



Universidad Nacional del Nordeste



Facultad de Ciencias Agrarias

Trabajo Final de Graduación

Modalidad: Tesina

**“NDVI EN ARROZ, CORRELACIÓN ENTRE
SENSORES MANUAL Y REMOTO”**

Alumno: Karlen, Hernán Andrés

Directora: Pachecoy, María Inés

Lugar de trabajo: Estación Experimental Agropecuaria INTA
Corrientes

RESUMEN

En agricultura la estimación de los rendimientos de los cultivos es necesaria para la planificación. En los últimos años se han desarrollado una gran cantidad de técnicas con el objetivo de lograr una estimación certera y confiable con la mayor anticipación posible. En este sentido, el índice más utilizado para la estimación de rendimiento en cultivos es el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

En este trabajo se evaluaron dos sensores (manual y remoto) que generan información a diferente escala, con el objetivo de validar la información obtenida con ambos y determinar el momento más apropiado para su uso como predictor de rendimiento en arroz. Para esto se realizaron mediciones de NDVI a lo largo del ciclo del cultivo con ambos sensores, en un grupo de 25 genotipos.

Los resultados arrojaron una alta correlación entre los valores de NDVI obtenidos con ambos sensores. En cuanto al uso del NDVI como predictor de rendimiento si bien los resultados tienen carácter preliminar se encontró una fuerte correlación y significancia estadística entre rendimiento y NDVI en estadios avanzados del cultivo, pero solo para algunas de las variedades.

Además si bien no era el objetivo de este ensayo, se pudo observar que los valores de NDVI responden de manera inmediata frente a un estrés en el cultivo ya que se observó una notoria caída en el índice luego de que el riego fuera interrumpido. De igual manera mostró picos de crecimiento al momento de reanudar el riego lo que nos permitiría inferir que, para el cultivo de arroz, el NDVI es un buen indicador de estrés hídrico.

INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

El arroz (*Oryza sativa* L.) es el cultivo más sembrado en el mundo, siendo el cereal base de la alimentación del 60% de los habitantes del planeta (FAO, 2007; 2014). Dentro de los cultivos de cereales en Argentina, el arroz es la actividad económica que más puestos de trabajo genera por unidad de superficie, fundamental en el crecimiento de las economías regionales y nacionales (Kurtz y Ligier, 2008).

En el mundo se cosechan anualmente alrededor de 160 millones de hectáreas, alcanzando una producción de 700 millones de toneladas de arroz cáscara. Los principales países consumidores son China, India, Indonesia, Bangladés, con un consumo per-cápita promedio de 57 - 60 kg/persona/año, dependiendo de la regiones. Estos mismos países, son los principales productores (FAO, 2007; 2014).

En la República Argentina el consumo de arroz per-cápita es muy pequeño (7 kg/persona/ año). Solo con el 25% de la producción del país alcanza para cubrir el mercado interno, por lo que el resto se destina al comercio internacional. La producción anual es de aproximadamente 1.500.000 Tn (en 233.000 has en producción durante la campaña 2014/15). Corrientes (con el 43,5%) es la provincia que más superficie destina a la producción de arroz, seguida por Entre Ríos (31,8%), Santa Fe (18,7%), Formosa (3,5%) y Chaco (2,5%) (ACPA, 2015). Este cultivo es de gran importancia para la economía regional, y representa para la provincia de Corrientes su principal cultivo agrícola con un aporte al producto bruto provincial de U\$D 194 millones anuales aproximadamente (ACPA, 2015).

El arroz es una especie anual, de origen asiático, perteneciente a la familia de las poáceas, con sistema fotosintético C3, adaptada al ambiente acuático. Su crecimiento puede dividirse en tres importantes fases: vegetativa (germinación, estado de plántula, macollaje), reproductiva (diferenciación de primordio floral y floración) y maduración (llenado de granos y madurez fisiológica) (CIAT, 2005; Vaughan et al., 2005).

Entre los factores ambientales que más afectan al cultivo de arroz, la radiación solar es uno de los más importantes. Esta tiene influencia sobre el rendimiento del arroz ya que afecta el crecimiento de la planta y los procesos fisiológicos relacionados con la formación del grano. Su efecto varía dependiendo del estadio fenológico en los que se encuentre la planta, es decir una baja radiación solar en la etapa vegetativa del cultivo afecta ligeramente a los rendimientos y sus componentes, mientras que en la fase reproductiva tiene una marcada disminución del número de granos (Andrade, 2006).

En este sentido, son muchos los factores que afectan el rendimiento final de un cultivo. La predicción anticipada del rendimiento ha sido objeto de estudio de diferentes áreas de la ciencia, tanto con el fin de aumentar el conocimiento de las relaciones clima/cultivo como para generar información que se pueda aprovechar oportunamente en la planificación y manejo de la producción agropecuaria. Las técnicas de estimación del rendimiento se incrementaron con el desarrollo de la tecnología satelital dando lugar a una gama de posibilidades que comprenden, además de los procedimientos originales en base a modelos matemáticos de simulación de cultivos, a los que emplean información exclusivamente satelital, como así también los que integran ambas fuentes de datos (Weiss et al., 2001; Doraiswamy et al., 2003).

La información provista por sensores remotos es importante para estudios relacionados con el uso, la ocupación y la producción de la superficie del suelo. También permite la obtención de información de campo a un menor costo respecto a otros métodos, cubriendo grandes áreas y con la posibilidad de repetir y lograr la obtención de datos en forma periódica a lo largo del tiempo. (Mónica Bocco et al. 2015)

El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad de distintas longitudes de onda y pretende extraer, para un área determinada, la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo, irradiancia solar, etc. (Sobrino, 2001). Los índices de vegetación permiten detectar anomalías en el desarrollo de los cultivos y determinar las irregularidades dentro de las parcelas. El peculiar comportamiento de la vegetación relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permite determinar si la vegetación se encuentra sana o sufre algún tipo de estrés; la respuesta espectral de una planta en buen estado se caracteriza por el contraste en la banda del rojo (entre 0.6 y 0.7 μm), la cual es absorbida en gran parte por las hojas y el infrarrojo cercano (entre 0.7 y 1.1 μm), que es reflejada en su gran mayoría. Esta cualidad de la vegetación permite la realización de su valoración cuantitativa.

En los últimos años hubo un fuerte impulso a los estudios de NDVI en todos los cultivos y al análisis de su relación con las variables productivas. En agricultura de precisión, los sistemas de reflectometría son una herramienta cada vez más difundida a la hora de determinar el estado nutricional de un cultivo. Existen numerosos equipos que emplean este sistema, uno de ellos es el GreenSeekerTM (Green=verde y seek=buscar), con el cual es posible realizar una medición directa de NDVI y cuya interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutricionales (especialmente de nitrógeno) y el rendimiento potencial de los cultivos (Inman et al. 2005, Lan et al. 2009).

El NDVI es un índice normalizado de la vegetación definido como:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

Donde RED ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es la radiación roja incidente sobre la superficie vegetal, y NIR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es la radiación infrarroja cercana reflejada por ella. El GreenSeekerTM utiliza diodos que emiten la luz con base en la cual se calcula el NDVI. La luz incidente natural es separada de la producida por el instrumento electrónicamente. Una señal de voltaje permite cuantificar las fracciones de NIR y RED provenientes de los diodos y traducirla directamente en un valor de NDVI (Jones et al. 2007).

Debido a su normalización, los rangos de medición del NDVI se encuentran entre 1.0 y -1.0, siendo los valores más altos (0.7-0.8) indicadores de plantas en las mejores condiciones. Un 1 representa la densidad más alta posible de hojas verdes y saludables (Viney et al. 2005, Monteith y Unsworth. 2008). Los suelos descubiertos generan valores positivos bajos (0.1 a 0.2), y el agua libre valores que van desde -0.1 hasta 0.1 ó 0.2. Valores de -1 se registran en superficies blancas como la nieve, el hielo o las nubes, mientras que 0, indica ausencia de vegetación.

Particularmente para nuestra zona no se cuenta con valores de referencia en cuanto al uso de equipos de medición de NDVI, pudiendo citar como ejemplos encontrados en Argentina el trabajo realizado por De la Casa y Ovando (2007) sobre la medición de NDVI para el cultivo de trigo. En cuanto al cultivo de arroz el único trabajo al respecto es el realizado por Pirchi. (2013).

De lo antes mencionado y debido a la escasa información disponible para la región, surge la necesidad de evaluar la relación existente entre rendimiento y NDVI para el cultivo de arroz en la provincia de Corrientes, como así también conocer la precisión de los distintos tipos de sensores que nos permiten obtener esta información en diferente escala.

OBJETIVOS

1. Analizar la correlación entre los valores de NDVI arrojados por dos sensores, uno manual (GreenSeeker™) y un sensor remoto (cámara NIR -*Near Infrared Reflectance*)- ubicada en el dron *eBee*).
2. Correlacionar los valores de NDVI con los valores de rendimiento para determinar el momento óptimo para su medición y uso como predictor del mismo.

MATERIALES Y METODOS

Material vegetal

El trabajo se llevó a cabo en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) INTA Corrientes sobre un grupo de 25 cultivares (Figura 1), conformado por diez variedades comerciales (IRGA 417, Taim, Tranquilo FL-INTA, Gurí CL INTA, IC 107, IRGA 424, IRGA 426, IRGA 428, San Javier 1, Puita CL INTA) un híbrido comercial (Inov CL) y dos experimentales (XP113 XP114) y doce líneas experimentales. La densidad de siembra fue de 90 kg/ha para las variedades y 50 kg/ha para los híbridos. Todos estos cultivares son de ciclo intermedio, es decir que la maduración del cultivo se da 120-125 días después de la emergencia (DDE).

La siembra se realizó en parcelas de seis surcos y 5m de largo, en un diseño en bloques completos al azar con cuatro repeticiones.

Para cada uno de los cultivares se tomaron datos de floración, rendimiento en grano, rendimiento industrial, porcentaje de grano entero y partido, altura de plantas y NDVI.



Figura 1. Ensayo de cultivares de arroz en la EEA INTA Corrientes.

Sensores

GreenSeeker™: Este es un sensor manual que utiliza diodos emisores de luz (luz LED) para emitir su propia luz roja e infrarroja. La luz roja ($0.6 - 0.7 \mu\text{m}$) emitida por el sensor es dirigida hacia la superficie de las plantas (Figuras 2 y 3). Conforme el sensor pasa sobre la superficie del cultivo, mide tanto la radiación incidente como la reflejada por el dosel, y calcula el NDVI como un cociente de luz roja ($0.6 - 0.7 \mu\text{m}$)/luz infrarroja cercana ($0.7 - 1,1 \mu\text{m}$). La luz emitida por fuentes naturales es separada de la emitida por el sensor (*Gutiérrez-Soto. 2011*).

El NDVI está basado en las propiedades de los tejidos vegetales verdes de reflejar la radiación solar incidente de manera diferencial en la banda espectral correspondiente al rojo del espectro visible "VIS" ($0.6 - 0.7 \mu\text{m}$) y la correspondiente al infrarrojo cercano "NIR" ($0.7 - 1,1 \mu\text{m}$). La presencia de clorofila en el tejido vegetal provoca una alta reflexión en el infrarrojo cercano y una baja reflexión en el rojo. Así es de esperar que el NDVI alcance valores mínimos en suelo desnudo y máximos cuando el dosel se acerque a cobertura total (*Teal. 2006*).

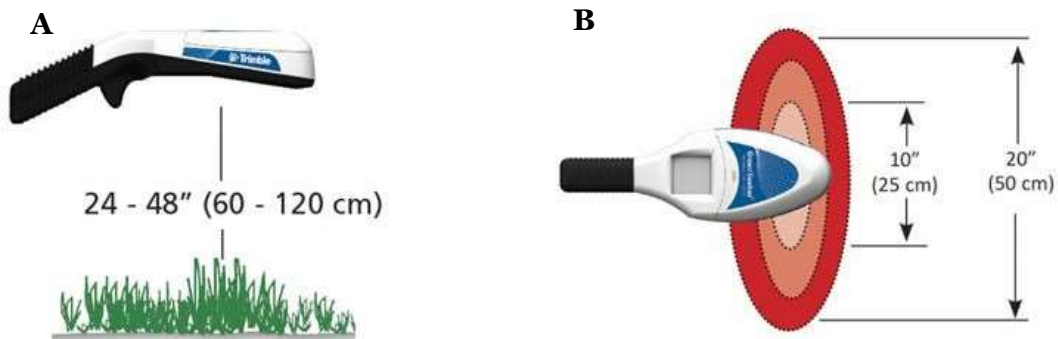


Figura 2. Sensor manual GreenSeeker™, relación altura de uso (A) y área de cobertura del sensor (B).



Figura 3. Sensor manual GreenSeeker sobre el cultivo.

Dron eBee: El dron *eBee* (Figura 4) utilizado posee una Cámara RGB de 18.2 mega píxeles (Figura 5) y una cámara Cannon s110 NIR de 12 mega píxeles (Figura 6) controlada mediante el piloto automático. Esta última cámara adquiere datos de imagen en la banda del infrarrojo cercano (NIR), que es la región donde se produce una elevada reflexión de la planta.

El dron utilizado es propiedad del Ministerio de Producción de la Provincia de Corrientes y los datos obtenidos fueron provistos por la misma institución. Para la obtención de los valores de NDVI para cada cultivar, se delimitaron las parcelas en

estudio con la ayuda de un software específico para esta tarea. De esta manera los datos de NDVI correspondieron al cultivo en estudio y no a malezas o agua (Figura 7). Con la información obtenida se elaboró una base de datos de cada parcela.



Figura 4. Dron *eBee* propiedad del Ministerio de Producción de la Provincia de Corrientes.



Figura 5. Fotografía aérea del ensayo obtenida con la Cámara RGV de 18.2 mega píxeles ubicada en el dron *eBee*.

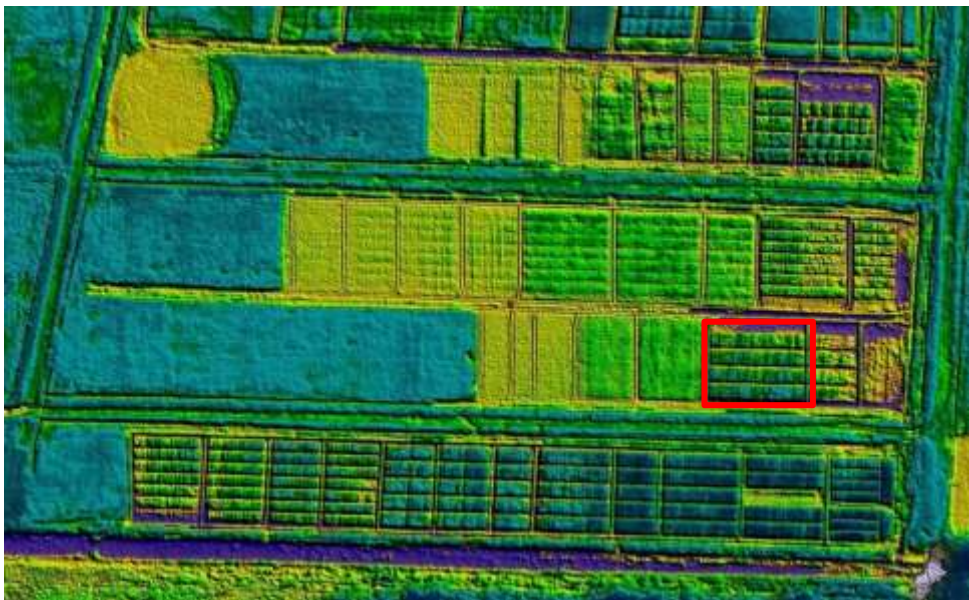


Figura 6. Fotografía aérea obtenida con la cámara NIR ubicada en el dron *eBee*. El recuadro rojo muestra el ensayo donde se realizaron las mediciones.

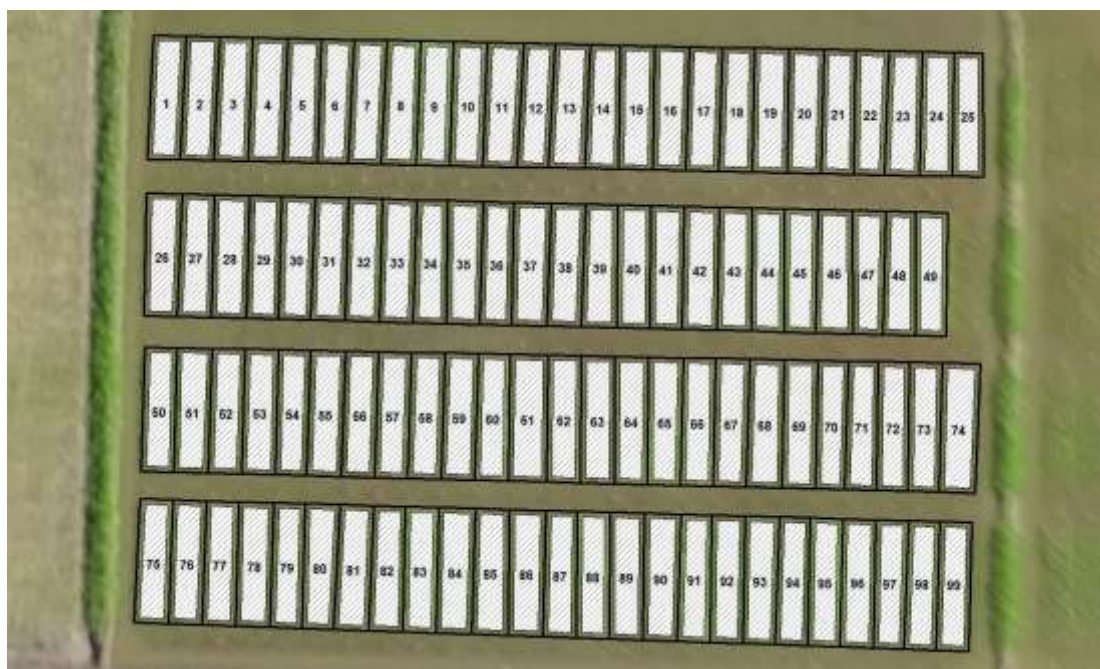


Figura 7. Delimitación de parcelas del ensayo en evaluación mediante la uso de un software específico empleado por el Ministerio de Producción de la Provincia de Corrientes.

Análisis estadístico

Para el análisis de los cultivares se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) y un test de Duncan para la comparación de medias.

Para la evaluación de los datos obtenidos a partir de los sensores se realizó un análisis de correlación, a partir del cálculo de los coeficientes de correlación y sus probabilidades (p valor).

Para todos los análisis se utilizó el software estadístico Infostat®.

RESULTADOS Y DISCUSION

Resultados generales del ensayo

Se evaluaron los 25 materiales genéticos de arroz de ciclo intermedio. Durante la campaña en estudio hubo importantes problemas de riego que afectaron al cultivo, lo que se refleja en los valores de rendimiento y porcentaje de grano entero (Tabla 1).

En el Gráfico 1 se pueden ver los rendimientos promedio del ensayo. La media del ensayo fue de 7206 Kg/Ha. Puede observarse que algunos materiales tuvieron rendimientos muy superiores a la media mientras otros estuvieron muy por debajo.

Tabla 1. Comportamiento de 25 cultivares de arroz de ciclo intermedio evaluados en la EEA Corrientes durante la campaña 2015/16. Análisis por columna.

Factores de Variación	Rendimiento Kg/Ha	Floración días	Altura cm	Grano Entero %
Cultivares				
XP113	8944 A	91 DEF	90	41
cr 1044 13-14	8668 A	96 BC	93	52
cr 1043 13-14	8283 AB	96 B	96	54
Rocio 1	8248 AB	97 B	93	48
XP114	8215 AB	90 DEF	85	33
FL06372-M-2-13A-1P-MA-14A	7704 BC	95 BCD	95	43
cr 1013 13-14	7642 BC	104 A	86	43
Guri	7618 BC	88 FG	100	55
IRGA 424	7608 BC	97 B	92	43
Taim	7599 BC	94 BCDE	96	47
cr 1048 13-14	7088 CD	94 BCDE	90	48
Tranquilo FL-INTA	7086 CD	98 B	96	47
FL06372-M-2-13A-1P-MA	7060 CD	90 EF	98	42
cr 3013 13-14	6908 CD	103 A	92	47
Inov CL	6877 CDE	85 G	95	41
FL07627-2PT-2P-1A-M-MA	6806 CDE	92 CDEF	93	42
Puita INTA	6754 CDE	85 G	90	53
IRGA 417	6704 CDE	85 G	92	56
San Javier 1	6700 CDE	88 FG	94	50
IRGA 428	6564 DE	94 BCDE	89	46
cr 1056 13-14	6473 DE	104 A	96	44
cr 2259 13-14	6311 DE	88 FG	99	37
IRGA 426	6251 DE	91 DEF	94	50
cr 3519 13-14	6188 DE	84 G	95	56
IC 107	5855 E	90 EF	96	46
Respuesta³	***	***	NO	NO
C.V. (%)	8,52	3,14	NO	NO

1: Valores promedio de dos repeticiones por sitio.

2: Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Test de Duncan, $p \leq 0,05$).

3: ***: significativo $<0,0001$; NS: No Significativo; NO: Dato de referencia, sin análisis estadístico.

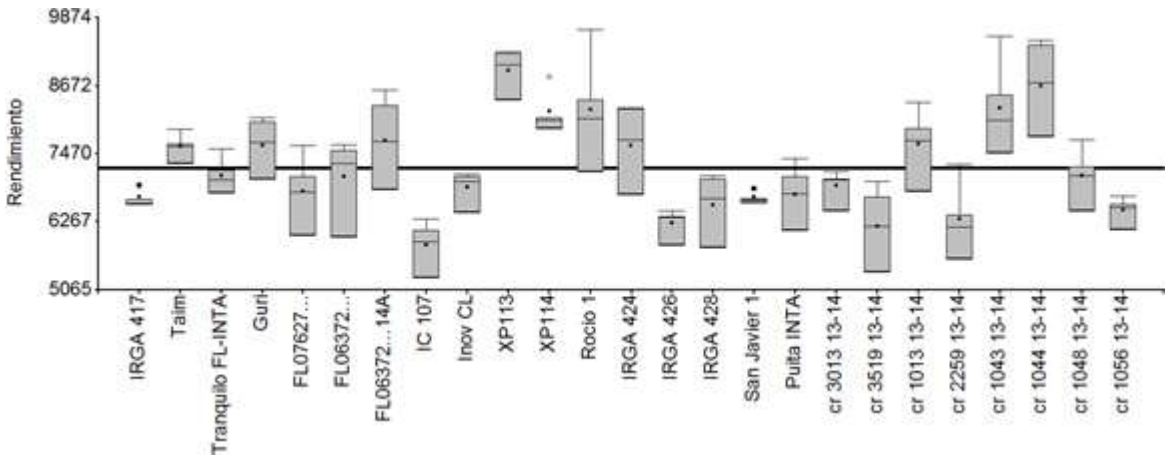


Gráfico 1. Rendimiento promedio de los 25 genotipos de ciclo intermedio evaluados en Corrientes. La línea de corte que atraviesa el gráfico representa el rendimiento promedio en del ensayo.

Resultados sensores

GreenSeeker™

Buscando lograr una representación lo más real posible de la evolución del NDVI en el cultivo se tomaron datos con un periodo no mayor a 15 días entre cada toma de datos, logrando un total de 13 mediciones en el ciclo del cultivo. Para el análisis de los datos se utilizó el promedio de las 4 repeticiones de cada cultivar (Tabla 2). Las mediciones se expresaron en días después de la emergencia (DDE).

Los valores más bajos se dieron en las primeras mediciones, debido a la poca densidad de follaje y luego en madurez debido a la senescencia del mismo. En el Gráfico 2 se observa la evolución del NDVI para los 25 cultivares estudiados. Puede verse que los valores máximos de NDVI, aparecen desde 81 DDE a 101 DDE. El cultivar que presentó los valores más altos de NDVI fue la variedad San Javier. Esto probablemente es debido a que esta variedad posee una disposición particular y diferente a los demás materiales evaluados con la hoja bandera a 90° lo cual produce una mayor cobertura, mientras que los valores más bajos se observaron en la variedad Guri INTA CL.

Tabla 2. Promedio de NDVI obtenidos con el sensor GreenSeeker™ para los 25 cultivares estudiados. En amarillo se señalan las variedades, en verde las líneas experimentales y en azul los híbridos. En las columnas se pueden ver los valores promedio de NDVI de las 4 repeticiones por cultivar, para cada fecha de medición (expresadas en Días Después de Emergencia - DDE -).

Cultivar	35 DDE	38 DDE	52 DDE	61 DDE	69 DDE	76 DDE	81 DDE	87 DDE	95 DDE	101 DDE	109 DDE	117 DDE	124 DDE
IRGA 417	0,42	0,55	0,70	0,67	0,61	0,62	0,62	0,69	0,69	0,62	0,52	0,44	0,41
Taim	0,36	0,49	0,68	0,68	0,62	0,63	0,66	0,69	0,70	0,69	0,61	0,47	0,42
Tranquilo FL-INTA	0,40	0,48	0,66	0,65	0,60	0,61	0,62	0,65	0,67	0,66	0,65	0,57	0,54
Guri	0,32	0,44	0,70	0,67	0,61	0,62	0,65	0,70	0,71	0,66	0,55	0,43	0,38
FL07627-2PT-2P-1A-M-MA	0,41	0,48	0,69	0,66	0,62	0,59	0,62	0,68	0,71	0,66	0,57	0,48	0,45
FL06372-M-2-13A-1P-MA	0,36	0,54	0,73	0,71	0,65	0,65	0,67	0,72	0,70	0,66	0,57	0,54	0,48
FL06372-M-2-13A-1P-MA-14A	0,36	0,54	0,72	0,70	0,64	0,65	0,68	0,72	0,71	0,66	0,61	0,51	0,45
IC 107	0,45	0,56	0,73	0,69	0,64	0,63	0,68	0,69	0,69	0,64	0,55	0,46	0,44
Inov CL	0,55	0,69	0,74	0,70	0,65	0,64	0,69	0,72	0,70	0,64	0,54	0,53	0,48
XP113	0,42	0,51	0,70	0,71	0,68	0,67	0,70	0,72	0,69	0,65	0,58	0,51	0,49
XP114	0,37	0,53	0,71	0,71	0,68	0,68	0,70	0,72	0,70	0,65	0,56	0,55	0,52
Rocio 1	0,38	0,52	0,68	0,69	0,64	0,64	0,68	0,71	0,71	0,71	0,67	0,49	0,44
IRGA 424	0,34	0,49	0,70	0,69	0,64	0,64	0,66	0,71	0,70	0,69	0,63	0,48	0,44
IRGA 426	0,41	0,49	0,71	0,68	0,62	0,62	0,66	0,69	0,71	0,67	0,58	0,47	0,42
IRGA 428	0,30	0,46	0,72	0,70	0,65	0,67	0,67	0,70	0,70	0,67	0,57	0,45	0,42
San Javier 1	0,38	0,50	0,68	0,70	0,67	0,68	0,75	0,79	0,75	0,72	0,59	0,46	0,42
Puita INTA	0,55	0,65	0,73	0,68	0,61	0,60	0,64	0,70	0,71	0,62	0,52	0,49	0,46
α 3013 13-14	0,42	0,60	0,70	0,66	0,60	0,57	0,60	0,66	0,66	0,65	0,63	0,44	0,41
α 3519 13-14	0,47	0,64	0,70	0,67	0,61	0,66	0,69	0,71	0,69	0,62	0,54	0,51	0,46
α 1013 13-14	0,33	0,49	0,67	0,66	0,62	0,63	0,66	0,69	0,69	0,69	0,68	0,43	0,39
α 2259 13-14	0,58	0,67	0,71	0,66	0,59	0,60	0,60	0,68	0,68	0,63	0,56	0,54	0,49
α 1043 13-14	0,44	0,58	0,73	0,69	0,64	0,64	0,66	0,70	0,70	0,67	0,64	0,44	0,43
α 1044 13-14	0,42	0,52	0,69	0,68	0,62	0,61	0,64	0,70	0,68	0,66	0,65	0,60	0,57
α 1048 13-14	0,50	0,65	0,73	0,70	0,62	0,63	0,66	0,70	0,69	0,66	0,62	0,46	0,42
α 1056 13-14	0,42	0,58	0,64	0,65	0,59	0,58	0,63	0,67	0,70	0,69	0,65	0,51	0,46

En los Gráficos 2 y 3 muestra la evolución en el tiempo de los valores de NDVI obtenidos. Los genotipos evaluados tuvieron un comportamiento acorde a lo esperado de acuerdo con la bibliografía consultada. Los valores máximos de NDVI se presentaron próximos a floración (aproximadamente 90 Días desde emergencia). Puede verse que en torno a los 70 días se produjo una caída en los valores. Esto se debió que en ese período se interrumpió el riego del ensayo, provocando un amarillamiento generalizado en los materiales y el consecuente descenso en los valores de NDVI.

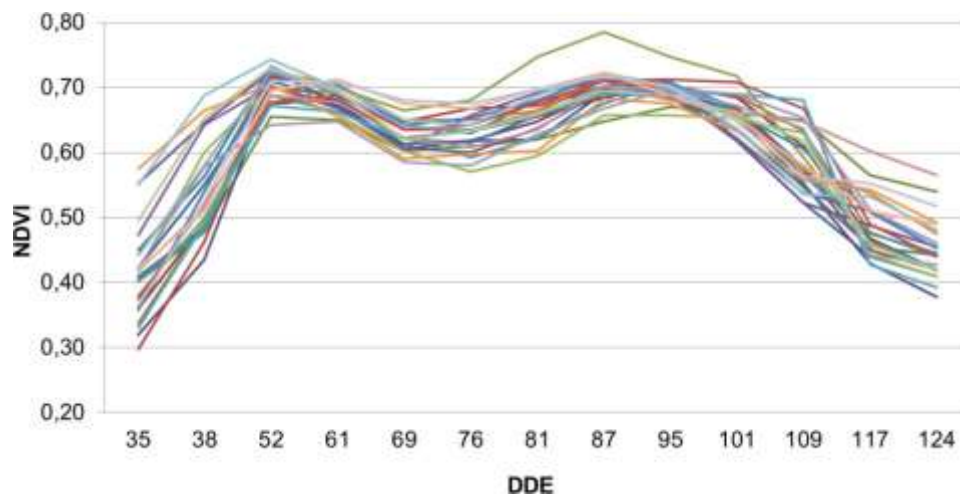


Grafico 2. Evolución de los valores de NDVI obtenidos con el sensor GreenSeeker™ en función del tiempo (Días Después de Emergencia - DDE-) para los 25 cultivares evaluados.

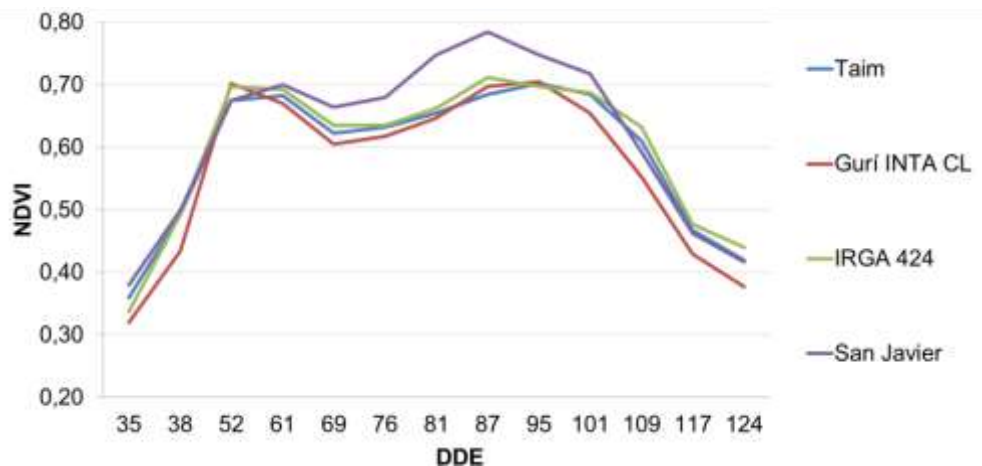


Grafico 3. Evolución de los valores de NDVI obtenidos con el sensor GreenSeeker™ en función del tiempo (Días Después de Emergencia - DDE-) para 4 cultivares evaluados.

Dron eBee

Durante el ciclo del cultivo se realizaron 4 vuelos, obteniéndose los valores que se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Promedio de los valores de NDVI medidos a partir de la cámara NIR ubicada en dron para las 100 parcelas.

Cultivar	35 DDE	50 DDE	70 DDE	125 DDE
IRGA 417	0,46	0,65	0,63	0,43
Taim	0,47	0,68	0,66	0,49
Tranquilo FL-INTA	0,44	0,65	0,61	0,56
Guri	0,45	0,68	0,65	0,44
FL07627-2PT-2P-1A-M-MA	0,47	0,67	0,65	0,47
FL06372-M-2-13A-1P-MA	0,47	0,69	0,65	0,49
FL06372-M-2-13A-1P-MA-14A	0,48	0,69	0,65	0,49
IC 107	0,50	0,67	0,62	0,47
Inov CL	0,58	0,71	0,68	0,46
XP113	0,48	0,69	0,69	0,49
XP114	0,50	0,70	0,68	0,50
Rocio 1	0,45	0,67	0,67	0,53
IRGA 424	0,45	0,67	0,65	0,50
IRGA 426	0,43	0,66	0,64	0,47
IRGA 428	0,44	0,68	0,67	0,48
San Javier 1	0,50	0,67	0,66	0,47
Puita INTA	0,53	0,66	0,61	0,46
cr 3013 13-14	0,53	0,66	0,60	0,54
cr 3519 13-14	0,54	0,68	0,63	0,47
cr 1013 13-14	0,52	0,69	0,64	0,59
cr 2259 13-14	0,55	0,67	0,61	0,50
cr 1043 13-14	0,52	0,67	0,61	0,53
cr 1044 13-14	0,49	0,65	0,61	0,55
cr 1048 13-14	0,54	0,67	0,61	0,56
cr 1056 13-14	0,52	0,65	0,61	0,54

Los valores comienzan siendo bajos debido a los motivos previamente mencionados para el GreenSeeker™ para luego tener picos máximos cerca de floración. Los valores más altos se registraron en el tercer vuelo (70 DDE).

Estos valores fueron obtenidos a partir de la cámara Cannon s110 NIR de 12 mega pixeles de resolución y un tamaño de pixel de 12cm x 12cm para la altura de vuelo utilizada en las mediciones (Figura 8). Cada pixel se traduce en un valor de NDVI. Para obtener valores representativos de cada genotipo evaluado, mediante el uso de software específico que viene incluido con el dron, se señalaron los límites de las parcelas evitando usar las borduras. Eliminadas las borduras cada parcela quedó cubierta por aproximadamente 200 puntos (pixeles), con los que se calculó un valor promedio de NDVI (Figura 9).

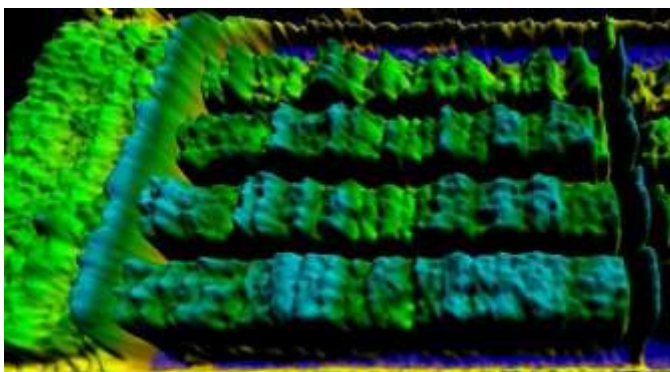


Figura 8. Modelación 3D de los valores NDVI a los 50 DDE para los 25 cultivos evaluados en la EEA INTA Corrientes.

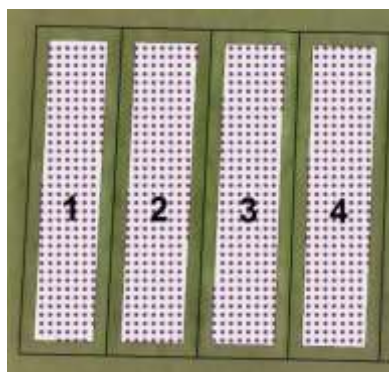


Figura 9. Delimitación de parcelas para obtención de los valores de NDVI.

Correlación entre sensor manual y remoto

Para analizar el comportamiento de los sensores manual (GreenSeeker™) y remoto (dron *ebee*) se analizaron en conjunto los valores de NDVI obtenidos en fechas próximas entre ambos equipos. Como se mencionó en el análisis de los resultados obtenidos con el sensor manual, la toma de datos se realizó con una diferencia no mayor a 15 días entre mediciones llegando a obtenerse un total de 13 mediciones al finalizar el estudio, mientras que con el dron solo fue posible realizar 4 mediciones a lo largo del ciclo. La tecnología del dron, si bien es de gran utilidad para la toma de datos en grandes superficies, también tiene puntos débiles y restricciones. La baja frecuencia de las observaciones (cuatro) se debió en gran parte a que para el funcionamiento del dron se requieren condiciones atmosféricas específicas (baja nubosidad y vientos lentos a la hora del mediodía, la cual es la mejor para la toma de datos) lo que representa una restricción operacional importante. De aquí surge la necesidad de conocer la correlación entre ambos instrumentos, ya que el sensor manual no presenta estas limitaciones. Una buena correlación entre ambos equipos permitiría inferir el mejor momento para realizar mediciones con el dron a partir de resultados obtenidos con el sensor manual.

Utilizando el paquete estadístico InfoGen (2016), se graficaron los datos obtenidos con ambos equipos, GreenSeeker™ y Dron, para las 4 fechas en que se tomaron datos con ambos equipos (Gráfico 4). Se puede observar una tendencia similar en las curvas obtenidas con los dos sensores.

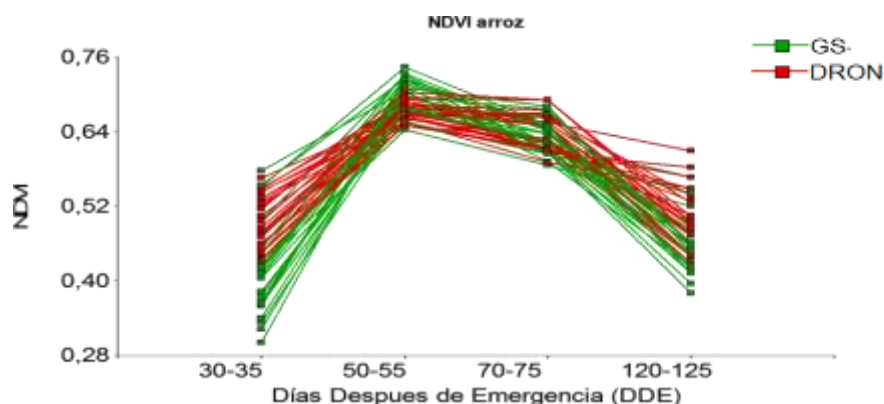


Gráfico 4. Valores de NDVI obtenidos en el grupo de 25 genotipos de arroz evaluados con los sensores manual (GreenSeeker™ -GS-) y remoto (Dron).

Posteriormente se realizó un análisis de correlación con estos datos usando el mismo software estadístico, observándose una fuerte correlación positiva y significativa entre ambos para las 4 fechas (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson y sus probabilidades calculados entre valores de NDVI obtenidos con el GreenSeeker™ y la cámara NIR del dron *eBee* para las 4 fechas de evaluación

Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades .

35 DDE GreenSeeker			35 DDE Dron		
35 DDE GreenSeeker		1,00	35 DDE Dron		0,00
35 DDE Dron		0,71	35 DDE Dron		1,00
52 DDE GreenSeeker			50 DDE Dron		
52 DDE GreenSeeker		1,00	50 DDE Dron		6,9E-10
50 DDE Dron		0,57	50 DDE Dron		1,00
69 DDE GreenSeeker			70 DDE Dron		
69 DDE GreenSeeker		1,00	70 DDE Dron		0,00
70 DDE Dron		0,80	70 DDE Dron		1,00
124 DDE GreenSeeker			125 DDE Dron		
124 DDE GreenSeeker		1,00	125 DDE Dron		0,00
125 DDE Dron		0,90	125 DDE Dron		1,00

Si bien es necesario de confirmar los resultados obtenidos con al menos otro año de evaluación, del análisis los datos de este ensayo, se puede inferir que el índice NDVI calculado a partir de fotografía aérea multiespectral (cámara NIR del dron *eBee*) otorga información similar a la que se obtiene con sensores manuales como el GreenSeeker™.

Correlación entre NDVI y rendimiento

Para este análisis se utilizaron los datos de NDVI obtenidos con el GreenSeeker™ ya que con este sensor se logró información más detallada en cuanto a la evolución de esta variable a lo largo del ciclo del cultivo.

Con la información obtenida, se realizó un análisis de correlación con todos los datos del ensayo (las cuatro repeticiones por genotipo), tanto de rendimiento como de NDVI. En la tabla 5, se presentan los resultados obtenidos. Se observan correlaciones significativas a los 61, 69, 76, 87, 101, 109, 117y 124 DDE, con valores de correlación positivos aunque algo bajos.

Tabla 5. Análisis de correlación entre rendimiento y NDVI para todo el ensayo.

Gral todo el ensayo	Rendimiento	35 dde	38 dde	52 dde	61 dde	69 dde	76 dde	81 dde	87 dde	95 dde	101 dde	109 dde	117 dde	124 dde
Rendimiento	1	0,11	0,19	0,8	0,01	0,02	0,03	0,1	0,05	0,46	0	0	0	0,05
35 dde	-0,16	1	0	0	0,35	0,59	0,66	0,53	0,74	0,83	0	0	0,16	0,4
38 dde	-0,13	0,77	1	0	0,09	0,28	0,25	0,25	0,26	0,81	0,01	0,07	0,43	0,67
52 dde	-0,03	0,4	0,44	1	0	0	0	0	0	0,07	0,08	0	0,03	0,08
61 dde	0,25	0,09	0,17	0,69	1	0	0	0	0	0	0,02	0,97	0,91	1
69 dde	0,24	0,05	0,11	0,55	0,84	1	0	0	0	0	0,01	0,93	0,85	0,53
76 dde	0,22	-0,05	0,12	0,43	0,73	0,79	1	0	0	0	0,02	0,68	0,71	0,94
81 dde	0,17	-0,06	0,12	0,29	0,57	0,64	0,72	1	0	0	0,02	0,87	0,98	0,91
87 dde	0,2	0,03	0,11	0,37	0,67	0,68	0,73	0,66	1	0	0	0,43	0,61	0,42
95 dde	0,08	-0,02	0,02	0,18	0,4	0,41	0,41	0,46	0,53	1	0	0,86	0,9	0,51
101 dde	0,28	-0,29	-0,26	-0,17	0,23	0,27	0,23	0,24	0,3	0,45	1	0	0	0
109 dde	0,4	-0,29	-0,18	-0,28	0	0,01	-0,04	-0,02	-0,08	0,02	0,71	1	0	0
117 dde	0,3	-0,14	-0,08	-0,21	-0,01	0,02	-0,04	0	-0,05	-0,01	0,61	0,86	1	0
124 dde	0,2	-0,08	-0,04	-0,18	0	0,06	-0,01	-0,01	-0,08	-0,07	0,53	0,78	0,92	1

Debido a que se observó gran variabilidad en los valores de NDVI obtenidos para los diferentes cultivares evaluados se decidió realizar un análisis de correlación para algunos de los genotipos, con el objetivo de determinar si las diferencias en estructura de planta observadas así como los distintos comportamientos en cuanto a los valores de NDVI obtenidos, tenían algún efecto sobre la correlación.

El criterio definido para la elección de los genotipos a los cuales se les realizó el análisis de correlación fue:

- Las variedades más sembradas en la provincia: IRGA 424, Taim, Gurí.
- La variedad San Javier que presentó los valores más altos y la variedad que tuvo valores más bajos (Gurí INTA CL)

Al realizar el análisis por variedad encontramos valores altos de correlación para algunas variedades (IRGA 424 y Gurí) y para otras no se encontró correlación alguna (Taim) lo cual indica que dependiendo de la variedad se puede o no usar el NDVI como predictor de rendimiento.

Cabe destacar que el momento en el cual la correlación es más intensa, varía según la variedad siendo para IRGA 424 y Gurí posterior a los 101 DDE mientras que para variedades como San Javier la correlación es negativa, esto es explicado debido a que presentó los valores más altos de NDVI durante el ciclo pero uno de los rendimientos más bajos.

En las Tablas 6, 7, 8 y 9 se presentan los resultados por variedad.

Tabla 6. Análisis de correlación entre rendimiento y NDVI para la variedad IRGA 424.

IRGA 424	Rendimiento	35 dde	38 dde	52 dde	61 dde	69 dde	76 dde	81 dde	87 dde	95 dde	101 dde	109 dde	117 dde	124 dde
Rendimiento	1	0,02	0,46	0,47	0,38	0,42	0,78	0,44	1	0,73	0,19	0,04	0,04	0,32
35 dde	-0,98	1	0,6	0,45	0,29	0,37	0,82	0,48	0,94	0,67	0,2	0,11	0,07	0,39
38 dde	-0,54	0,4	1	0,39	0,75	0,52	0,29	0,99	0,3	0,45	0,85	0,29	0,58	0,79
52 dde	-0,53	0,55	0,61	1	0,12	0,02	0,11	0,6	0,26	0,45	0,95	0,53	0,72	0,75
61 dde	-0,62	0,71	0,25	0,88	1	0,04	0,41	0,81	0,65	0,86	0,82	0,56	0,59	0,88
69 dde	-0,58	0,63	0,48	0,98	0,96	1	0,21	0,67	0,4	0,61	0,96	0,53	0,66	0,79
76 dde	-0,22	0,18	0,71	0,89	0,59	0,79	1	0,36	0,04	0,14	0,62	0,74	0,96	0,53
81 dde	0,56	-0,52	0,01	0,4	0,19	0,33	0,64	1	0,28	0,18	0,07	0,43	0,23	0,02
87 dde	0	-0,06	0,7	0,74	0,35	0,6	0,96	0,72	1	0,04	0,45	0,9	0,76	0,45
95 dde	0,27	-0,33	0,55	0,55	0,14	0,39	0,86	0,82	0,96	1	0,26	0,85	0,52	0,31
101 dde	0,81	-0,8	-0,15	0,05	-0,18	-0,04	0,38	0,93	0,55	0,74	1	0,22	0,06	0,05
109 dde	0,96	-0,89	-0,71	-0,47	-0,44	-0,47	-0,26	0,57	-0,1	0,15	0,78	1	0,07	0,28
117 dde	0,96	-0,93	-0,42	-0,28	-0,41	-0,34	0,04	0,77	0,24	0,48	0,94	0,93	1	0,15
124 dde	0,68	-0,61	-0,21	0,25	0,12	0,21	0,47	0,98	0,55	0,69	0,95	0,72	0,85	1

Tabla 7. Análisis de correlación entre rendimiento y NDVI para la variedad TAIM.

TAIM	Rendimiento	35 dde	38 dde	52 dde	61 dde	69 dde	76 dde	81 dde	87 dde	95 dde	101 dde	109 dde	117 dde	124 dde
Rendimiento	1	0,34	0,94	0,61	0,63	0,82	0,51	0,67	0,2	0,75	0,84	0,87	0,79	0,7
35 dde	0,66	1	0,36	0,06	0,35	0,19	0,78	0,08	0,04	0,8	0,89	0,84	0,98	0,73
38 dde	-0,06	0,64	1	0,26	0,2	0,33	0,52	0,18	0,45	0,62	0,32	0,67	0,8	0,73
52 dde	0,39	0,94	0,74	1	0,46	0,05	0,46	0,01	0,19	0,72	0,93	0,72	0,75	0,45
61 dde	0,37	0,65	0,8	0,54	1	0,7	0,86	0,39	0,27	0,39	0,19	0,36	0,32	0,69
69 dde	0,18	0,81	0,67	0,95	0,3	1	0,25	0,06	0,39	0,56	0,9	0,53	0,5	0,22
76 dde	-0,49	0,22	0,48	0,54	-0,14	0,75	1	0,46	0,95	0,62	0,84	0,52	0,29	0,05
81 dde	0,33	0,92	0,82	0,99	0,61	0,94	0,54	1	0,2	0,83	0,82	0,82	0,83	0,48
87 dde	0,8	0,96	0,55	0,81	0,73	0,61	-0,05	0,8	1	0,93	0,81	1	0,8	1
95 dde	-0,25	-0,2	0,38	-0,28	0,61	-0,44	-0,38	-0,17	-0,07	1	0,06	0,01	0,12	0,35
101 dde	-0,16	0,11	0,68	0,07	0,81	-0,1	-0,16	0,18	0,19	0,94	1	0,08	0,2	0,55
109 dde	-0,13	-0,16	0,33	-0,28	0,64	-0,47	-0,48	-0,18	0	0,99	0,92	1	0,06	0,26
117 dde	0,21	-0,02	0,2	-0,25	0,68	-0,5	-0,71	-0,17	0,2	0,88	0,8	0,94	1	0,12
124 dde	0,3	-0,27	-0,27	-0,55	0,31	-0,78	-0,95	-0,52	0	0,65	0,45	0,74	0,88	1

Tabla 8. Análisis de correlación entre rendimiento y NDVI para la variedad GURI INTA CL.

GURI	Rendimiento	35 dde	38 dde	52 dde	61 dde	69 dde	76 dde	81 dde	87 dde	95 dde	101 dde	109 dde	117 dde	124 dde
Rendimiento	1	0,32	0,44	0,63	0,54	0,88	0,77	0,59	0,41	0,68	0,88	0,22	0,04	0,66
35 dde	-0,68	1	0,98	0,35	0,4	0,77	0,43	0,06	0,24	0,85	0,77	0,18	0,18	0,08
38 dde	-0,56	0,02	1	0,44	0,53	0,38	0,33	0,71	0,66	0,61	0,38	0,92	0,47	0,69
52 dde	0,37	-0,65	0,56	1	0,02	0,42	0,01	0,27	0,03	0,23	0,42	0,13	0,63	0,32
61 dde	0,46	-0,6	0,47	0,98	1	0,36	0,04	0,36	0,02	0,14	0,36	0,1	0,6	0,42
69 dde	-0,12	0,23	0,62	0,58	0,64	1	0,37	0,88	0,54	0,11	0	0,7	0,68	0,83
76 dde	0,23	-0,57	0,67	0,99	0,96	0,63	1	0,3	0,08	0,23	0,37	0,21	0,77	0,34
81 dde	0,41	-0,94	0,29	0,73	0,64	-0,12	0,7	1	0,24	0,85	0,88	0,27	0,42	0
87 dde	0,59	-0,76	0,34	0,97	0,98	0,46	0,92	0,76	1	0,25	0,54	0,03	0,42	0,3
95 dde	0,32	-0,15	0,39	0,77	0,86	0,89	0,77	0,15	0,75	1	0,11	0,33	0,86	0,92
101 dde	-0,12	0,23	0,62	0,58	0,64	1	0,63	-0,12	0,46	0,89	1	0,7	0,68	0,83
109 dde	0,78	-0,82	0,08	0,87	0,9	0,3	0,79	0,73	0,97	0,67	0,3	1	0,24	0,34
117 dde	0,96	-0,82	-0,53	0,37	0,4	-0,32	0,23	0,58	0,58	0,14	-0,32	0,76	1	0,47
124 dde	0,34	-0,92	0,31	0,68	0,58	-0,17	0,66	1	0,7	0,08	-0,17	0,66	0,53	1

Tabla 9. Análisis de correlación entre rendimiento y NDVI para la variedad San Javier.

SAN JAVIER	Rendimiento	35 dde	38 dde	52 dde	61 dde	69 dde	76 dde	81 dde	87 dde	95 dde	101 dde	109 dde	117 dde	124 dde
Rendimiento	1	0,85	0,56	0,56	0,97	0,81	0,88	0,89	0,62	0,01	0,68	0,75	0,77	0,9
35 dde	-0,15	1	0,85	0,93	0,6	0,35	0,86	0,49	0,41	0,83	0,02	0,11	0,16	0,04
38 dde	-0,44	0,15	1	0	0,21	0,47	0,08	0,26	0,54	0,43	0,76	0,82	0,67	0,91
52 dde	-0,44	0,07	1	1	0,17	0,42	0,07	0,29	0,5	0,43	0,83	0,89	0,73	0,83
61 dde	-0,03	-0,4	0,79	0,83	1	0,06	0,04	0,45	0,11	0,85	0,64	0,83	1	0,47
69 dde	0,19	-0,65	0,53	0,58	0,94	1	0,19	0,68	0,02	0,9	0,36	0,64	0,79	0,29
76 dde	-0,12	-0,14	0,92	0,93	0,96	0,81	1	0,27	0,23	0,74	0,91	0,94	0,77	0,69
81 dde	0,11	0,51	0,74	0,71	0,55	0,32	0,73	1	0,61	0,97	0,51	0,27	0,17	0,59
87 dde	0,38	-0,59	0,46	0,5	0,89	0,98	0,77	0,39	1	0,72	0,39	0,78	0,91	0,4
95 dde	-0,99	0,17	0,57	0,57	0,15	-0,1	0,26	0,03	-0,28	1	0,66	0,81	0,86	0,9
101 dde	0,32	-0,98	-0,24	-0,17	0,36	0,64	0,09	-0,49	0,61	-0,34	1	0,19	0,22	0,1
109 dde	-0,25	-0,89	-0,18	-0,11	0,17	0,36	-0,06	-0,73	0,22	0,19	0,81	1	0,01	0,09
117 dde	-0,23	-0,84	-0,33	-0,27	0	0,21	-0,23	-0,83	0,09	0,14	0,78	0,99	1	0,16
124 dde	-0,1	-0,96	0,09	0,17	0,53	0,71	0,31	-0,41	0,6	0,1	0,9	0,91	0,84	1

CONCLUSIONES

Si bien el análisis tiene carácter preliminar podemos inferir:

- Para las condiciones del ensayo se observó una correlación significativa, positiva y alta entre los valores de NDVI obtenidos a partir del sensor manual (GreenSeeker™) y del sensor remoto (dron eBee).
- El NDVI presenta marcadas diferencias según sea la estructura de la planta. La variedad San Javier mostro durante todo el ciclo un mayor índice que el resto de los materiales evaluados debido a que su estructura de planta es planófila con la hoja bandera muy desarrollada lo cual hace que arroje valores altos de NDVI.
- Después de 50 días después de emergencia (DDE) los datos son más estables y mayor es el NDVI (debido a estructura de planta y a que cierra el surco).
- Al comienzo del ciclo del cultivo los valores son muy variables por lo que no es aconsejable el uso del sensor.
- Si bien el instrumental presenta correlación con el rendimiento, para los cultivares Irga 424 ($r=0.96$) y Gurí ($r=0.96$) a los 117 DDE esto no se cumple siempre, como lo es por ejemplo el caso de la variedad Taim ($r=0.21$) por lo que hay que tener en cuenta la variedad sembrada al momento de tomar la decisión del uso o no de los equipos.

Si bien no era el objetivo de este ensayo, se pudo observar que los valores de NDVI responden de manera inmediata frente a un estrés en el cultivo ya que se observó una notoria caída en el índice luego de que el riego fuera interrumpido. De igual manera mostró picos de crecimiento al momento de reanudar el riego lo que nos permitiría inferir que, para el cultivo de arroz, el NDVI es un buen indicador de estrés hídrico.

BIBLIOGRAFIA

ACPA, (2015). Relevamiento arrocerero provincial. Informe de campaña 2015/16: Fin de cosecha Corrientes.

Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. Avances en investigación agropecuaria, 14(2), 49-65.

Alvarez, A., & Andrade Barragan, L. (2009). Evaluación de cinco dosis de aplicación de ceniza de cascarilla de arroz como fuente de silicio y complemento a la fertilización con fósforo y potasio en el cultivo de arroz (*oryza sativa* L.) variedad f-50.

Bocco, M., Ovando, G., Sayago, S., & Willington, E. (2015). Modelos simples para estimar cobertura de suelo agrícola a partir de imágenes modis: aplicación a la zona central de Córdoba (Argentina). In Congreso Argentino de AgroInformática, CAI (p. 61).

CIAT, (2015). Morfología de la Planta de Arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Cali, Colombia. Abril 2005.

Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Atzberger, C., & van Wieren, S. (2008). Estimation of vegetation LAI from hyperspectral reflectance data: Effects of soil type and plant architecture. International journal of applied Earth observation and geoinformation, 10(3), 358-373.

De la Casa, A., Ovando, G. (2007). Integración del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) y del Ciclo Fenológico de Maíz para Estimar el Rendimiento a Escala Departamental en Córdoba, Argentina. Agricultura Técnica, 67(4), 362-371.

Doraiswamy, P. C., Moulin, S., Cook, P. W., & Stern, A. (2003). Crop yield assessment from remote sensing. Photogrammetric engineering & remote sensing, 69(6), 665-674.

FAO, (2007). Arroces maleza- origen, biología, ecología y control. Estudio FAO producción y protección vegetal 188. Roma.

FAO, (2014). Seguimiento del mercado del arroz de la FAO. Volumen XVII Edición N° I. Abril de 2014

Fiant, S., Alonso, C., Meriggiola, P., Fuentes, L., Spinazzé, C., Agosto G., Pérez, C., Bonvehí, L., Farias R., Salinas S., Cerino R., L. (2010). Correlación entre índices de vegetación y rendimiento de maní a escala regional en Córdoba. Bolsa de Cereales de Córdoba.

Gutiérrez-Soto, M. V., Cadet-Piedra, E., Rodríguez-Montero, W., & Araya-Alfaro, J. M. (2011). GreenSeeker™ and the diagnosis of crop health. Agronomía Mesoamericana, 22(2), 397-403.

Inman, D., Khosla, R., & Mayfield, T. (2005). On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. Sensor Review, 25(3), 209-214.

Jones, C. L., Weckler, P. R., Maness, N. O., Jayasekara, R., Stone, M. L., & Chrz, D. (2007). Remote sensing to estimate chlorophyll concentration in spinach using multi-spectral plant reflectance. *Transactions of the ASABE*, 50(6), 2267-2273.

Kurtz, D., Lieger, D. (2008). Guía de buenas prácticas agrícolas para el cultivo de arroz en corrientes. Publicacion Tecnica Serie1. 16-21

Lan, Y., Zhang, H., Lacey, R., Hoffmann, W. C., & Wu, W. (2009). Development of an integration sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International*, 11.

Pirchi, H. J., Crepy, M. A., Gregori, L. A., & Arguissain, G. G. (2013). Fertilización nitrogenada en arroz [Greenseeker como herramienta de diagnóstico]. In *Congreso Brasileiro de Arroz Irrigado*. 8. (2) 912-915

Viney, MK., Hatfield, J.L., Baker, J.M. (2005). Micrometeorology in agricultural systems. *Agronomy Monograph*. (47) 584 -585.

Weiss, Y. Jordan, M. I. (2001). On spectral clustering: Analysis and an algorithm. In *NIPS* (14) 849-856.

Sitios de interés en internet

University of Sheffield Remote Sensing: GEO6370 Vegetation Indices. Disponible en <http://www.shef.ac.uk/~bryant/6370/veg/vegsoil.htm>

U.S. Water Conservation Laboratory: How a Vegetation Index Works. Disponible en <http://www.uswcl.ars.ag.gov/epd/remsen/Vi/VIworks.htm>