

# Integración de tecnologías y experiencias del productor en la mejora de la toma de decisiones

Autores: Equipo técnico de Oryzativa



## INTRODUCCIÓN

El sensoramiento remoto con fines agrícolas ha tomado en los últimos años un impulso y una adopción sin precedentes entre productores y empresas de todo el mundo. En los comienzos, la teledetección en el sector agropecuario se limitaba a instituciones que tuvieran acceso a imágenes satelitales, generalmente orientada a estudios nacionales o regionales. Estos estaban, en su mayor parte, enfocados al pronóstico de rendimientos, efectos climáticos en el sector agropecuario (sequías, inundaciones, incendios, heladas), regionalizaciones de cultivos y clasificaciones de suelos, entre otros. En los últimos años, el cambio en la política de acceso (libre) a imágenes satelitales de alta calidad y frecuencia permitido por instituciones como NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y ESA (*European Space Agency*), y por otro lado el incremento de empresas comerciales privadas que producen sus propias imágenes de alta calidad (1-5 m) y frecuencia (2-3 días) como WorldView2, PLEIADES, DMC, DEIMOS, PLANET (Dove-RapidEye, ha motivado el desarrollo de diferentes plataformas web, con distintas tecnologías y productos que facilitan la observación de la tierra con un acceso rápido y preciso a nivel de operaciones agropecuarias.

El sensoramiento remoto utilizado en la observación de la tierra, en un sentido más amplio, está siendo también altamente adoptado en el sector agropecuario, motivado por la disponibilidad de tecnologías de drones y cámaras multiespectrales y térmicas. La variada oferta y la disminución del precio de diferentes tipos de drones, así como la disponibilidad de nuevas cámaras de imágenes multiespectrales de bajo costo han permitido el desarrollo de nuevas empresas de servicios dentro del sector agropecuario en Uruguay y en la región.

El sensoramiento remoto pone a disposición de los productores un grupo de herramientas que les permiten tomar decisiones operativas en tiempo *quasi-real*, día a día; ya sea evaluando la dispersión del comportamiento de un cultivo en particular (dimensión espacial), o evaluando de acciones pasadas (serie de imágenes, con un enfoque más *forense*) o realizando pronósticos del desarrollo del

cultivo en diferentes zonas ambientes (estimación del rendimiento). Básicamente permite un monitoreo del estado pasado, actual y futuro del cultivo, que facilita la mejora en la toma de decisiones técnicas en el manejo del mismo.

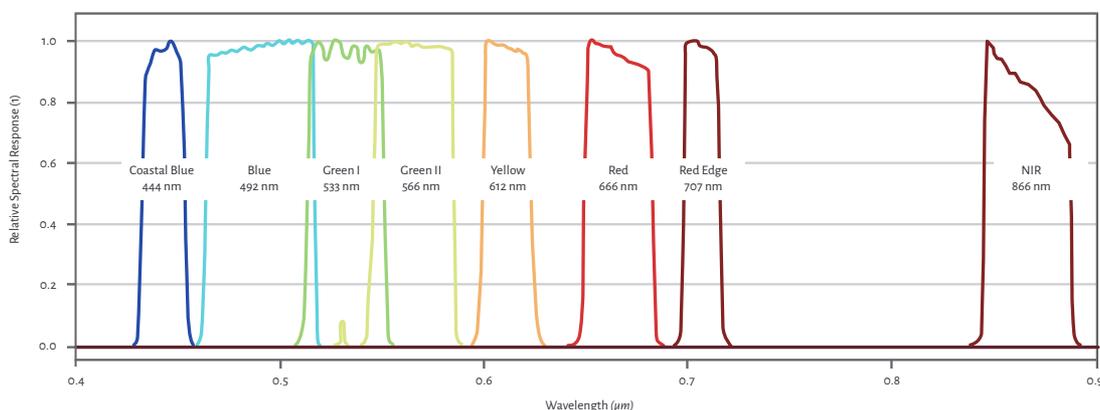
## LA OBSERVACIÓN DEL CULTIVO A TRAVÉS DEL SENSORAMIENTO REMOTO

La superficie y la atmósfera terrestre emiten, absorben y reflejan radiación. La cantidad y proporción de la radiación terrestre está directamente relacionada con la radiación solar incidente. Un ejemplo gráfico es que cuando entramos en un cuarto oscuro no logramos ver nada, pero si iluminamos con una linterna se comienzan a apreciar formas, tamaños y colores, como consecuencia de la luz que emite la linterna, la reflexión de la luz en los objetos y nuestro ojo que está adaptado a ver dentro del espectro de los colores visibles. El mismo efecto hace la radiación solar reflejada en la superficie terrestre (un cultivo, por ejemplo) y las cámaras en los satélites (imágenes). Si bien la mayor parte de imágenes satelitales disponibles registran un espectro radiométrico amplio (ej. Sentinel 2: 450-2280 nm), el espectro visible es más reducido (ej. Sentinel 2: 450-713 nm). Investigadores de muchos países han desarrollado relaciones entre la intensidad de las distintas longitudes de onda de las bandas registradas por los satélites para asociarlas con características de las superficies terrestres y en particular dentro en los cultivos.

En diferentes escalas espaciales y temporales se han desarrollado estos índices relacionándolos con el área foliar, el verdor de la canopia, el estado de salud de los cultivos, el contenido de nitrógeno u otros pigmentos asociados a estreses, la biomasa vegetal, y el estado hídrico entre otros. Si bien es difícil reemplazar el conocimiento directo del estado de un cultivo cuando se lo recorre a pie en toda su extensión, el sensoramiento remoto facilita realizarlo en forma más eficiente y rápida, detectando *a priori* zonas de mejor o peor desarrollo y/o cambios en el estado de un cultivo.

<b>NDVI</b>	Índice de Vegetación Diferencia Normalizada Normalized Difference Vegetation Index	Gates et al., 1965; Jackson et al., 1983.
<b>NDWI</b>	Índice de Agua Diferencia Normalizada Normalized Difference Water Index	Gao, B. C., 1996
<b>CI</b>	Índice de Clorofila CI verde / CI borde del rojo	Citelson et al., 2003; 2005

▲ Cuadro 1  
Índices de vegetación usados en Oryzativa



▲ Figura 1  
Bandas espectrales de PlanetScope en Oryzativa.

### EL DÍA A DÍA DE LA TOMA DE DECISIONES: INCERTIDUMBRES, ACIERTOS Y PRONÓSTICO

Una de las fortalezas más importantes del uso de la teledetección remota en la gestión agrícola es tener información clara del comportamiento de los cultivos (actual y pasado) y determinar variaciones de comportamiento en el terreno, formando así ambientes diferenciados. Nos permite tomar decisiones cotidianas y analizar lo que ya pasó reduciendo de este modo las incertidumbres y conectando el comportamiento del cultivo en función del ambiente climático futuro o de medidas de manejo a realizarse. Estas señales del desarrollo del cultivo generan mayor seguridad en las decisiones de manejo pudiendo adelantarse y corregir situaciones desfavorables. La comparación cuantitativa de estos índices espectrales entre años y entre fechas a par-

tir de la emergencia nos da información clara y útil del estado de desarrollo del cultivo que nos permite realizar pronósticos del rendimiento futuro con una fuerte base de la variabilidad espacial del comportamiento del cultivo.

### PLATAFORMA ORYZATIVA

Oryzativa es una plataforma de monitoreo satelital de arroz que une conocimiento agronómico, tecnología y teledetección, con la experiencia de los actores del sector.

Nace a partir de la experiencia de un grupo de técnicos vinculados al sector arrocero con el objetivo de aportar soluciones tecnológicas al sector y ayudar en la toma de decisiones.

Oryzativa utiliza imágenes de alta y muy alta resolución tanto espacial (20 a 1 m) como temporal (7 a 2 días) para la confección de los índices espectrales; a saber: NDVI, NDWI e IC que son los índices más aceptados por la academia nacional e internacional (Cuadro 1).

La llave de la utilidad de estos índices espectrales es la relación cuantitativa entre éstos y alguna de las características del cultivo de interés: variación de la población lograda de plantas, biomasa, nitrógeno en la canopia, estado del estrés del cultivo y contenido de agua del cultivo, entre otros. Por otro lado, posibilita evaluar el efecto de los fríos en el desarrollo o el impacto del viento (vuelco RGB) y el avance en la fertilización.

Oryzativa utiliza estas relaciones cuantitativas desde dos fuentes de datos:

a) a partir de relaciones reconocidas en la academia e investigación, las cuales son actualizadas en la medida de nuevos conocimientos y ajustes matemáticos, como las curvas de dilución de nitrógeno; y

b) a partir de la base de datos propia de Oryzativa que a lo largo de muchos años y sitios que le permite comparar situaciones similares o distintas del comportamiento del cultivo, especialmente en la evolución de estos índices (NDVI), el desarrollo del cultivo y el rendimiento obtenido.

## I. PROPUESTA DE ORYZATIVA PARA EL MONITOREO DEL CULTIVO DE ARROZ

Los cultivadores de arroz de Uruguay, en conjunto con otras instituciones nacionales como INIA, GMA, FLAR, han marcado un camino tecnológico que reduce las incertidumbres para concretar altos rendimientos. En este camino de 10 mojones críticos (10 puntos para 10 toneladas, ACA) (Fig. 2), el servicio propuesto por Oryzativa permite el monitoreo del cultivo y en consecuencia poder ayudar a tomar decisiones operativas para algunos de estos 10 puntos.



▲ Figura 2  
10 puntos para 10 toneladas de arroz

**Punto 1. Laboreo anticipado y taipas previas.** La teledetección permite tener una mirada general del estado del laboreo de las chacras, así como del avance en la construcción de taipas o sistematización, en forma rápida y global. Facilita junto a sistemas de información geográfica y topográfica el mejor diseño de la distribución de agua.

**Punto 2. Siembra en fecha óptima y calidad.** La evolución de la siembra en las diferentes chacras es fácilmente vista con las imágenes de alta resolución temporal en el espectro visible. La uniformidad de la emergencia y potenciales efectos adversos en los primeros estadios son fácilmente identificables. También la calidad de la cama de siembra o el control de malezas (glifosato previo a la siembra).

**Punto 3. Selección de cultivares.**

**Punto 4. Fertilización basal ajustada a altos rendimientos.** La fertilización basal desde el punto de vista del sensoramiento remoto está relacionada a la delimitación de diferentes ambientes generados dentro de las chacras, relacionados con la topografía, la variabilidad de los suelos, y con el diseño de la distribución del agua, permitiendo -en función de los muestreos de suelo y la producción anterior- ser más eficiente en la planificación de la fertilización.

**Punto 5. Herbicida pre-emergente y post-emergente antes de V4.** El monitoreo de la uniformidad del crecimiento vegetativo del cultivo permitirá la mejor planificación de la aplicación de los herbicidas.

**Punto 6. Urea en macollaje-V3.** La teledetección remota permite evaluar la uniformidad del estado V3 y V4 y en definitiva hacer una mejor planificación, y al mismo tiempo a través de los índices de clorofila (IC) y NDVI observar la homogeneidad de la clorofila en el cultivo. Niveles muy bajos de clorofila indican valores bajos de nitrógeno o de algún otro factor (biótico o abiótico) que afecte el verdor del arroz.

**Punto 7. Inundación temprana en V3-V4.** El estado de la inundación temprana es fácilmente seguido a través del monitoreo satelital con imágenes RGB y una vez que tenemos cobertura total de la chacra con índices como: NDWI, que nos permite inferir el estatus hídrico mediante el contenido de agua de los tejidos vegetales.

**Punto 8. Urea en primordio.** Al igual que en el macollaje, podemos ver el grado y uniformidad del verdor en este estadio, e inferir el nivel de clorofila, o nitrógeno de la planta y realizar las correcciones oportunas.

**Punto 9. Control de enfermedades.** El índice NDVI y el índice de clorofila entre otros permiten detectar puntos o zonas dentro de la chacra con un comportamiento distinto, que luego requerirá de una inspección de campo.

**Punto 10. Cosecha en el momento apropiado.** La evolución de la cosecha y el grado de madurez del cultivo en las distintas chacras y zonas dentro de la chacra son fácilmente monitorizadas.

La combinación del monitoreo satelital (ej. Plataforma Oryzativa), con el pronóstico del clima y la fenología del cultivo (ej. CLIMArroz) y con la experiencia obtenida del análisis de imágenes de ciclos anteriores del arroz, permiten una adaptación y mejora de las decisiones de manejo del cultivo. Estas tecnologías están en continuo desarrollo a nivel mundial, incorporando a la teledetección modelos de desarrollo del cultivo, que permitan un pronóstico del rendimiento en diferentes ambientes.

## II. EL ESTADO DEL CULTIVO DE ARROZ Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO

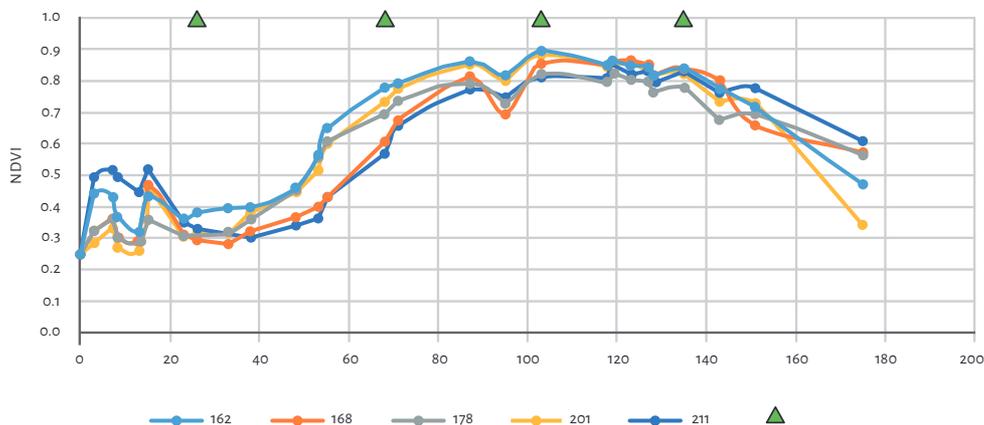
Uno de los índices espectrales más utilizados en agricultura es el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) que relaciona las bandas del rojo y el infrarrojo cercano de una superficie particular. Sobre el uso de este índice y otros podemos encontrar fácilmente una profusa literatura (Hatfield et al. 2008).

Los valores del NDVI van cambiando a lo largo del cultivo de acuerdo con el desarrollo del mismo. En el caso del cultivo de arroz nos permiten relacionar los valores del NDVI en estados de desarrollo críticos (Fig. 3): macollaje, primordio, 50 % floración y madurez fisiológica. Los valores de NDVI en los primeros días luego de la emergencia no son buenos debido a la interferencia de la reflectancia del suelo y agua, que se mezclan con la reflectancia proveniente del arroz. Los valores máximos de NDVI se

obtienen cercanos al 50 % de la floración y podemos ver como en chacras sembradas en la misma fecha, con la misma variedad hay una relación clara de los valores máximos de NDVI y el rendimiento (Fig. 3). Sin embargo, hemos visto que el estado de desarrollo del cultivo evaluado a través del NDVI a los 60-68 días desde emergencia (Primordio) ha sido de gran utilidad para la toma de decisiones y para determinar el rendimiento potencial de esa chacra. La tasa de aumento del valor del NDVI entre los días 40 y 80 desde emergencia, así como el valor en primordio se ha relacionado con el rendimiento obtenido. Tasas de incremento del NDVI desde 40-50 días

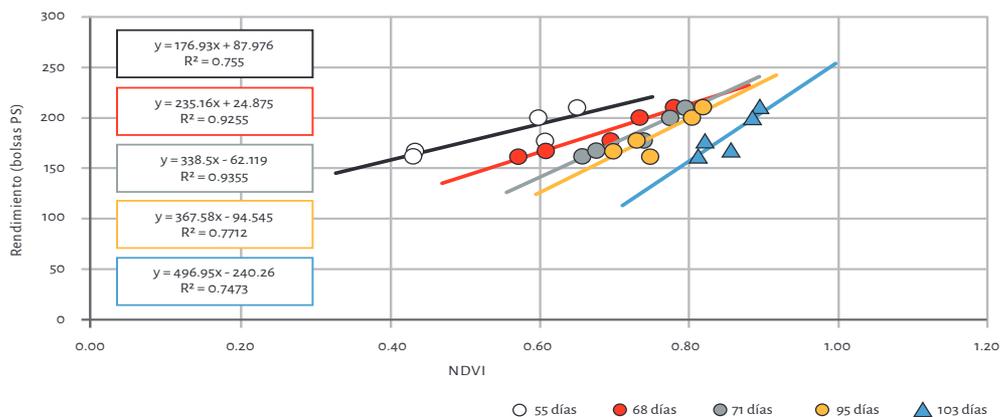
post emergencia mayores resultan en rendimientos más altos para una misma variedad (Fig. 3) y en primordio podríamos realizar correcciones del manejo como: correcciones de nitrógeno, ajustes en el control de malezas, etc.

En chacras de arroz en Salto seleccionadas por su manejo homogéneo, misma variedad y fecha de siembra se ha evidenciado una relación directa entre el valor del NDVI a los 68 días y el rendimiento final. Valores de NDVI entre 0,57 y 0,78 corresponden a rendimientos finales de 162 y 211 bolsas de grano seco por ha respectivamente (Fig. 4).



▲ Figura 3

Evolución del NDVI promedio en chacras con diferente rendimiento final (162 a 211 bolsas/ha de grano seco). Variedad: Olimar, fecha de emergencia: 3 Octubre 2023, Salto. Los triángulos representan los estadios fenológicos de macollaje, primordio, 50 % floración y madurez fisiológica.



▲ Figura 4

Relación del NDVI promedio y el rendimiento final en chacras de arroz. Variedad: Olimar, fecha de emergencia: 3 Octubre 2023, Salto. Los puntos blancos, rojo, gris, naranja y verde representan los valores de NDVI a los 55, 68 (primordio), 71, 95, 103 (previo MF) días post emergencia.

## CONCLUSIONES

- 1.** La teledetección remota es una herramienta adecuada y accesible en la gestión agrícola para tener una información clara del comportamiento de las chacras, conociendo la variación de este comportamiento en el terreno.
- 2.** La identificación del comportamiento del arroz en puntos clave del ciclo productivo nos permitirá hacer los ajustes necesarios para lograr altos rendimientos.
- 3.** La integración de nuevas tecnologías en plataformas disponibles en Uruguay, en conjunto con la experiencia del productor facilitará la sostenibilidad de altos rendimientos.
- 4.** Oryzativa es una plataforma de monitoreo satelital pensada y desarrollada 100 % para el cultivo de arroz con el propósito de ayudar a productores y técnicos en la toma de decisiones en sus cultivos. ■

## REFERENCIAS

- Gao, B. C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- Gates, D.M., H.J. Keegan, J.C. Schleiter, and V.R. Weidner. 1965. Spectral properties of plants. *Appl. Opt.* 4:11–20.
- Gitelson, A.A., A. Viña, T.J. Arkebauer, D.C. Rundquist, G. Keydan, and B. Leavitt. 2003. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophys. Res. Lett.* 30(5):1248.
- Gitelson, A.A., A. Viña, D.C. Rundquist, V. Ciganda, and T.J. Arkebauer. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.* 32:108403.
- Hatfield, J. L., Gitelson, A. A., Schepers, J. S., & Walthall, C. L. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*, 100, S-117.
- Jackson, R.D., P.N. Slater, and P.J. Pinter, 1983. Discrimination of Growth and Water Stress in Wheat by Various Vegetation Indices Through Clear and Turbid Atmospheres. *Remote Sensing of the Environment* 15:187-208.
- Jackson, T.J., D. Chen, M. Cosh, F. Li, M. Anderson, C. Walthall, P. Doraiswamy, and E.R. Hunt. 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sens. Environ.* 92:475–482.