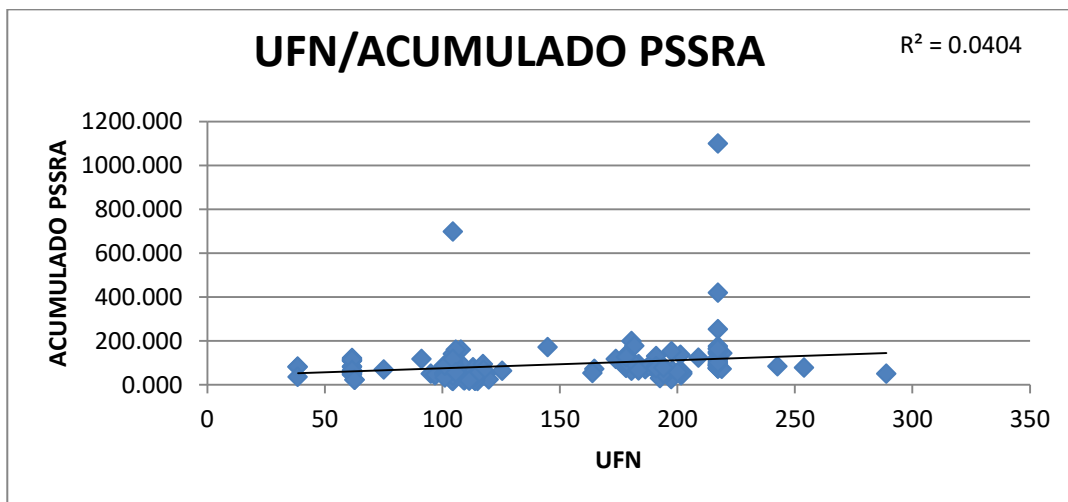


Figura 84. Representación valores acumulados PSSRA-UFN para trigo

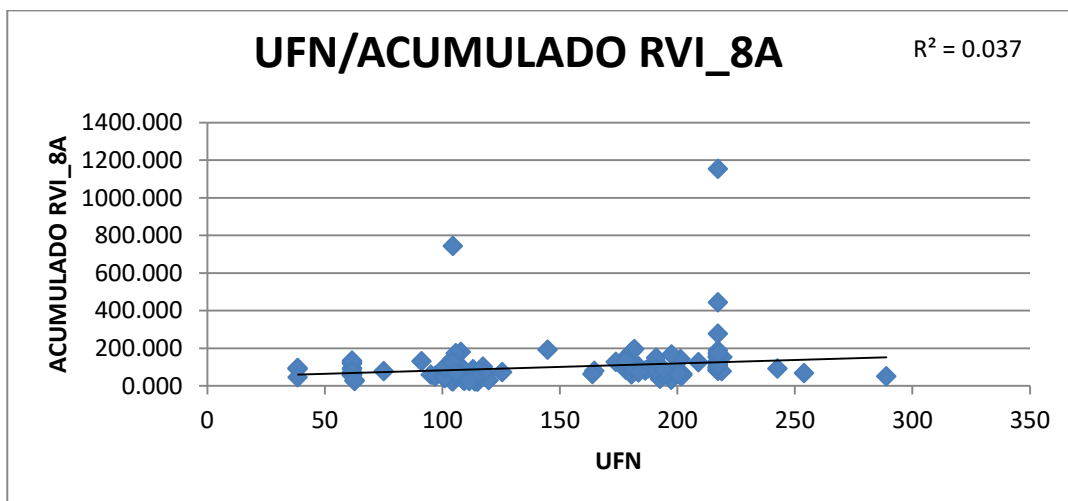


Figura 85. Representación valores acumulados RVI_8A-UFN para trigo

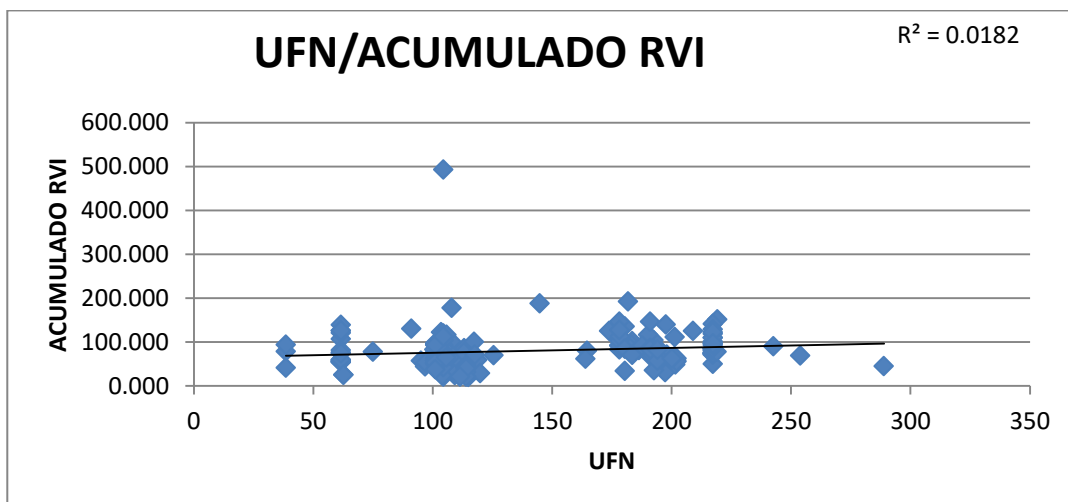


Figura 86. Representación valores acumulados RVI-UFN para trigo

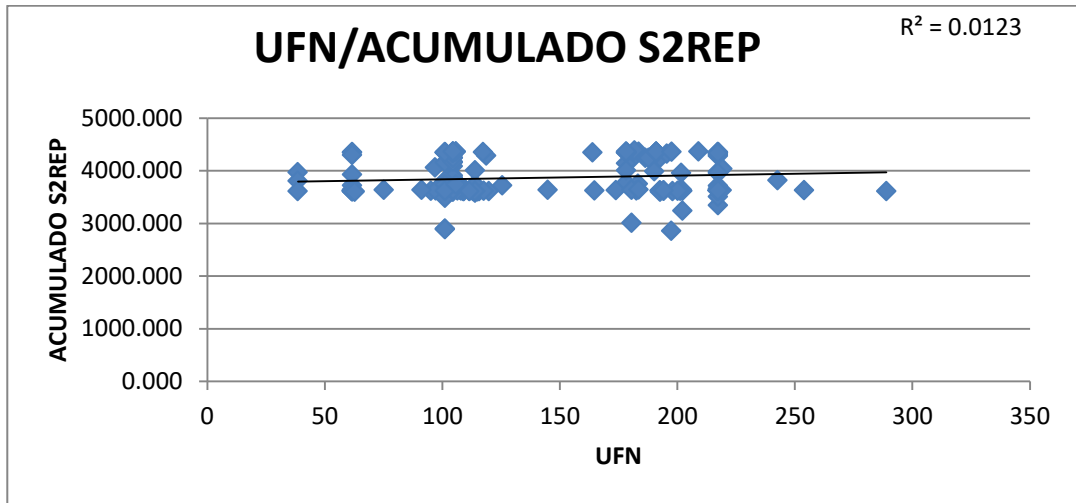


Figura 87. Representación valores acumulados S2REP-UFN para trigo

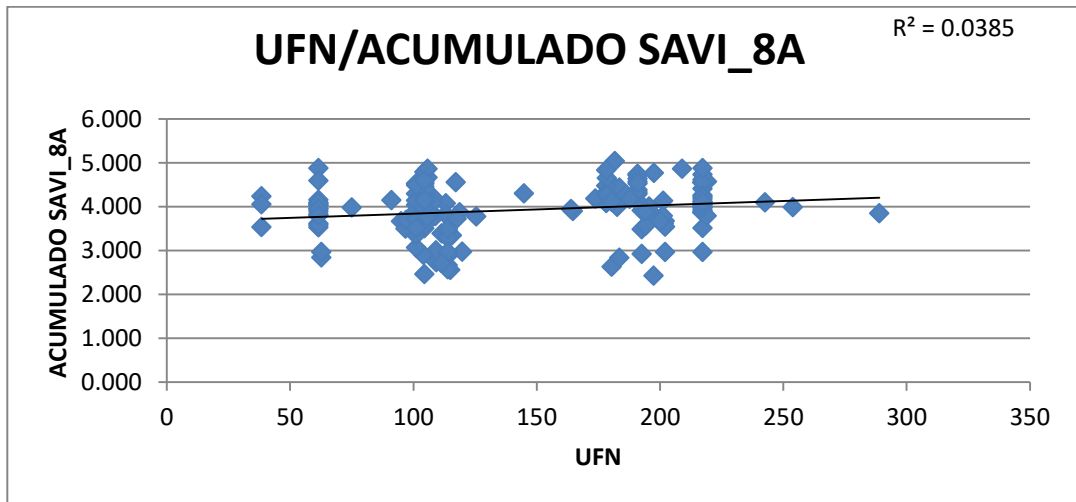


Figura 88. Representación valores acumulados SAVI_8A-UFN para trigo

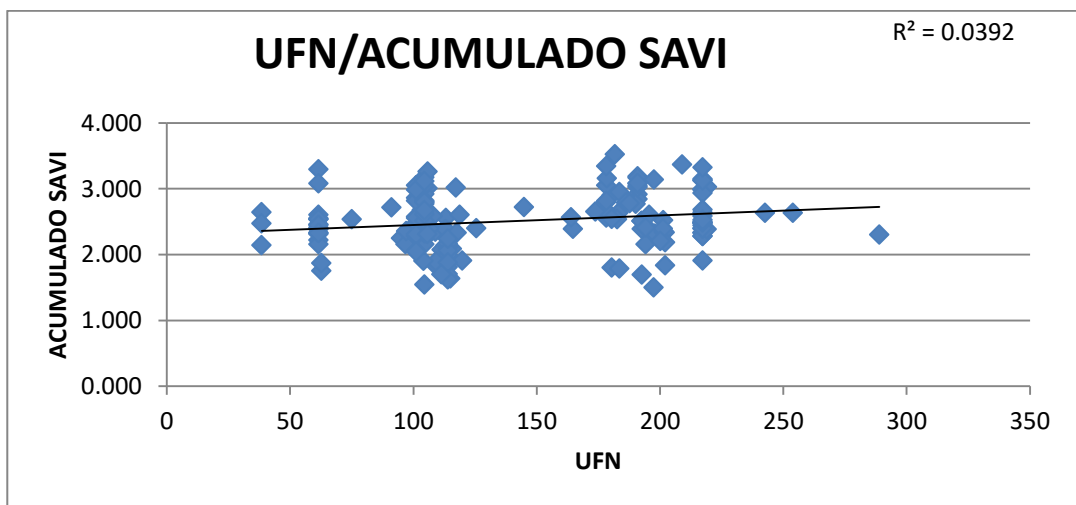


Figura 89. Representación valores acumulados SAVI-UFN para trigo

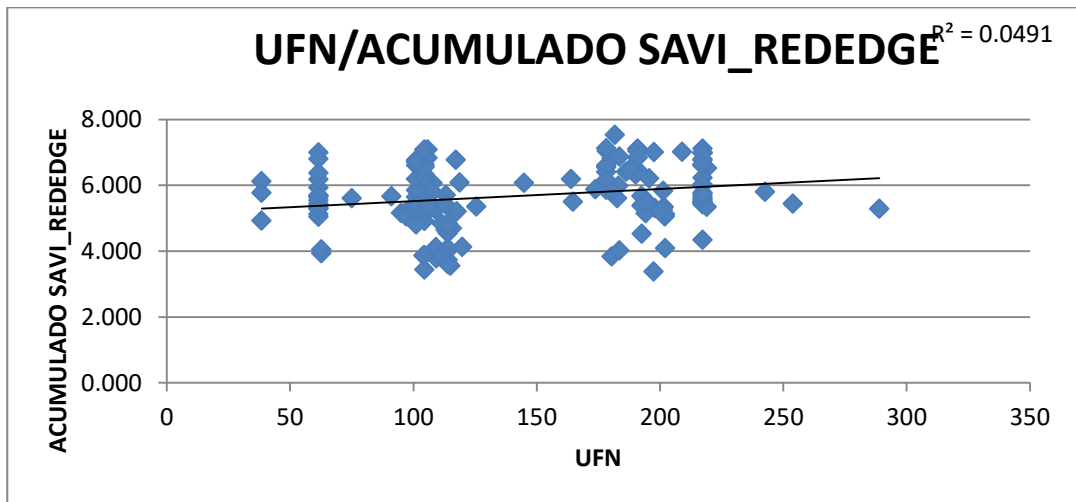


Figura 90. Representación valores acumulados SAVI_REDEGE-UFN para trigo

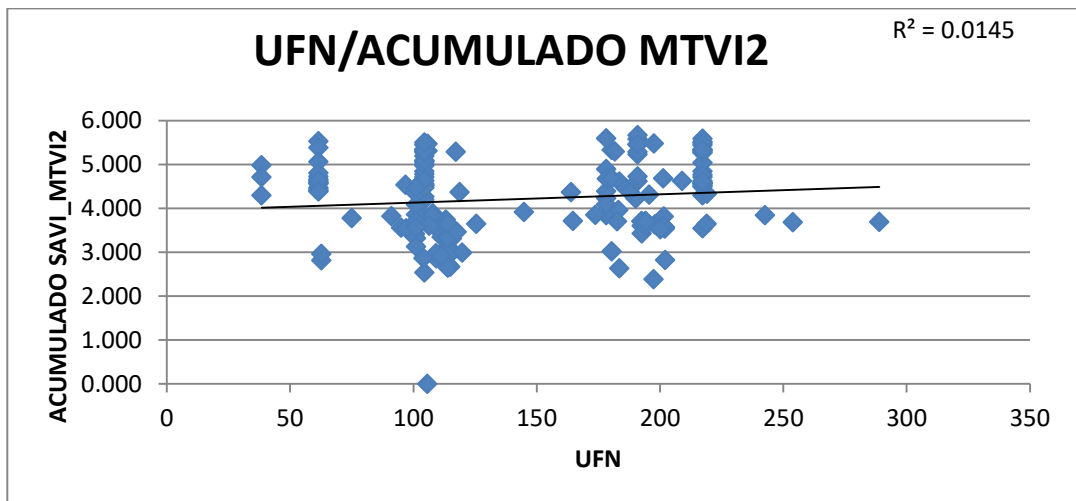


Figura 91. Representación valores acumulados MTVI2-UFN para trigo

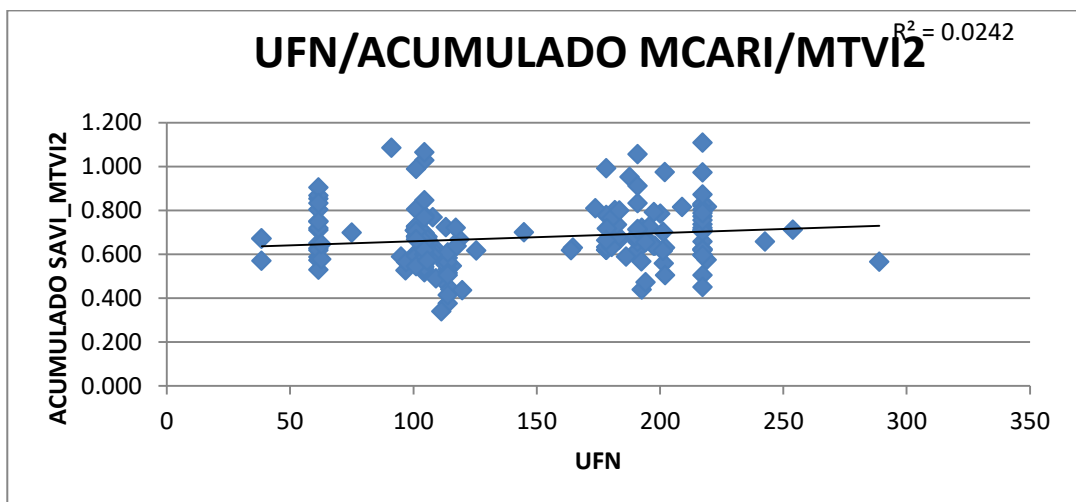


Figura 92. Representación valores acumulados MCARI/MTVI2-UFN para trigo

CEBADA

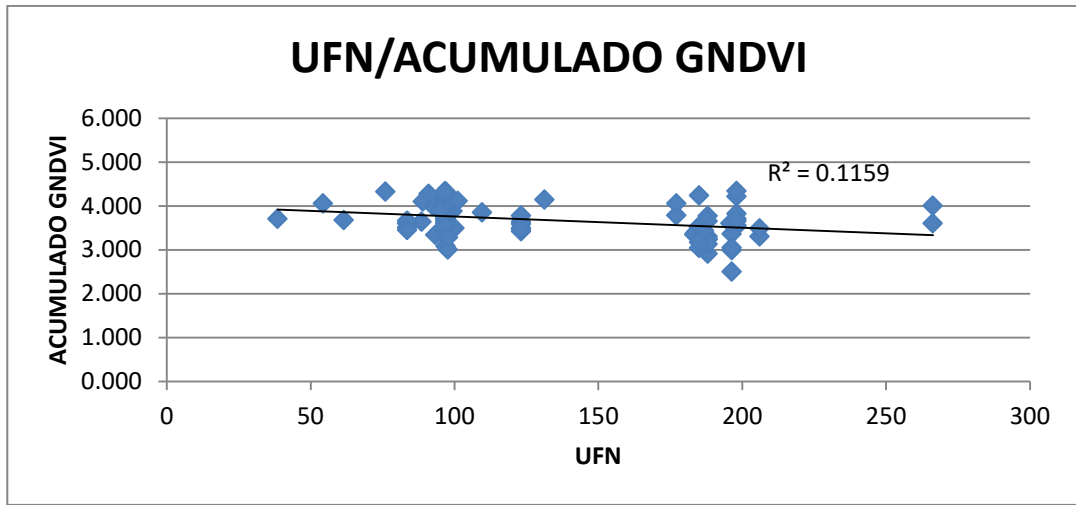


Figura 93. Representación valores acumulados GNDVI-UFN para cebada

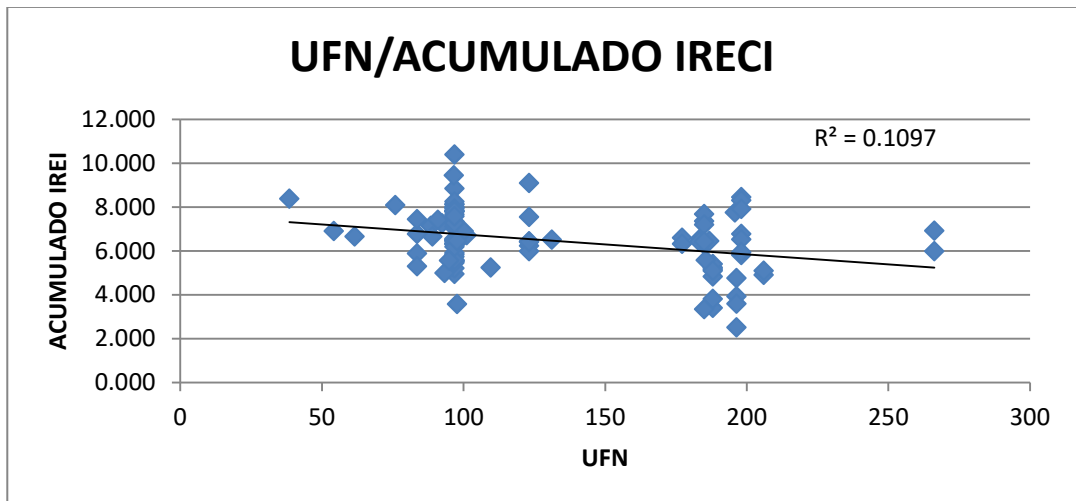


Figura 94. Representación valores acumulados IRECI-UFN para cebada

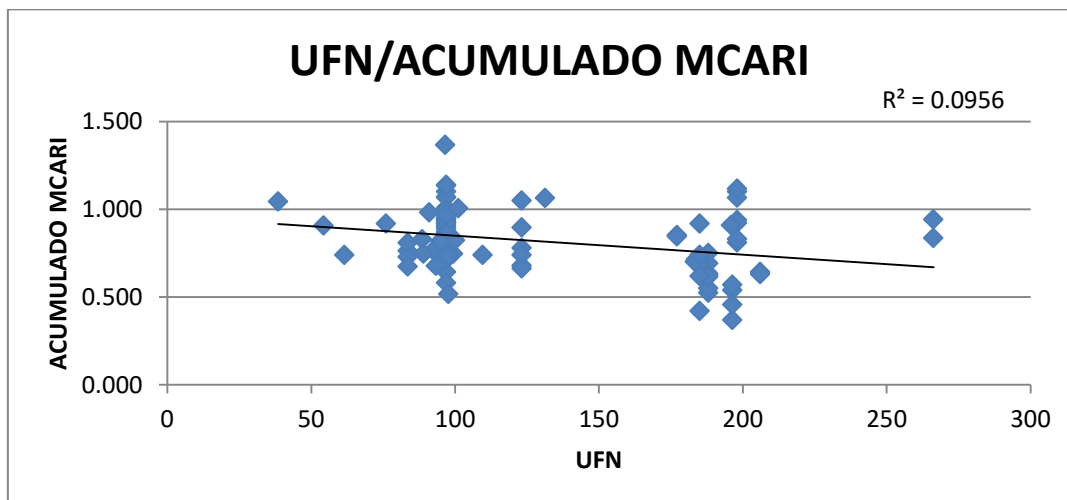


Figura 95. Representación valores acumulados MCARI-UFN para cebada

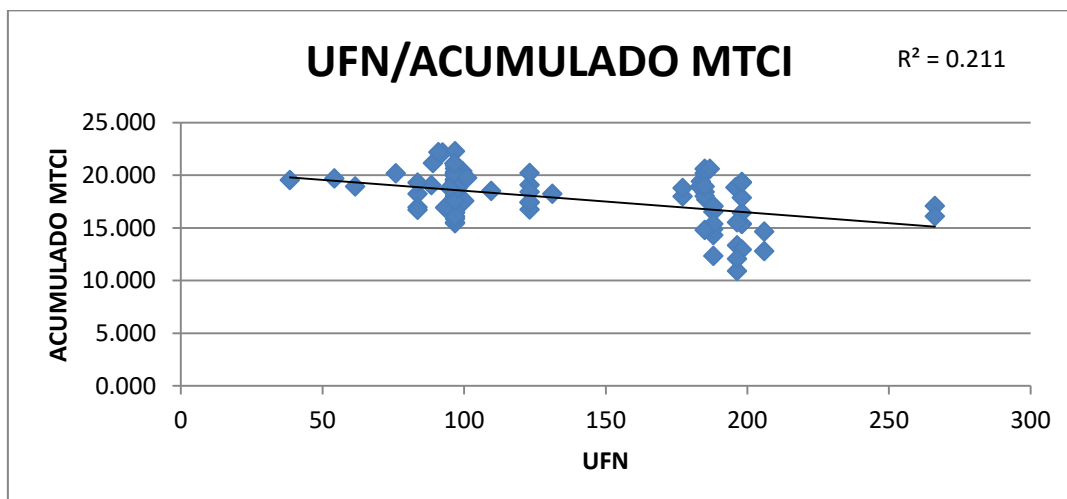


Figura 96. Representación valores acumulados MTCI-UFN para cebada

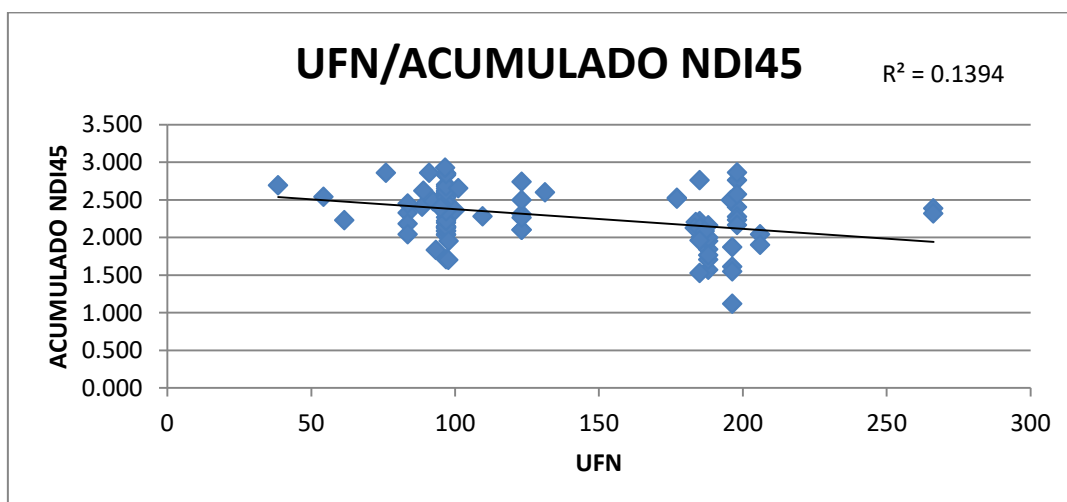


Figura 97. Representación valores acumulados NDI45-UFN para cebada

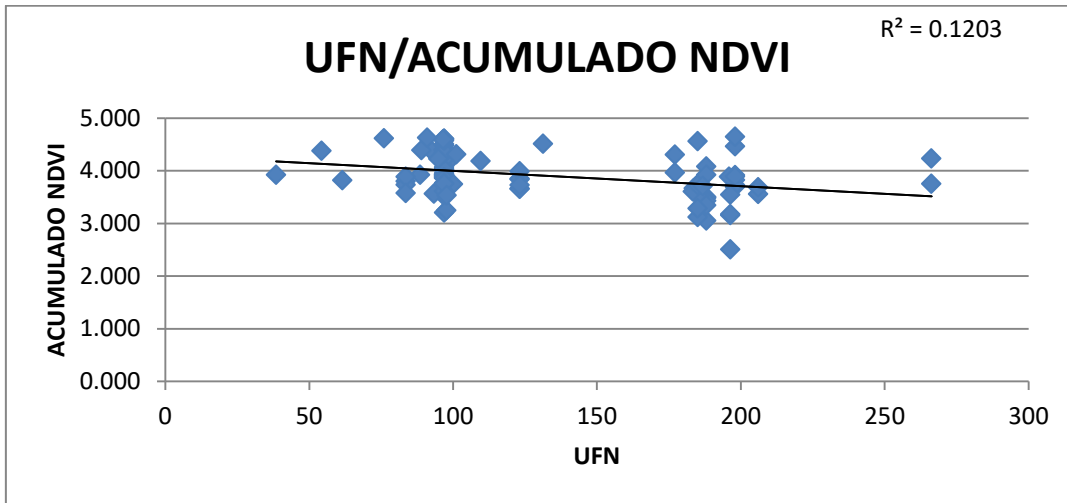


Figura 98. Representación valores acumulados NDVI-UFN para cebada

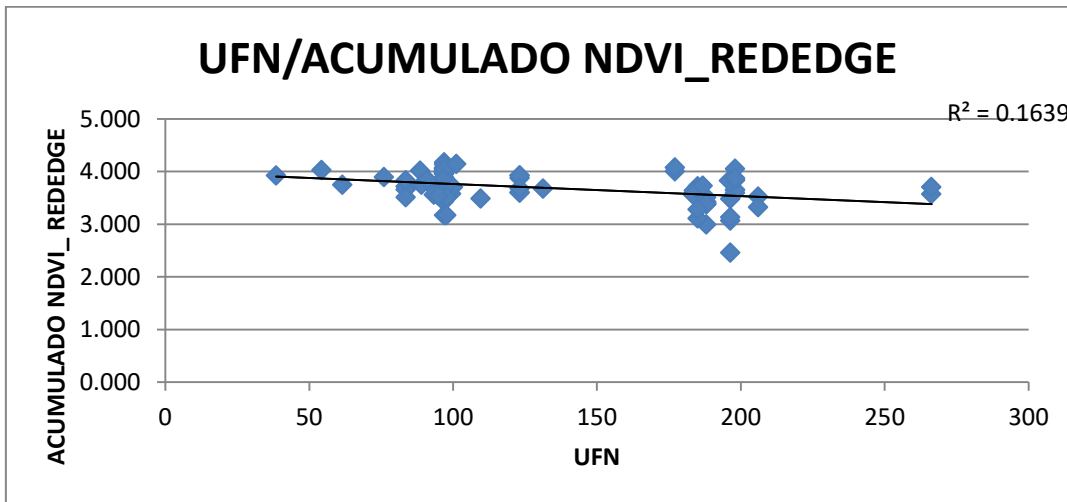


Figura 99. Representación valores acumulados NDVI_REDEEDGE-UFN para cebada

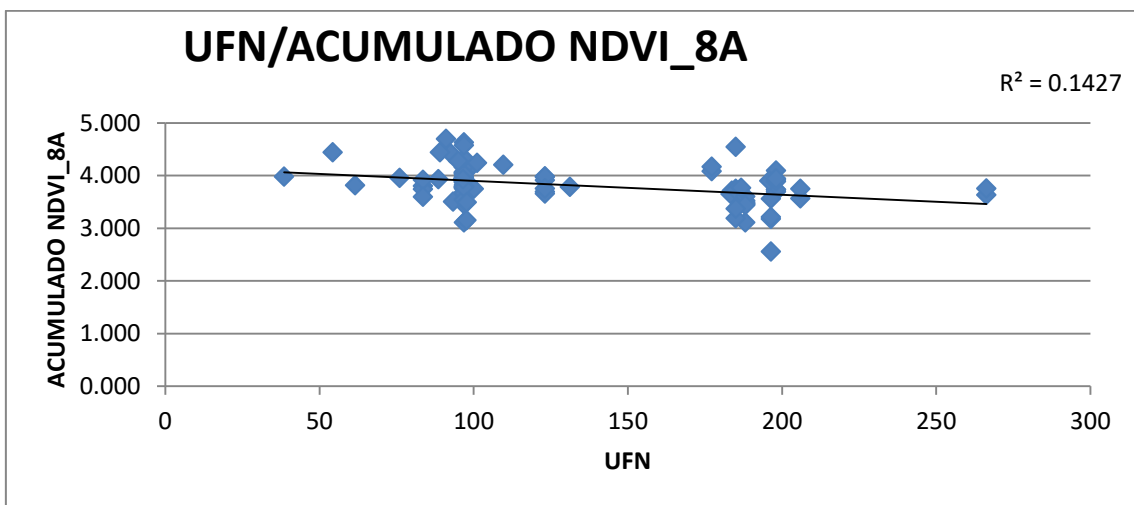


Figura 100. Representación valores acumulados NDVI_8A-UFN para cebada

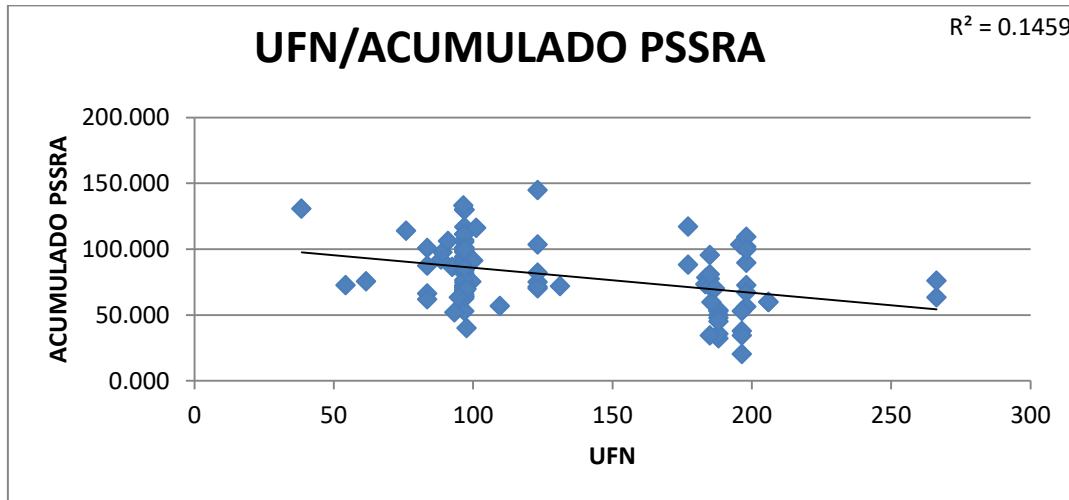


Figura 101. Representación valores acumulados PSSRA-UFN para cebada

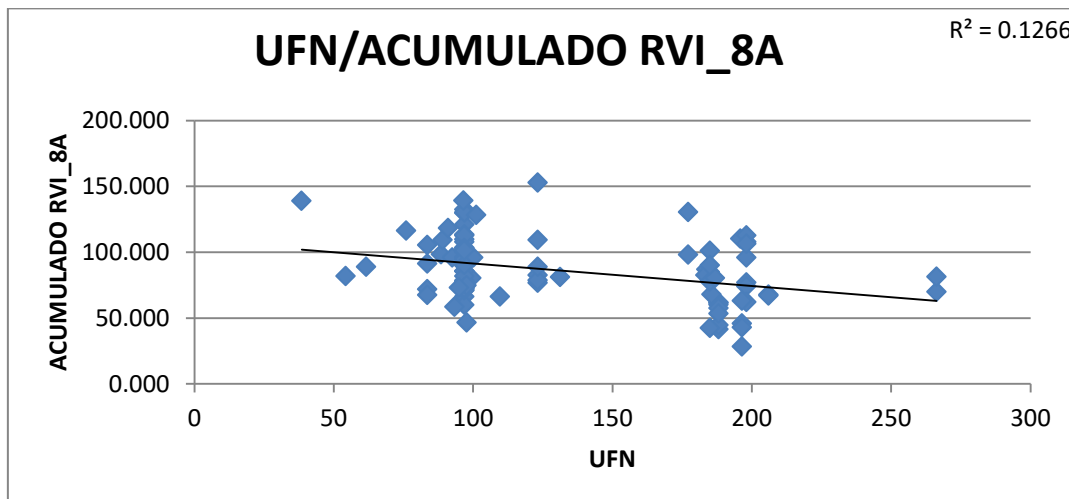


Figura 102. Representación valores acumulados RVI_8A-UFN para cebada

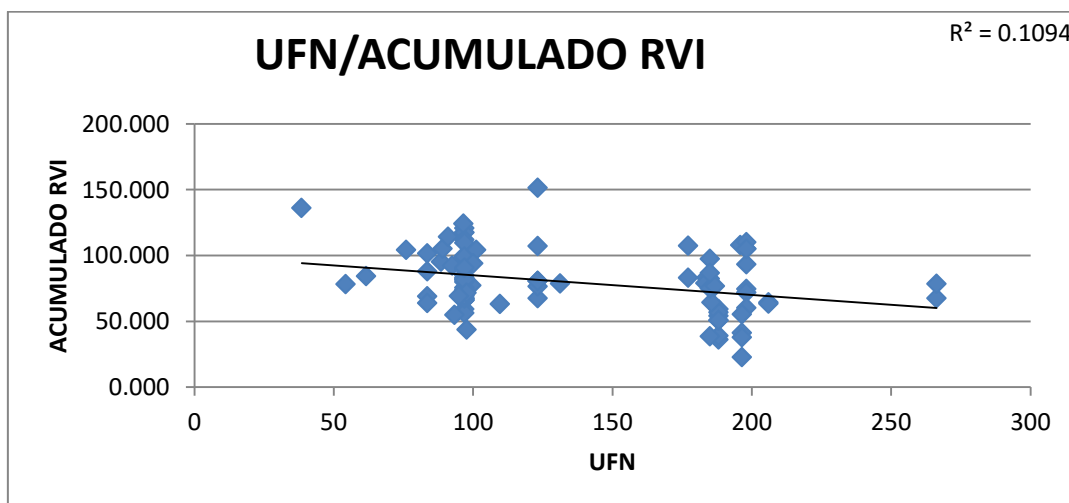


Figura 103. Representación valores acumulados RVI-UFN para cebada

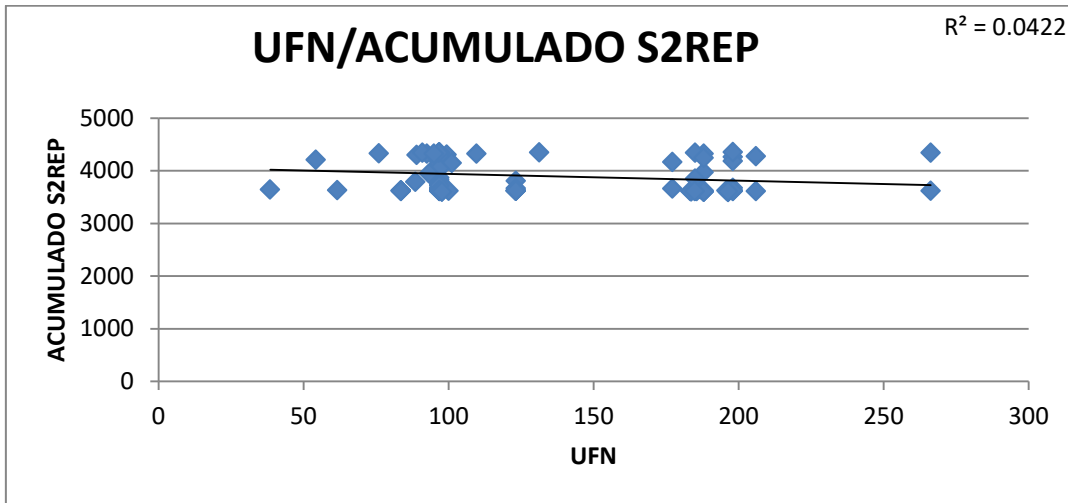


Figura 104. Representación valores acumulados S2REP-UFN para cebada

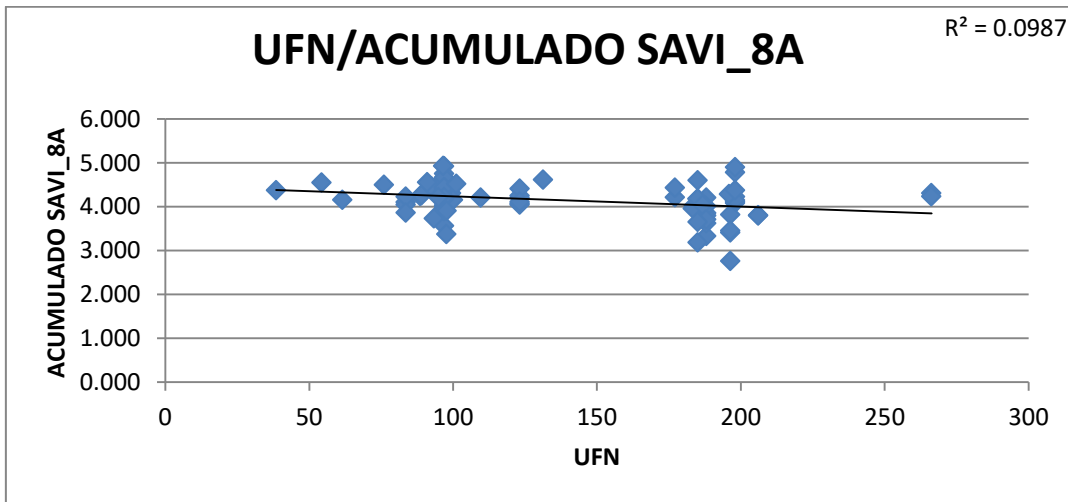


Figura 105. Representación valores acumulados SAVI_8A-UFN para cebada

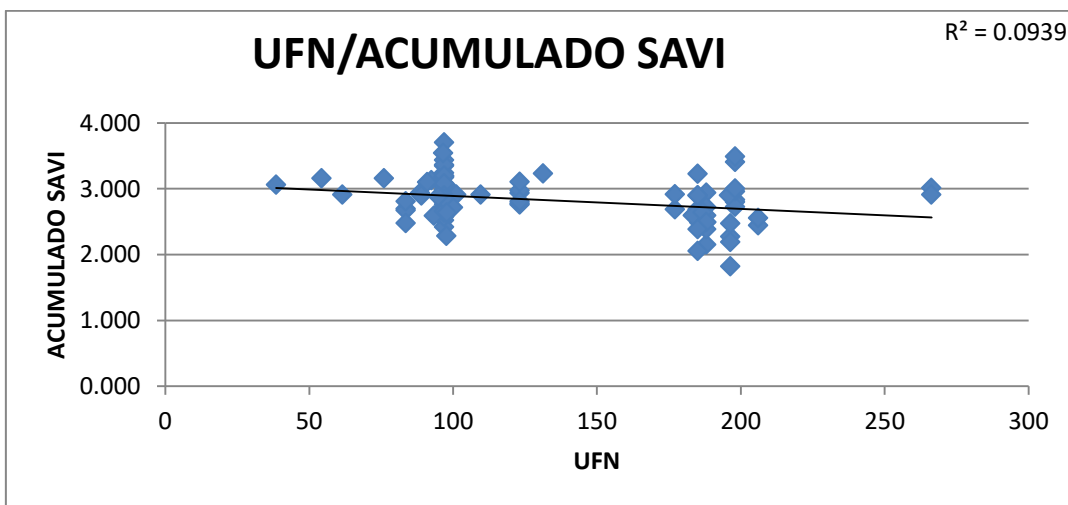


Figura 106. Representación valores acumulados SAVI-UFN para cebada

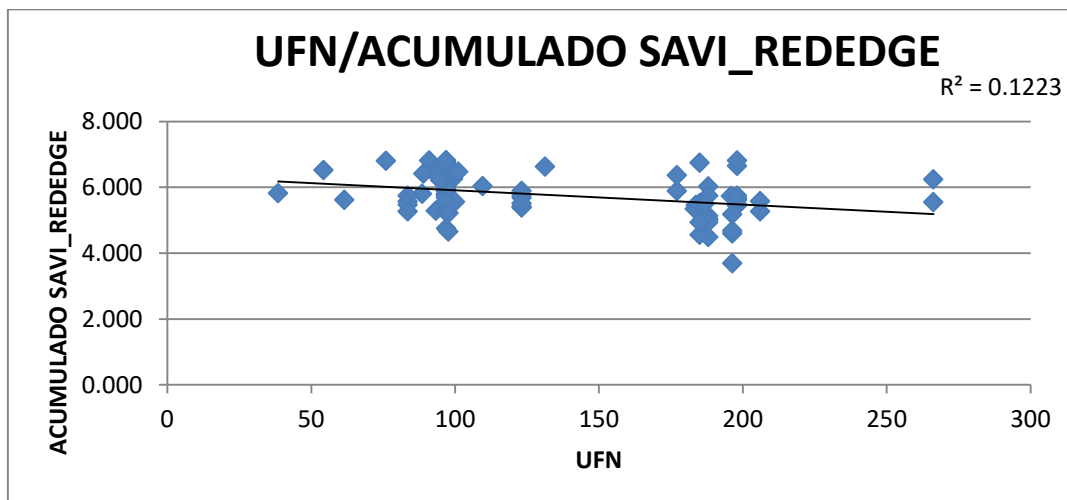


Figura 107. Representación valores acumulados SAVI_REDEEDGE-UFN para cebada

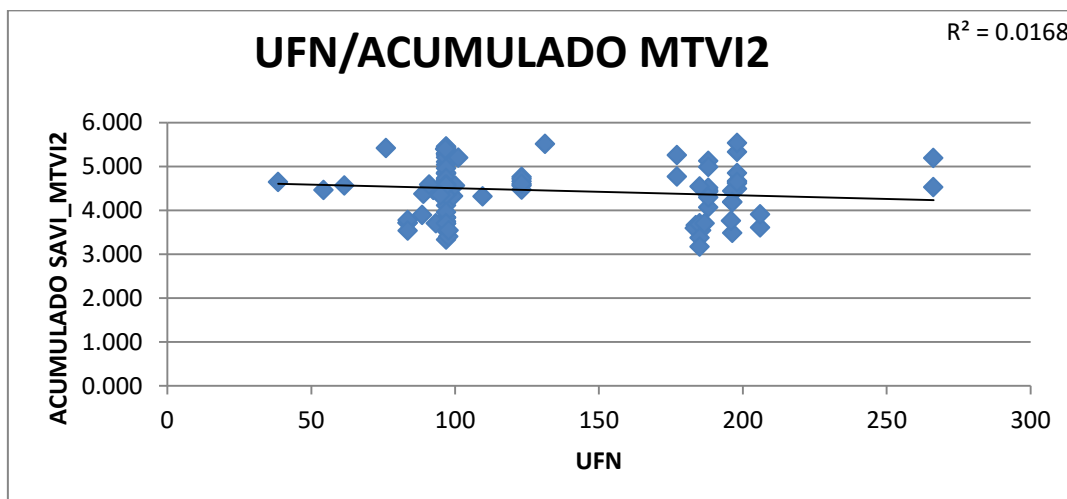


Figura 108. Representación valores acumulados MTVI2-UFN para cebada

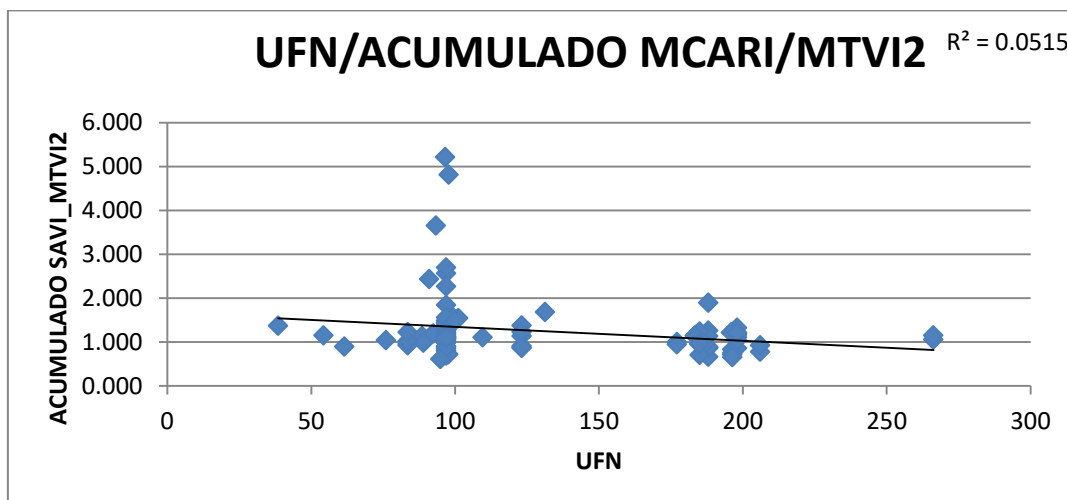


Figura 109. Representación valores acumulados MCARI/MTVI2-UFN para cebada

ANEXO 3. VALORES INDICES ACUMULADOS /RENDIMIENTO

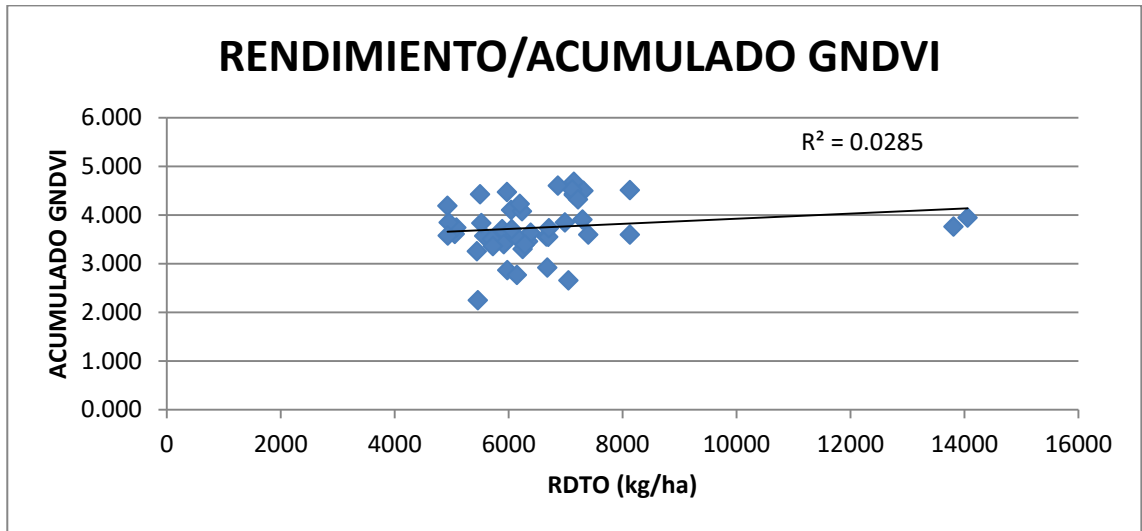


Figura 110.Representación valores acumulados GNDVI-RENDIMIENTO para trigo

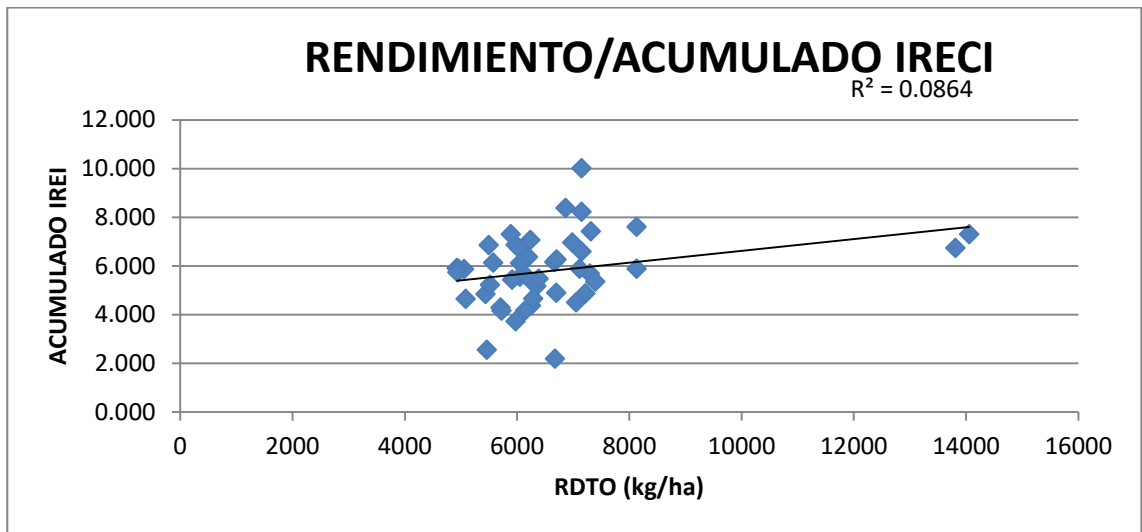


Figura 111.Representación valores acumulados IRECI-RENDIMIENTO para trigo

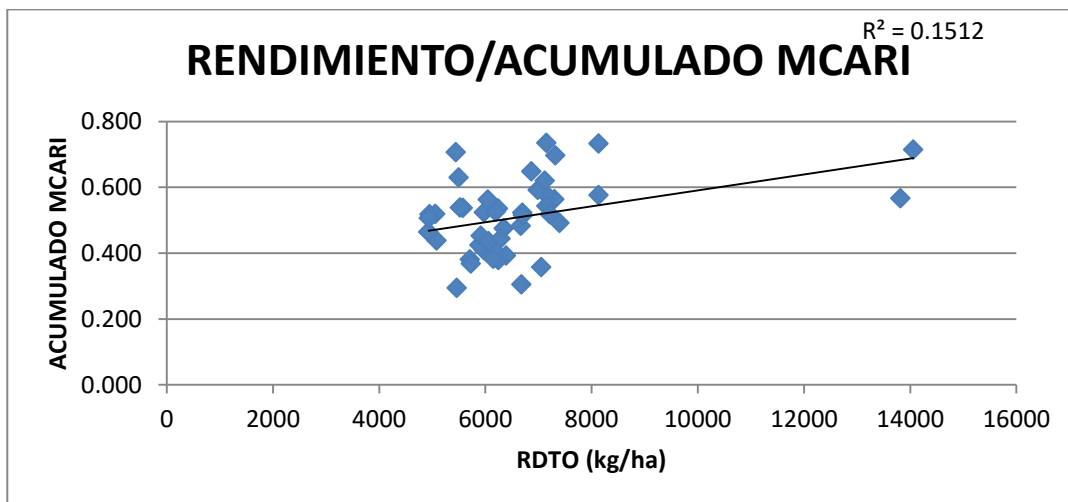


Figura 112. Representación valores acumulados MCARI-RENDIMIENTO para trigo

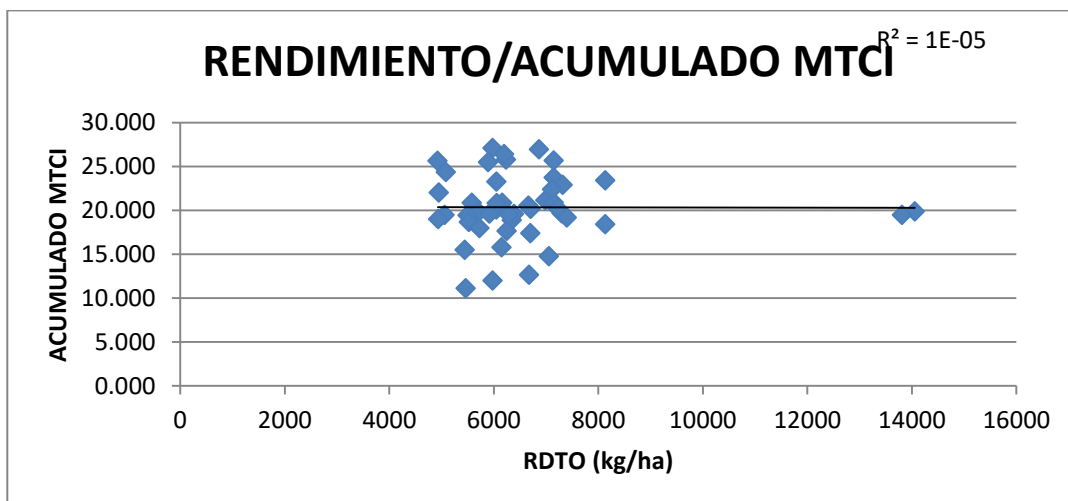


Figura 113. Representación valores acumulados MTCI-RENDIMIENTO para trigo

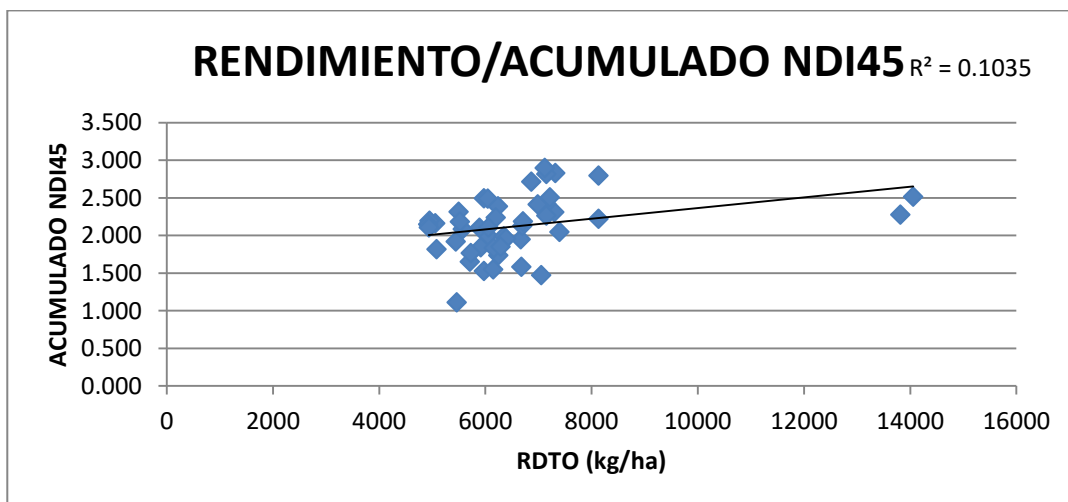


Figura 114. Representación valores acumulados NDI45-RENDIMIENTO para trigo

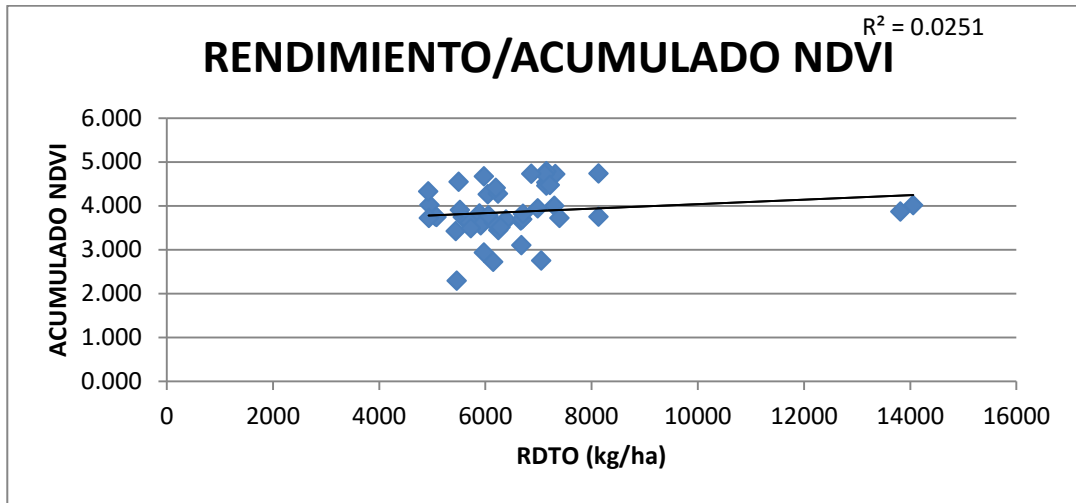


Figura 115. Representación valores acumulados NDVI-RENDIMIENTO para trigo

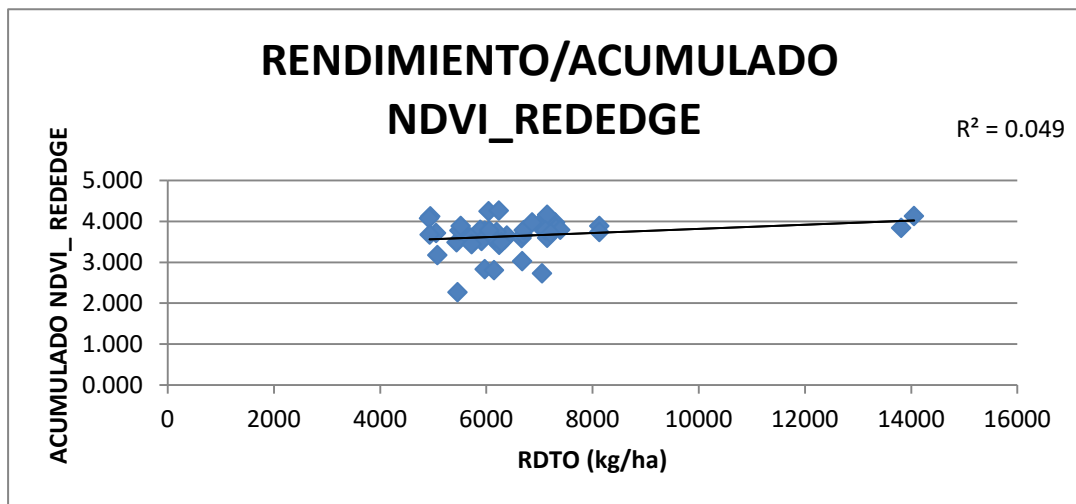


Figura 116. Representación valores acumulados NDVI_REDEEDGE-RENDIMIENTO para trigo

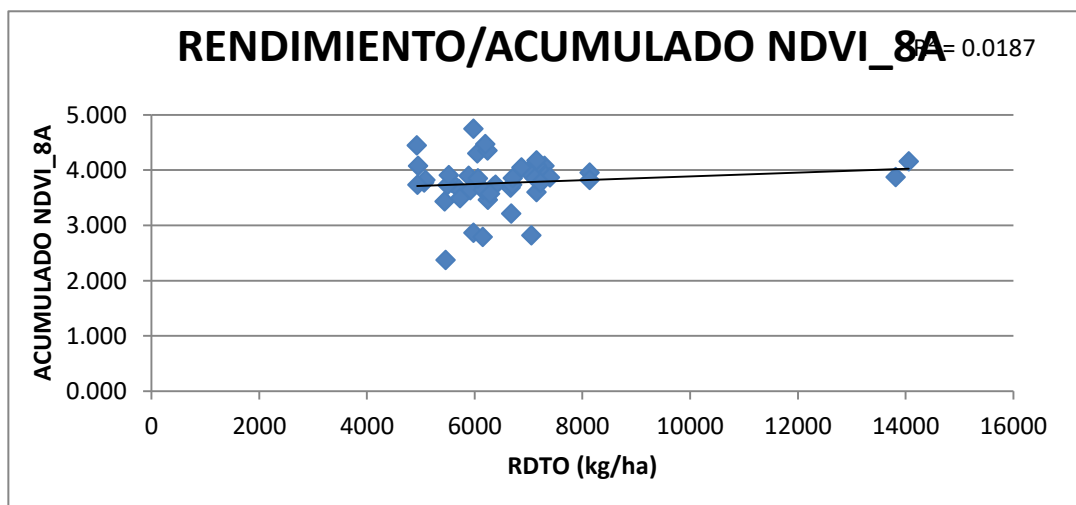


Figura 117. Representación valores acumulados NDVI_8A-RENDIMIENTO para trigo

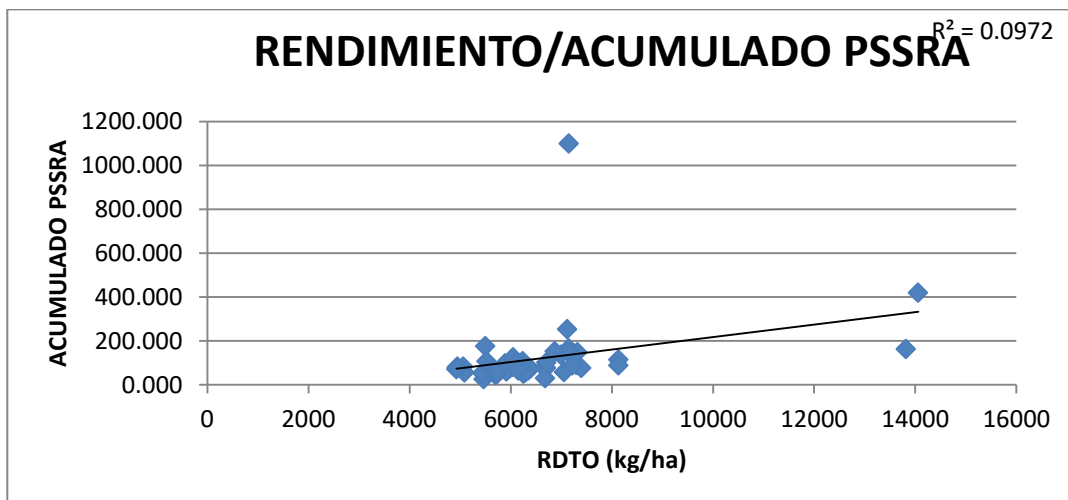


Figura 118. Representación valores acumulados PSSRA-RENDIMIENTO para trigo

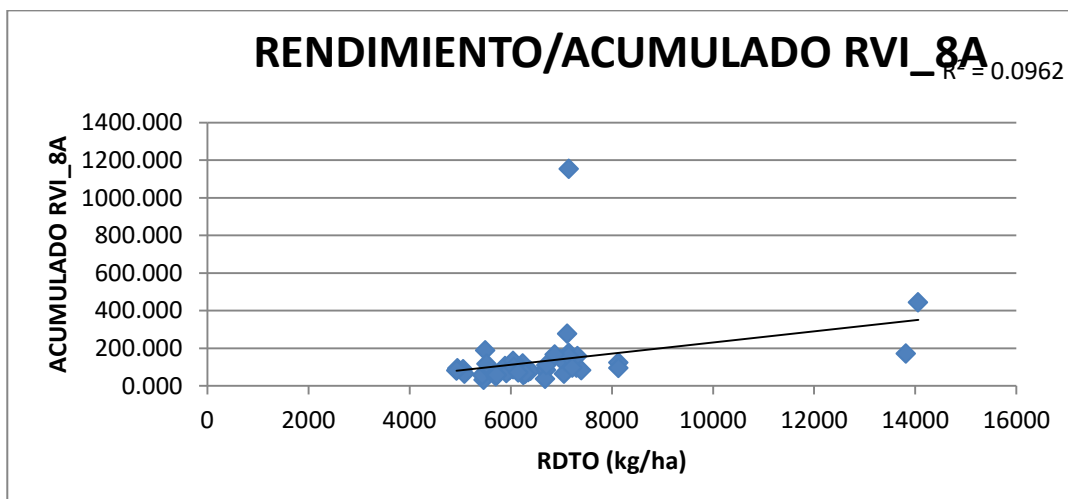


Figura 119. Representación valores acumulados RVI_8A-RENDIMIENTO para trigo

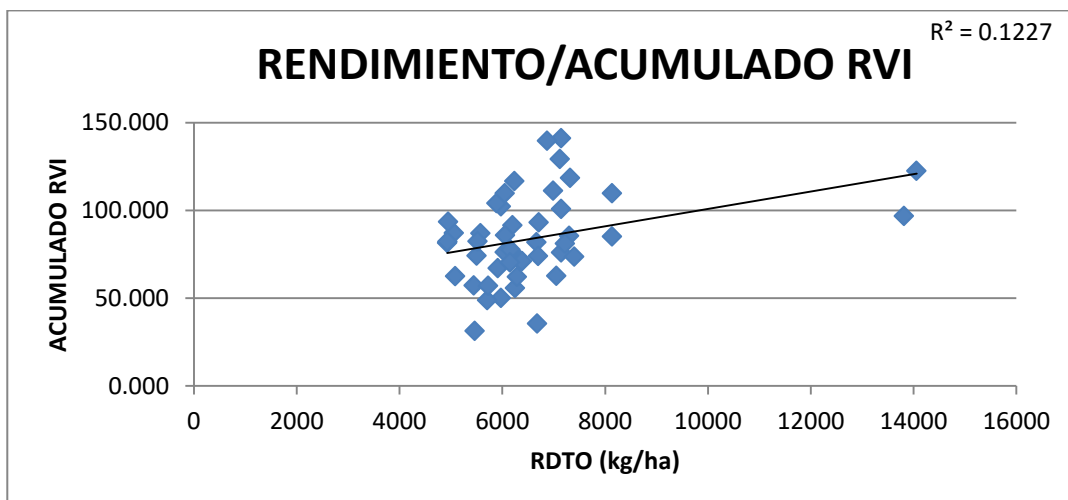


Figura 120. Representación valores acumulados RVI-RENDIMIENTO para trigo

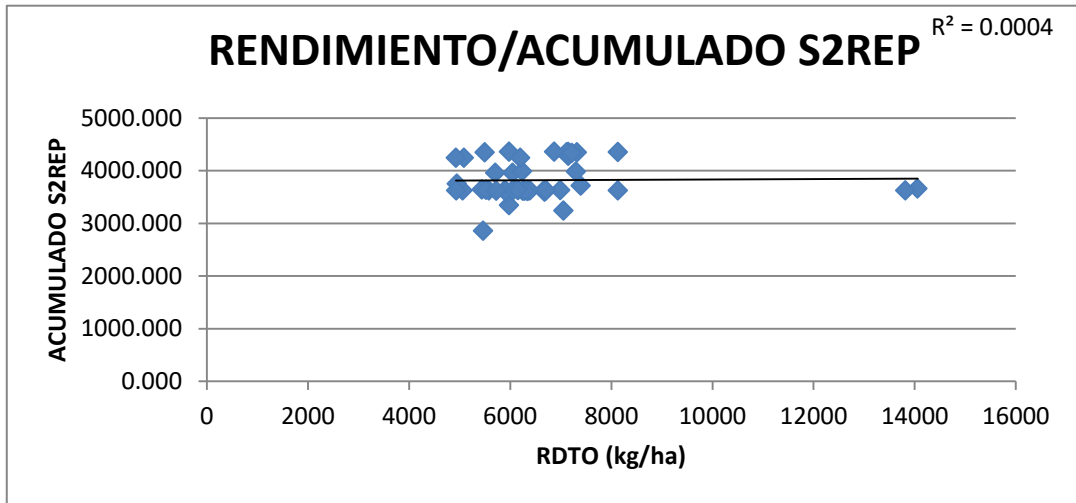


Figura 121. Representación valores acumulados S2REP-RENDIMIENTO para trigo

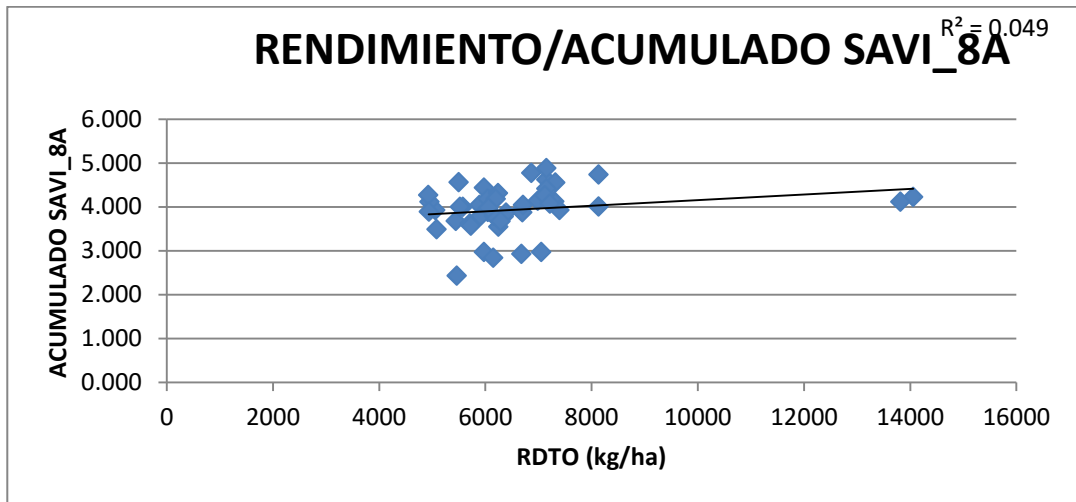


Figura 122. Representación valores acumulados SAVI_8A-RENDIMIENTO para trigo

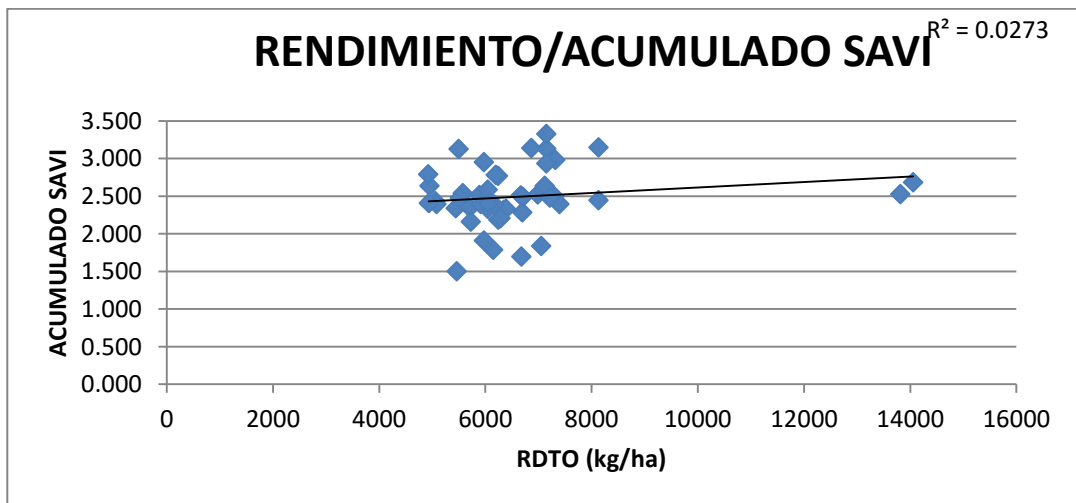


Figura 123. Representación valores acumulados SAVI-RENDIMIENTO para trigo

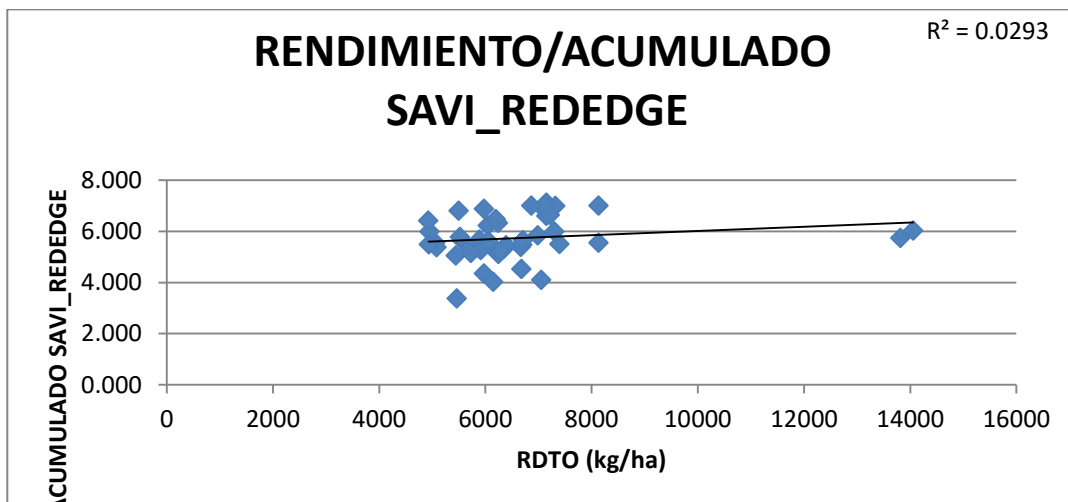


Figura 124. Representación valores acumulados SAVI_REDEGE-RENDIMIENTO para trigo

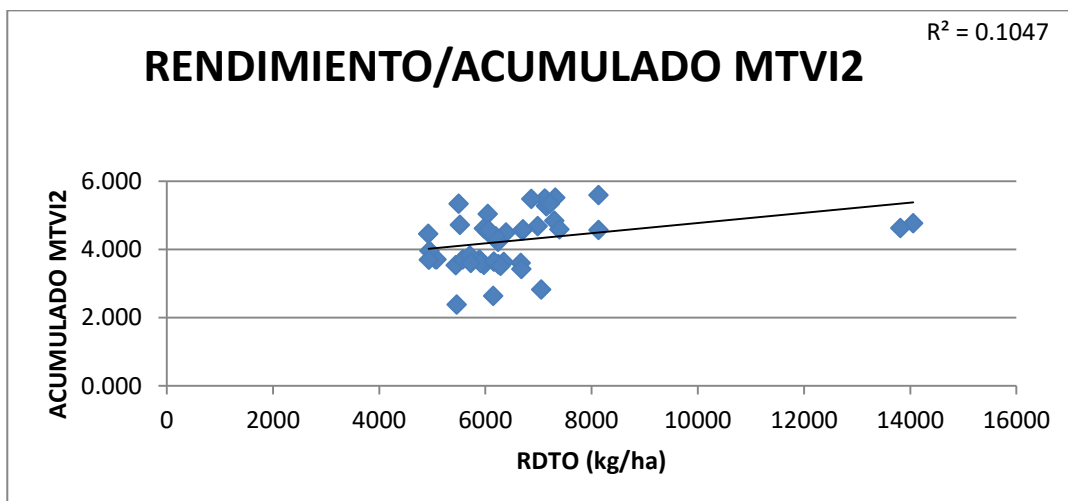


Figura 125. Representación valores acumulados MTVI2-RENDIMIENTO para trigo

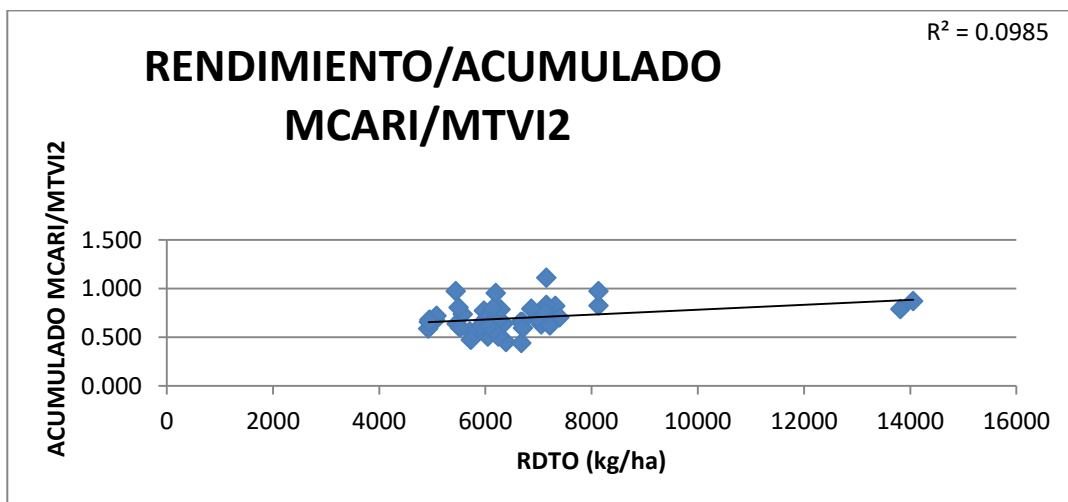


Figura 126. Representación valores acumulados MCARI/MTVI2-RENDIMIENTO para trigo

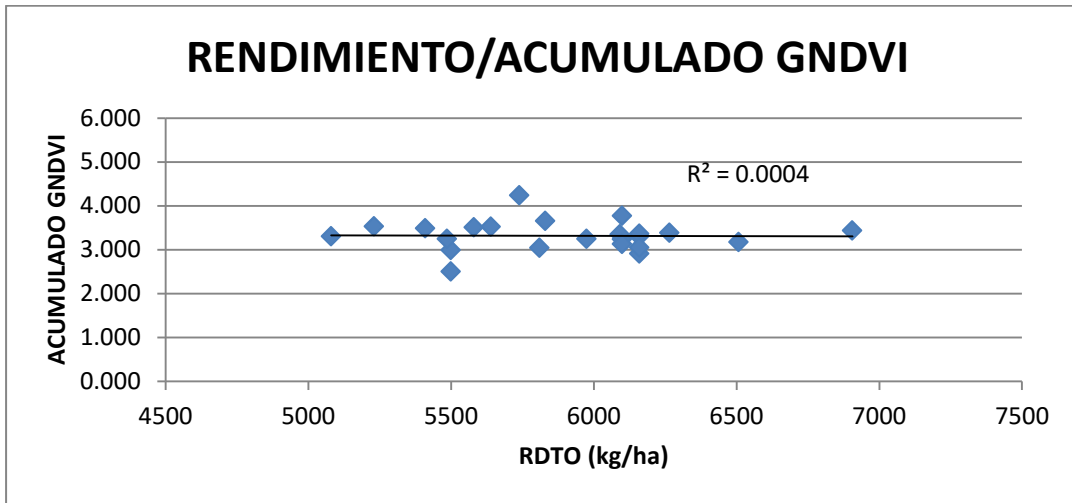


Figura 127. Representación valores acumulados GNDVI-RENDIMIENTO para cebada

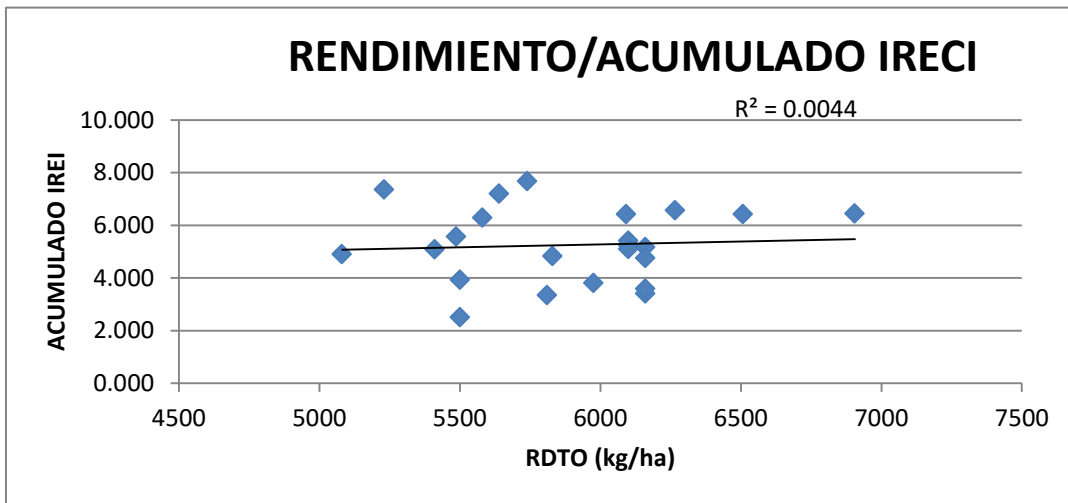


Figura 128. Representación valores acumulados IRECI-RENDIMIENTO para cebada

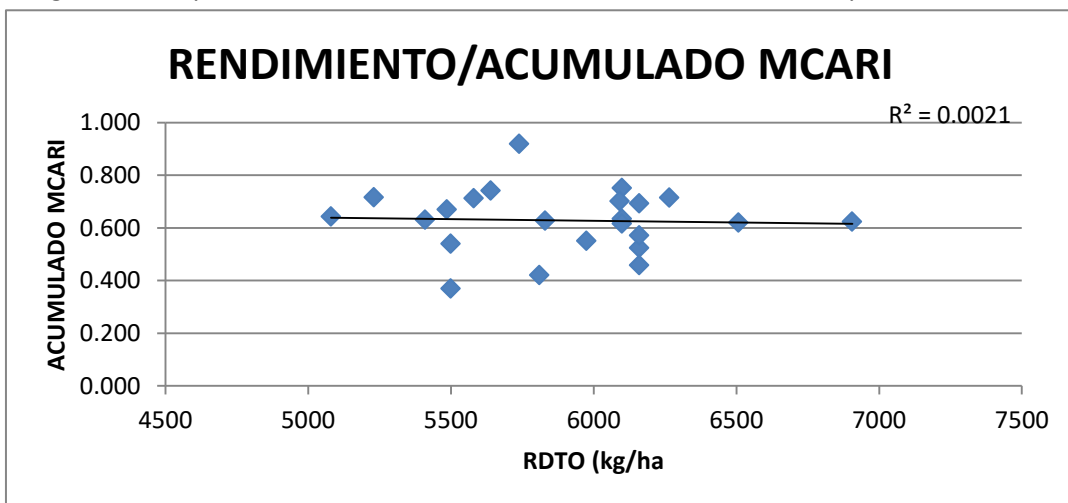


Figura 129. Representación valores acumulados MCARI-RENDIMIENTO para cebada

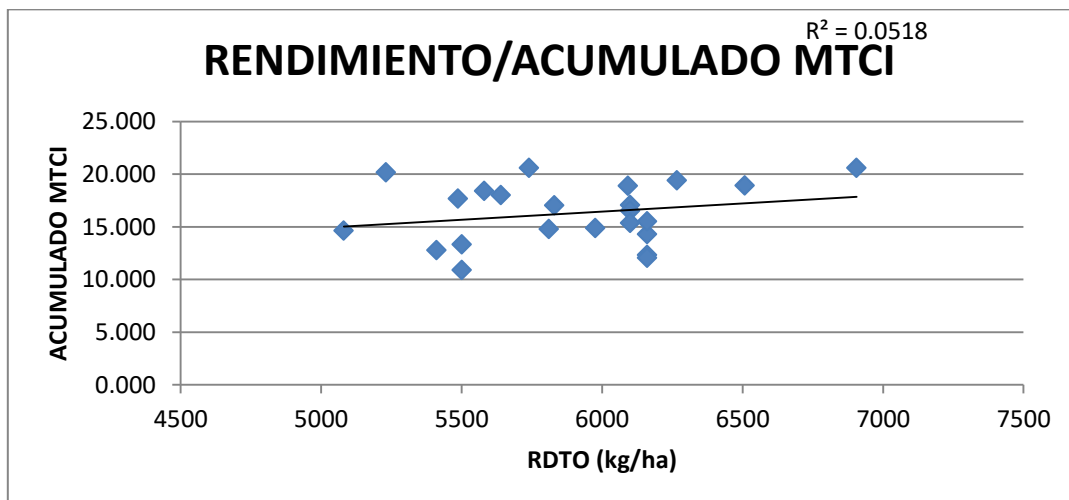


Figura 130. Representación valores acumulados MTCI-RENDIMIENTO para cebada

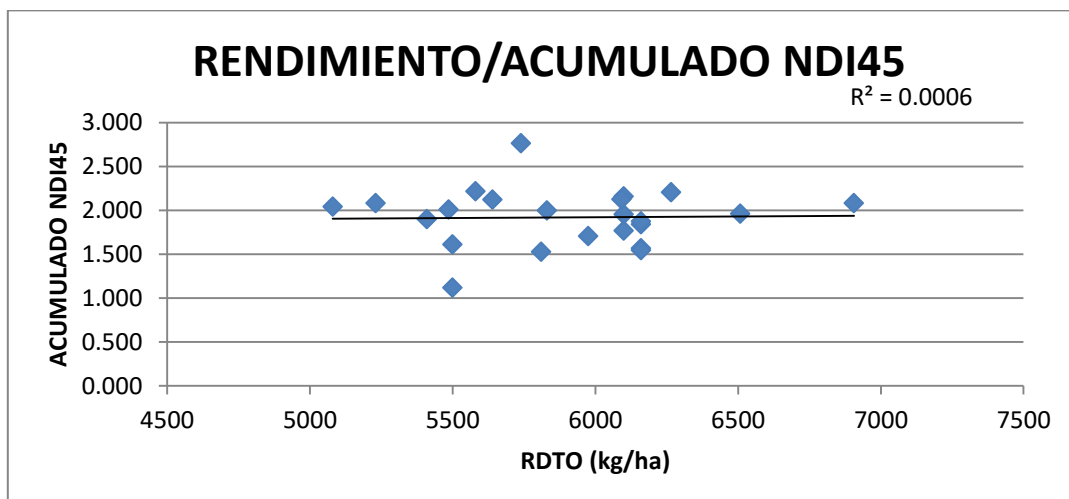


Figura 131. Representación valores acumulados NDI45-RENDIMIENTO para cebada

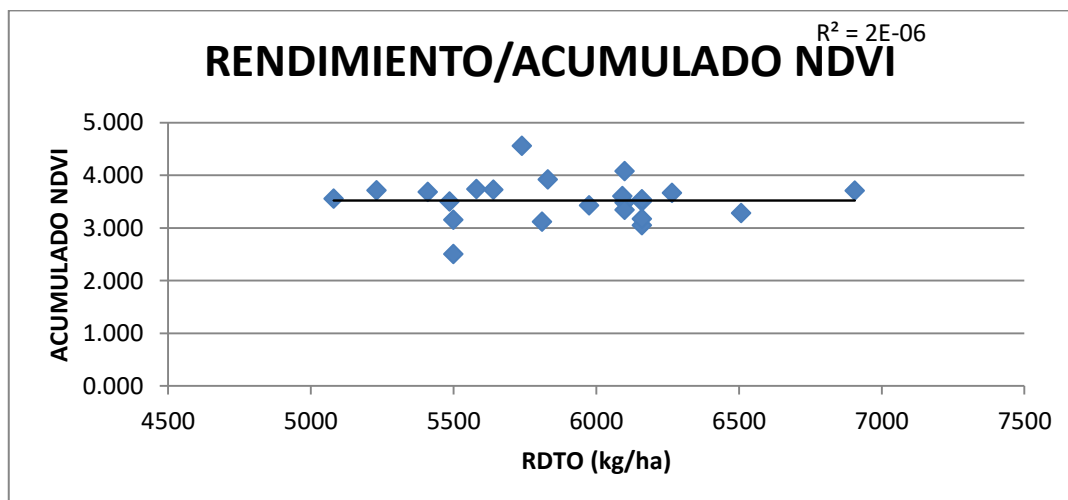


Figura 132. Representación valores acumulados NDVI-RENDIMIENTO para cebada

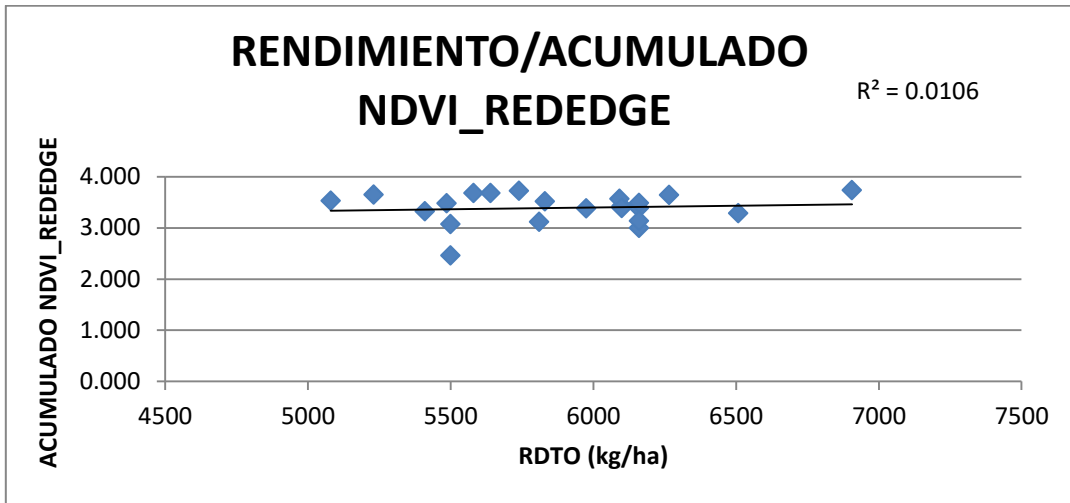


Figura 133. Representación valores acumulados NDVI_REDEGE-RENDIMIENTO para cebada

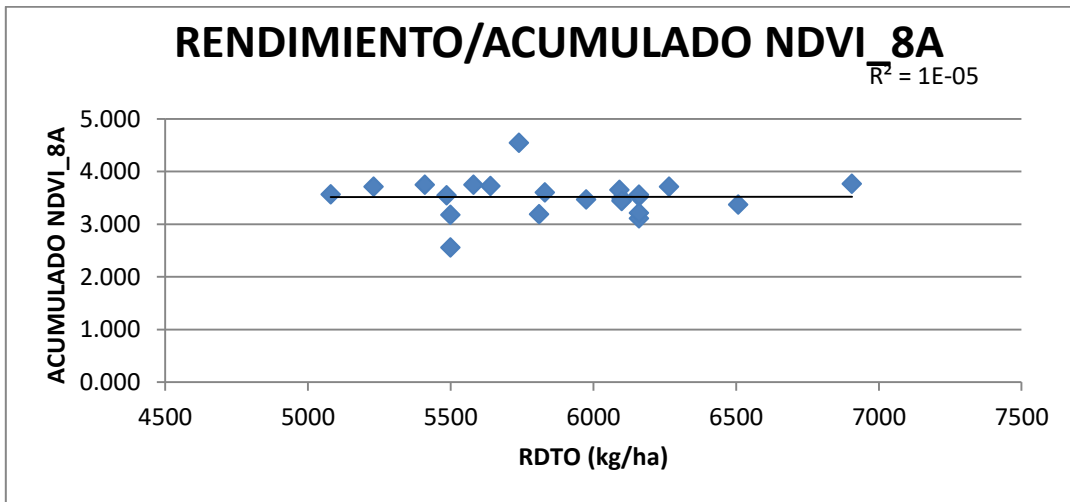


Figura 134. Representación valores acumulados NDVI_8A-RENDIMIENTO para cebada

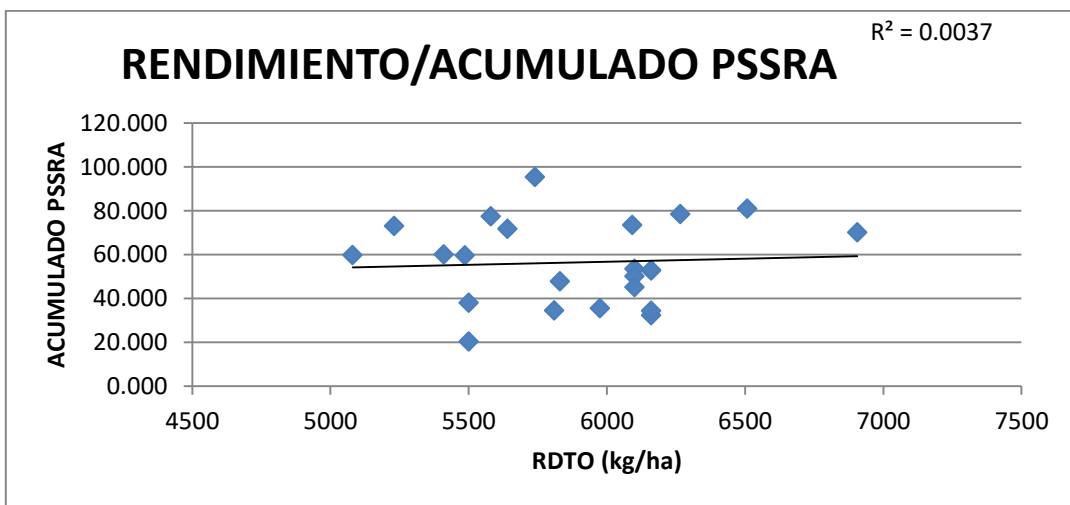


Figura 135. Representación valores acumulados PSSRA-RENDIMIENTO para cebada

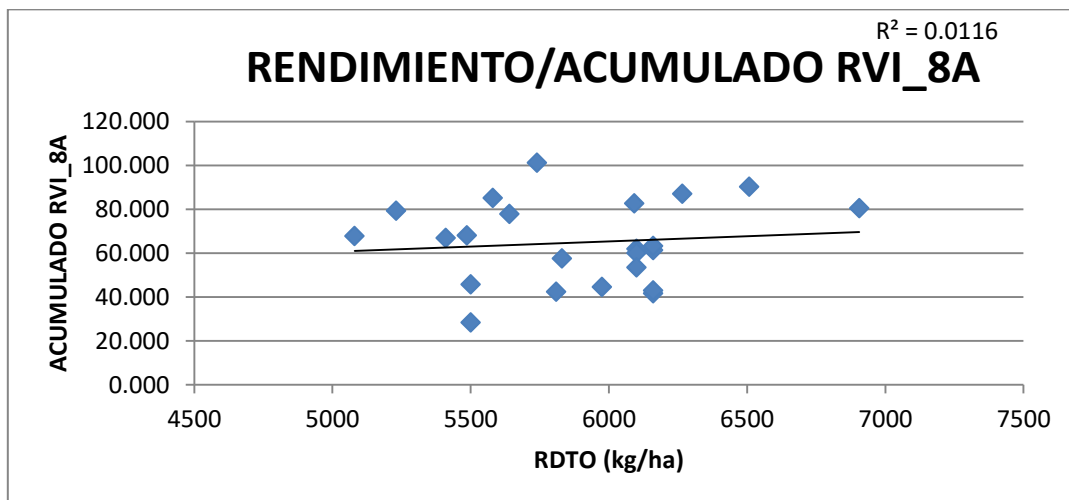


Figura 136. Representación valores acumulados RVI_8A-RENDIMIENTO para cebada

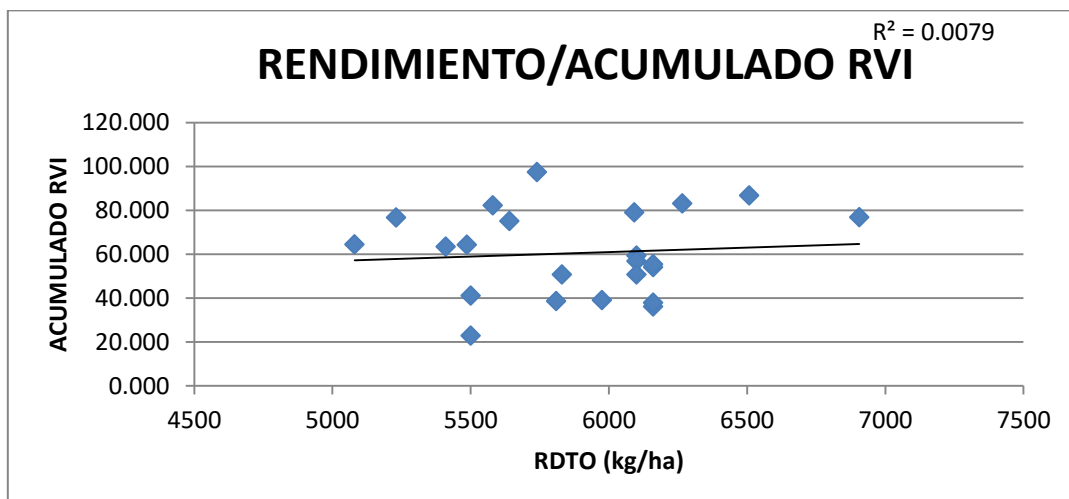


Figura 137. Representación valores acumulados RVI-RENDIMIENTO para cebada

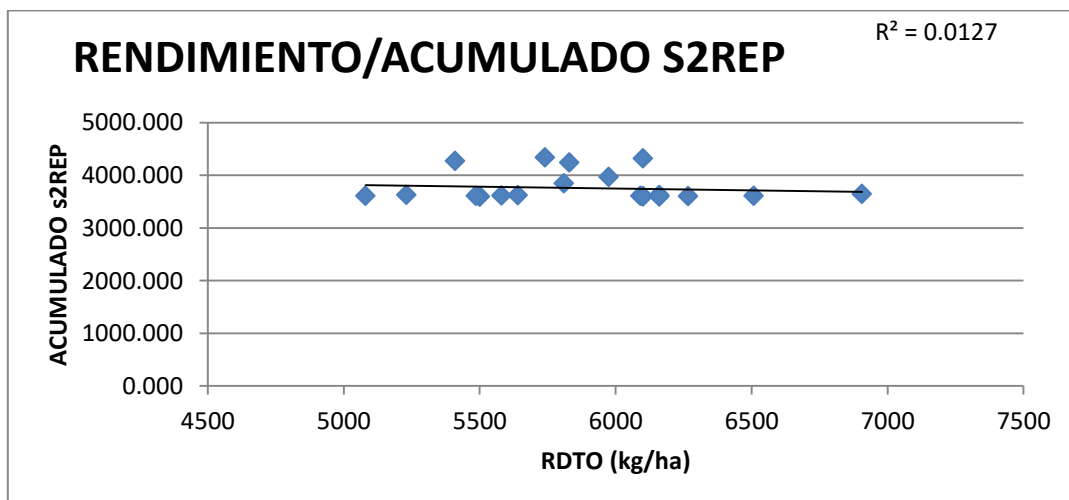


Figura 138. Representación valores acumulados S2REP-RENDIMIENTO para cebada

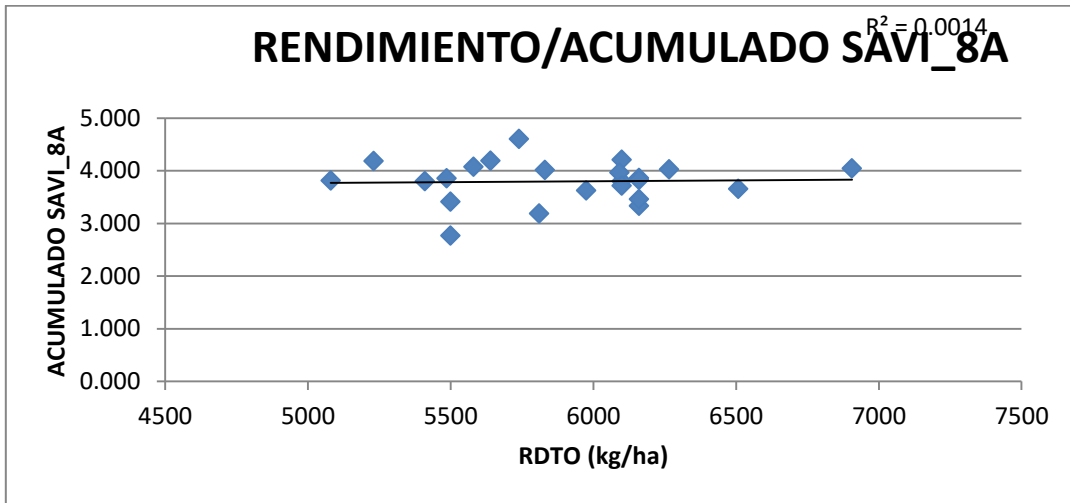


Figura 139. Representación valores acumulados SAVI_8A-RENDIMIENTO para cebada

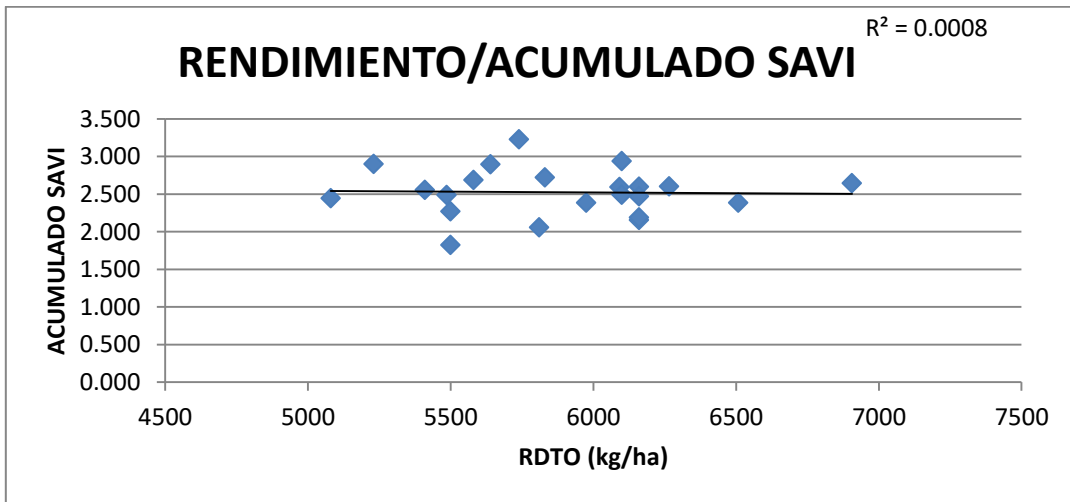


Figura 140. Representación valores acumulados SAVI-RENDIMIENTO para cebada

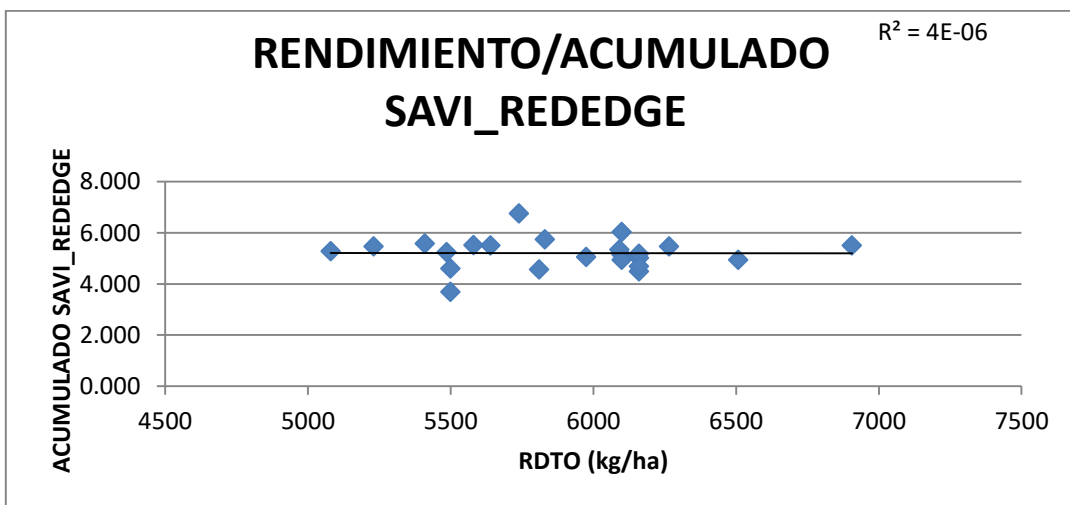


Figura 141. Representación valores acumulados SAVI_REDEGE-RENDIMIENTO para cebada

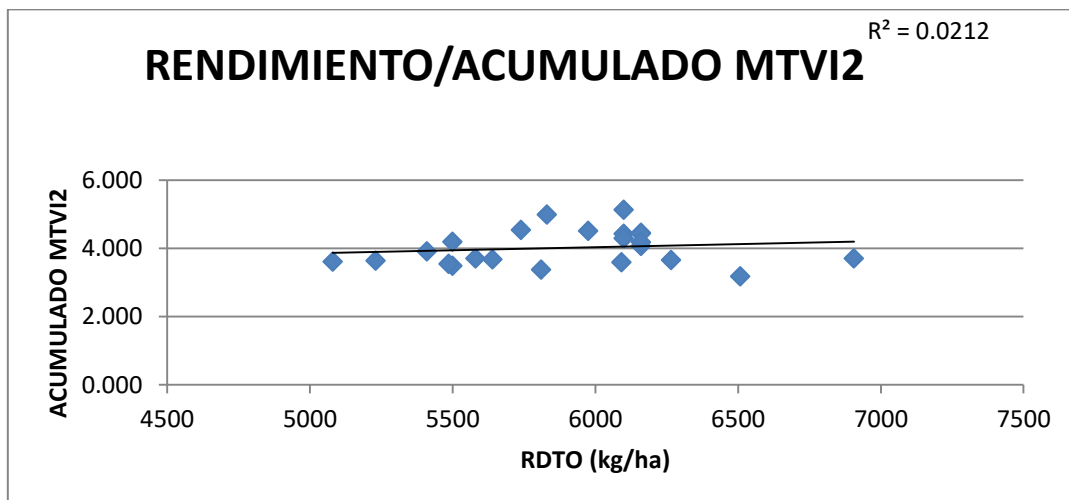


Figura 142. Representación valores acumulados MTVI2-RENDIMIENTO para cebada

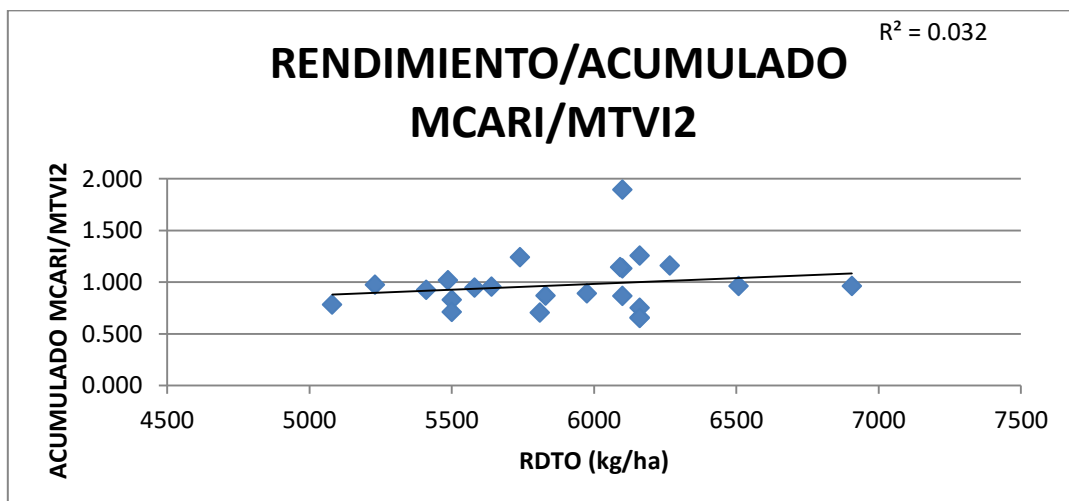


Figura 143. Representación valores acumulados MCARI/MTVI2-RENDIMIENTO para cebada