

***USO DE IMÁGENES AÉREAS MULTIESPECTRALES  
PARA EL AJUSTE DE N EN COBERTERA EN CULTIVO DE ARROZ  
EN CONDICIONES MEDITERRÁNEAS***

*Jornada técnica de la Red Sirena  
14 Noviembre 2017, Córdoba*

**Beatriz Moreno García**  
**bmorenoga@cita-aragon.es**  
**Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón**  
**Grupo CITA-EEAD**

Trabajo incluido en la tesis doctoral de Beatriz Moreno-García (2017).  
Respuesta del arroz a la fertilización con purín porcino en condiciones Mediterráneas.

## INTRODUCCIÓN

- Diferentes autores han formulado **herramientas** con el objetivo de **asesorar en las recomendaciones de N** durante la campaña.
- Estas herramientas están basadas en las **relaciones entre índices de vegetación (VIs)** y diferentes parámetros como **rendimiento, biomasa, índice de área foliar (LAI)** o **contenido de N**.
- Aunque han sido formuladas inicialmente para **otros cultivos** (Lukina et al., 2001; Raun et al., 2002; Denuit et al., 2002), han sido posteriormente aplicadas a **arroz** (Xue and Yang, 2008; Yao et al., 2012).
- Mayoría de estudios en arroz en Asia: condiciones meteorológicas y de implantación de cultivo diferentes a las mediterráneas.

## INTRODUCCIÓN

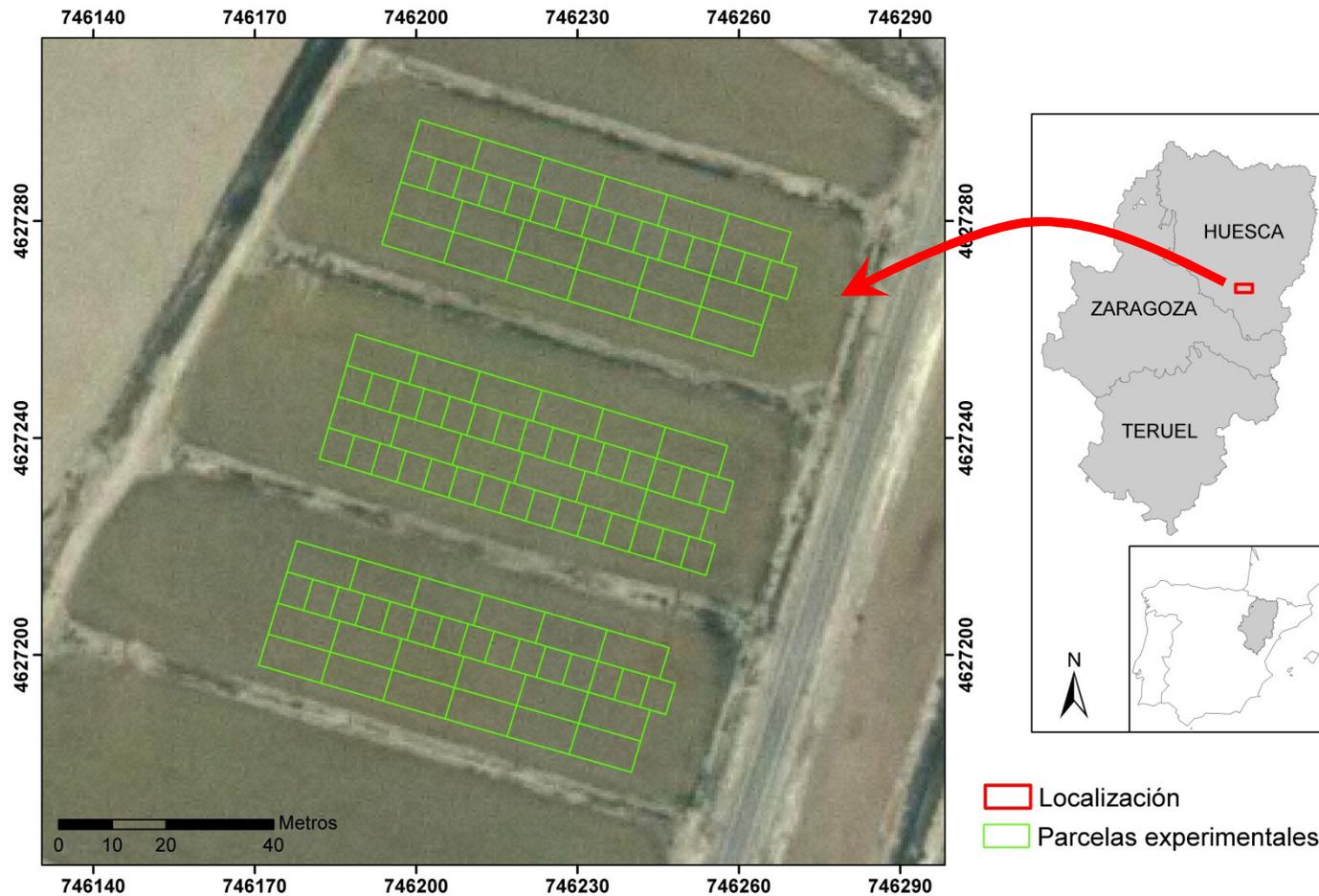
- Aragón es una zona con una alta producción porcina y por ello, la práctica habitual de los agricultores: **aplicación de purín porcino en fondo y complementación de cobertera mineral.**
- **No existen estudios sobre el efecto de la aplicación de purín porcino en la respuesta espectral del cultivo de arroz.** En otros cultivos hay indicios de una respuesta diferencial.
- En nuestras condiciones, es necesario generar más información para el desarrollo de herramientas que mejoren las recomendaciones de N en cobertera, con el uso de **imágenes aéreas de alta resolución** que cubran **áreas extensas**, pudiendo así realizar recomendaciones a diferentes agricultores, sin la necesidad de realizar medidas puntuales.

## OBJETIVOS

- Establecer **relaciones entre el rendimiento y diferentes VIs** derivados de imágenes aéreas multiespectrales y **evaluar posibles diferencias** en estas relaciones **entre la fertilización orgánica y mineral.**
  
- Diseñar una herramienta de recomendación de N** basada en la información obtenida en el punto anterior.
  
- Comparar económicamente diferentes escenarios** para el **ajuste de la cobertura** basados en las recomendaciones obtenidas previamente con la herramienta diseñada.

**ENSAYO EXPERIMENTAL: LOCALIZACIÓN**

Parcela en Villanueva de Sigena (Huesca): 2012-2013



Ortofoto PNOA-2015. Fuente: IGN (Instituto Geográfico Nacional) UTM ETRS89 Zona 30N

## DISEÑO EXPERIMENTAL

Split plot 4 repeticiones

### FACTOR PRINCIPAL: ABONADO EN FONDO

<b>PS170</b>	Dosis de purín equivalente 170 kg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ·ha <sup>-1</sup>
<b>PS120</b>	Dosis de purín equivalente 120 kg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ·ha <sup>-1</sup>
<b>M120</b>	Dosis de fertilizante mineral 120 kg N·ha <sup>-1</sup>

### FACTOR SECUNDARIO: ABONADO MINERAL EN COBERTERA

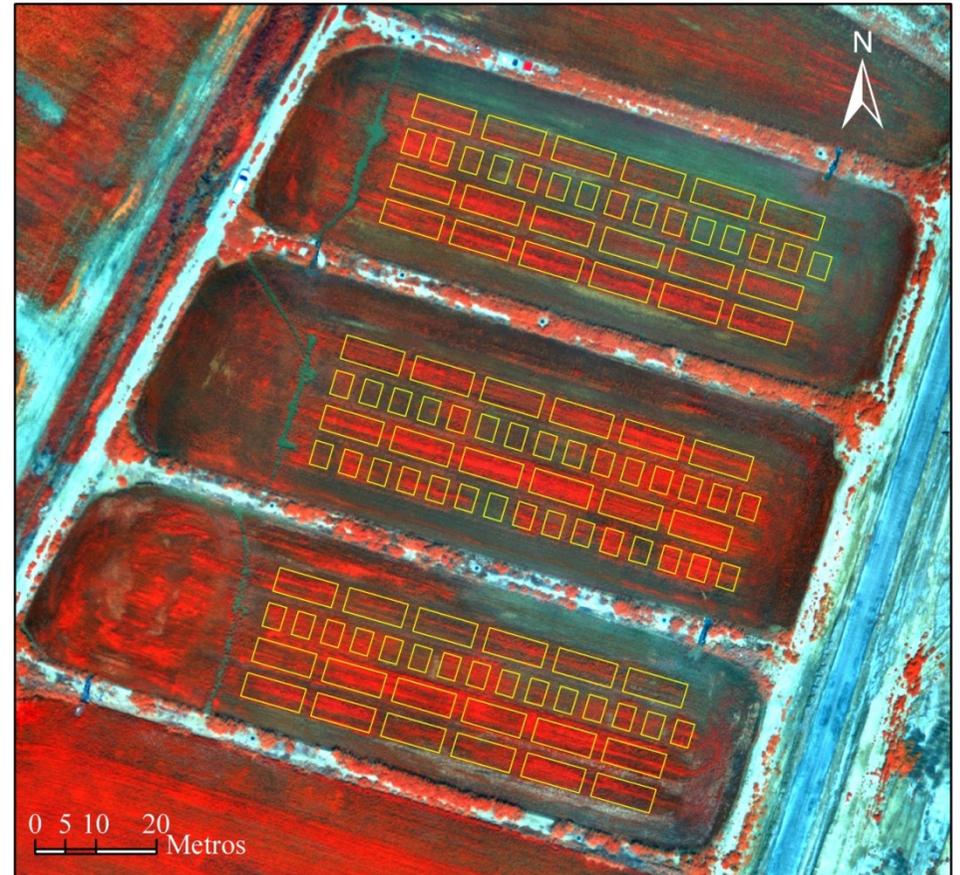
<b>M0</b>	0 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M30</b>	30 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M60</b>	60 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M90</b>	90 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M120</b>	120 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M150</b>	150 kg N·ha <sup>-1</sup>

### TRATAMIENTOS MINERALES FONDO ADICIONALES

<b>M0</b>	0 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M30</b>	30 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M60</b>	60 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M90</b>	90 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M120</b>	120 kg N·ha <sup>-1</sup>
<b>M150</b>	150 kg N·ha <sup>-1</sup>

## INFORMACIÓN ESPECTRAL

- 2 vuelos: 30 de Julio de 2012 y 13 Agosto 2013 (mediodía solar)  
Estado fenológico: panícula en zurrón (booting).
- Sensor multiespectral en 4 longitudes de onda:
  - Azul (B) (450 nm)
  - Verde (G) (550 nm)
  - Rojo (R) (675 nm)
  - Infrarrojo Cercano (NIR) (780 nm)
- Resolución espacial de 0,1 m.
- Índices de vegetación (VIs).



## INFORMACIÓN ESPECTRAL: ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Indices (VIs)	Fórmula	Referencia
<b>RVI</b> Ratio Vegetation Index	$NIR/R$	Jordan (1969)
<b>GRVI</b> Green Ratio Vegetation Index	$NIR/G$	Inada (1985)
<b>NDVI</b> Normalized Difference Vegetation Index	$(NIR-R)/(NIR+R)$	Rouse et al. (1974)
<b>GNDVI</b> Green Normalized Difference Vegetation Index	$(NIR-G)/(NIR+G)$	Gitelson et al. (1996)
<b>MCARI1</b> Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index1	$1.2 \cdot [2.5 \cdot (NIR-R) - 1.3 \cdot (NIR-G)]$	Haboudane et al. (2004)
<b>MCARI<sub>NIR</sub></b> Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index <sub>NIR</sub>	$[(NIR-R) - 0.2 \cdot (NIR-G)] \cdot (NIR/R)$	Adapted from Cao et al. (2013)
<b>gMCARI<sub>NIR</sub></b> Green peak Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index <sub>NIR</sub>		Proposed in this study

## OBJETIVOS

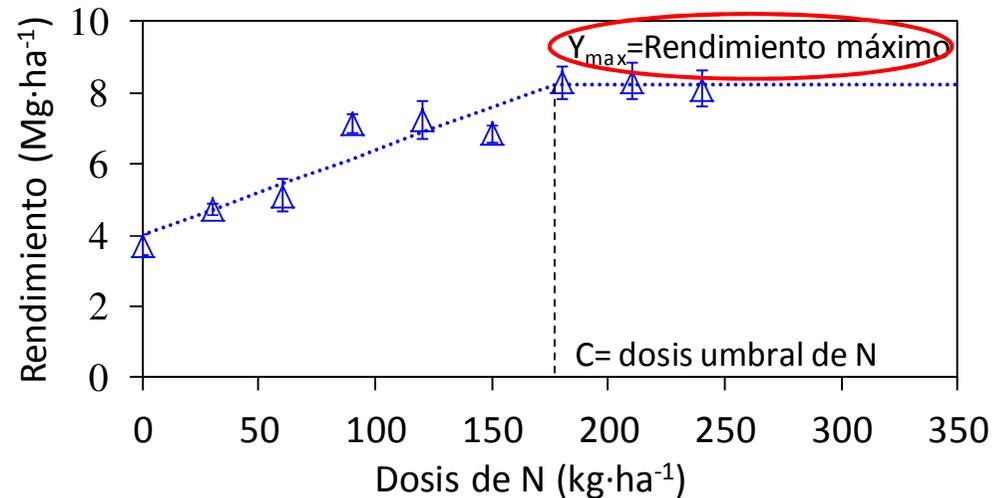
- Establecer **relaciones entre el rendimiento y diferentes VIs** derivados de imágenes aéreas multiespectrales tomadas en estado de panícula en zurrón y **evaluar posibles diferencias** en estas relaciones **entre la fertilización orgánica y mineral**.
- Diseñar y evaluar una herramienta de recomendación de N basada en la información obtenida en el punto anterior.
- Comparar **económicamente diferentes escenarios** para el **ajuste de la cobertera** basados en las recomendaciones obtenidas previamente con las herramienta diseñada.

INFORMACIÓN ESPECTRAL Y RELACIÓN CON RENDIMIENTO

- Cálculo rendimientos relativos y VI relativos para cada año:

$$R_{yield} = \frac{Yield_{plot}}{Maximum\ yield}$$

$$R_{VI} = \frac{VI\ value_{plot}}{Maximum\ VI}$$

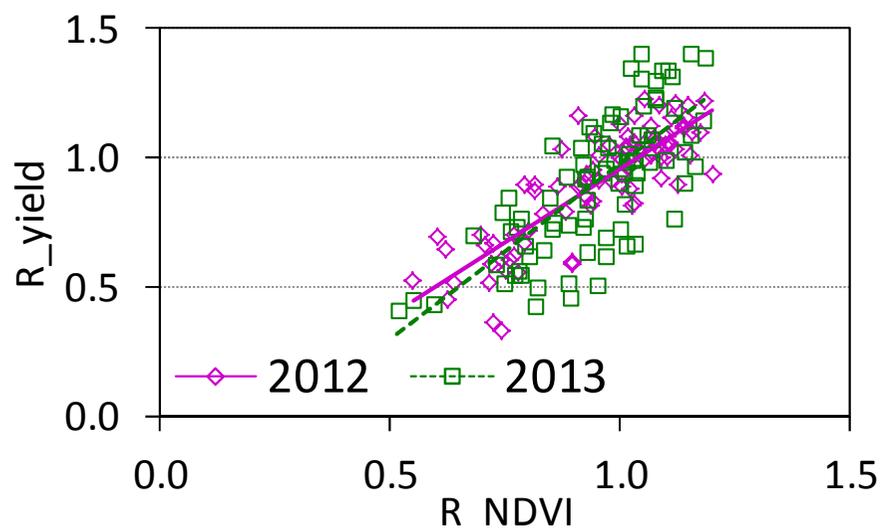


Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

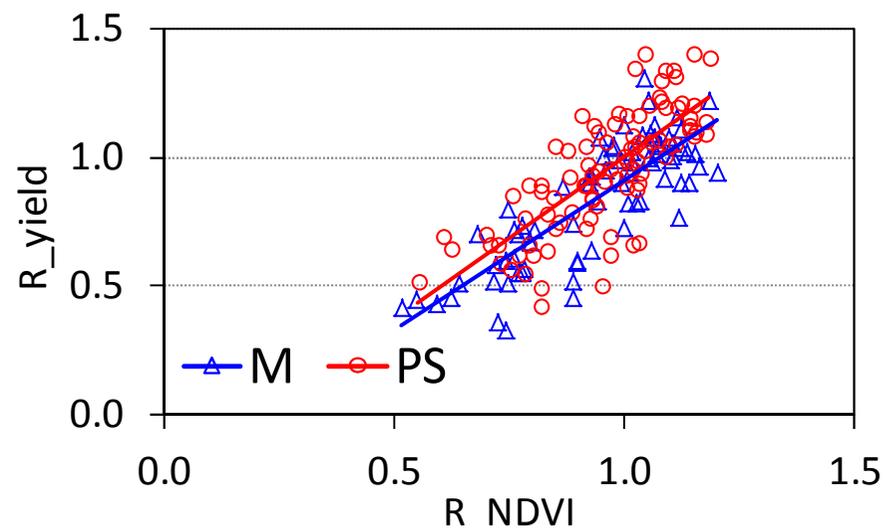
- Regresiones entre R\_yield y R\_VIs.
- Comparación entre tratamientos (purín y mineral) y años mediante comparación de líneas de regresión.

## INFORMACIÓN ESPECTRAL Y RELACIÓN CON RENDIMIENTO

### ➤ Influencia del año y del tipo de fertilizante



Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

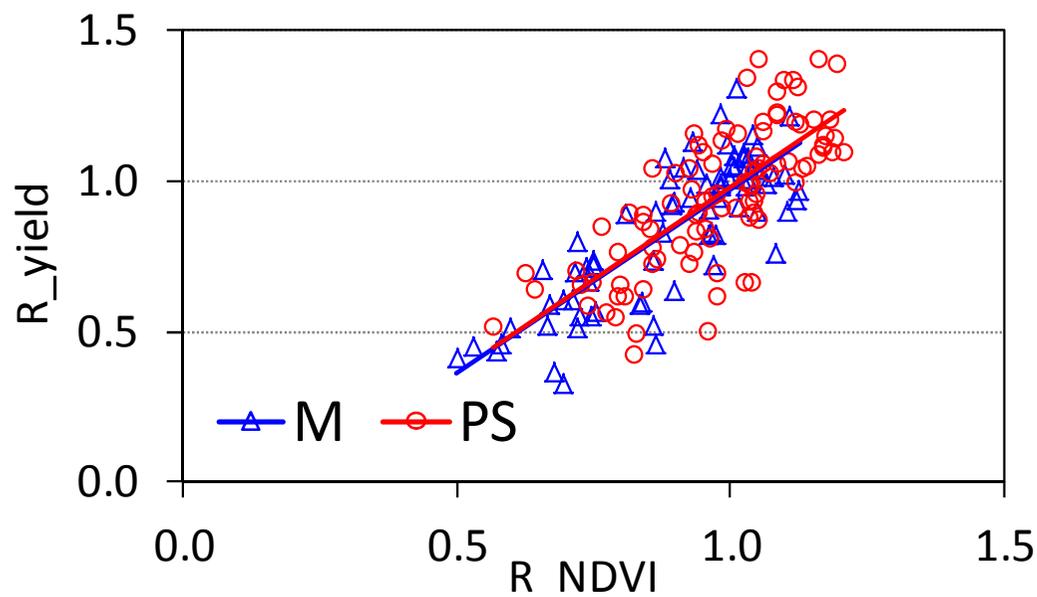


Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

- Las relaciones entre rendimiento relativo y VI relativo utilizando los máximos de cada año mostraron **diferencias significativas entre tipos de fertilización (purín y mineral)**.
- Zhao et al. (2015) también encontró una respuesta espectral diferente entre fertilización orgánica y mineral en cultivo de trigo.

## INFORMACIÓN ESPECTRAL Y RELACIÓN CON RENDIMIENTO

### ➤ Influencia del tipo de fertilizante



Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

Relativizar los valores de VI con respecto al máximo de cada año y dentro de cada año para PS y M de manera independiente.



**Es necesario disponer de parcelas sobrefertilizadas para los dos tipos de fertilización (purín y mineral) para el uso de herramientas de ajuste de la fertilización.**

## INFORMACIÓN ESPECTRAL Y RELACIÓN CON RENDIMIENTO

➤ Relaciones entre R\_yield y R\_VIs

	Tipo Modelo	2012 n=88	2013 n=83	Agrupados 2012+2013 n= 171
R_RVI	Lineal	0.70***	0.56***	0.62***
R_GRVI	Lineal	0.74***	0.53***	0.61***
R_NDVI	Lineal	0.74***	0.56***	0.63***
<b>R_GNDVI</b>	Lineal	0.77***	0.56***	<b>0.64***</b>
R_MCARI1	Lineal	0.69***	0.40***	0.52***
R_MCARI <sub>NIR</sub>	Multiplicativo	0.74***	0.58***	0.64***
<b>R_gMCARI<sub>NIR</sub></b>	Multiplicativo	0.77***	0.61***	<b>0.67***</b>

\*\*\*p<0.001

Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

GNDVI y gMCARI<sub>NIR</sub> seleccionados para el diseño de la herramienta de ayuda al ajuste de la fertilización en cobertera.

## INFORMACIÓN ESPECTRAL Y RELACIÓN CON RENDIMIENTO

➤ Relaciones entre R\_yield y R\_VIs

	Tipo Modelo	2012 n=88	2013 n=83	Agrupados 2012+2013 n= 171
R_RVI	Lineal	0.70***	0.56***	0.62***
R_GRVI	Lineal	0.74***	0.53***	0.61***
R_NDVI	Lineal	0.74***	0.56***	0.63***
R_GNDVI	Lineal	0.77***	0.56***	0.64***
R_MCARI1	Lineal	0.69***	0.40***	0.52***
R_MCARI <sub>NIR</sub>	Multiplicativo	0.74***	0.58***	0.64***
R_gMCARI <sub>NIR</sub>	Multiplicativo	0.77***	0.61***	0.67***

\*\*\*p<0.001

Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

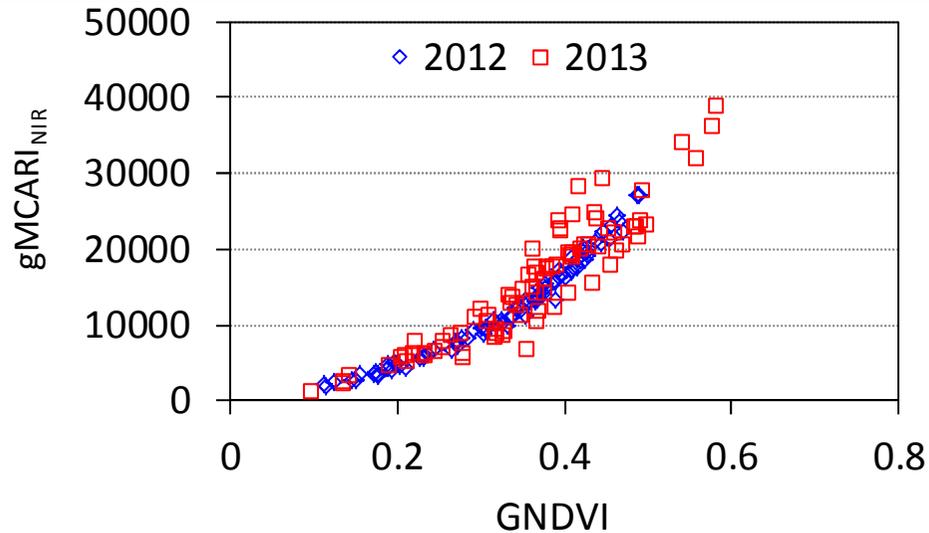
- Incremento de la variabilidad explicada por índices de 3 bandas con respecto a los de 2 bandas: **7 %**.
- Sistema de baja producción.

## COMPARATIVA ÍNDICES DE 2 Y 3 BANDAS

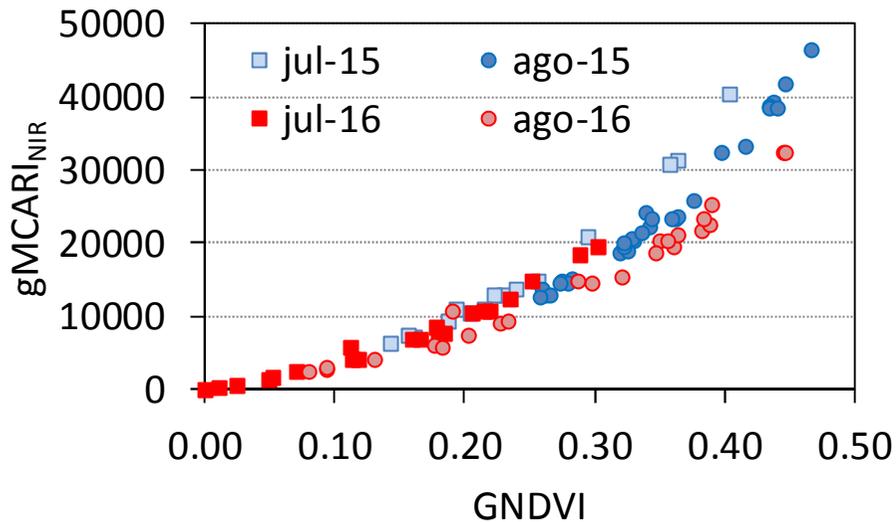
- Saturación índices de 2 bandas en sistemas con alta producción:
  - Cao et al. (2015) y Harrell et al. (2011) (**Rendimientos 10.000 kg/ha**).
  - Incremento de la variabilidad explicada por índices de 3 bandas con respecto a los de 2 bandas: **21-26 %**.
  
- No observación fenómeno saturación en sistemas con menor producción:
  - Xue et al. (2014) (**Rendimientos 8.000 kg/ha**).

COMPARATIVA ÍNDICES DE 2 Y 3 BANDAS

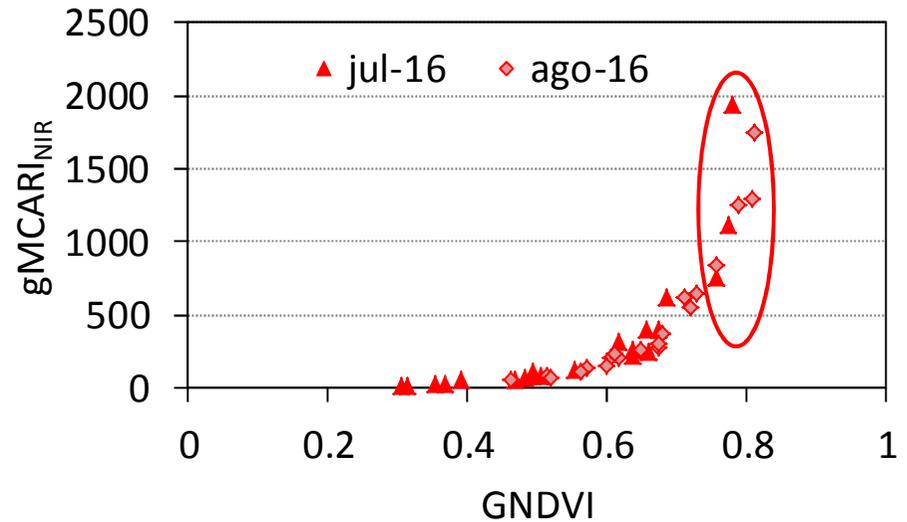
**VUELOS 2012 Y 2013  
VILLANUEVA DE SIGENA**



**VUELOS 2015 Y 2016**



**RADIOMETRÍA 2016**



## OBJETIVOS

- Establecer relaciones entre el rendimiento y diferentes VIs derivados de imágenes aéreas multiespectrales tomadas en estado de panícula en zurrón y evaluar posibles diferencias en estas relaciones entre la fertilización orgánica y mineral.
- Diseñar y evaluar una herramienta de recomendación de N** basada en la información obtenida en el punto anterior.
- Comparar económicamente diferentes escenarios para el **ajuste de la cobertera** basados en las recomendaciones obtenidas previamente con las herramienta diseñada.

## HERRAMIENTA PARA RECOMENDACIÓN DE N EN COBERTERA

- Se utilizaron los índices GNDVI y  $gMCARI_{NIR}$ .
- Diseño herramienta: 75 % datos (3 de 4 repeticiones).
- Validación: 25 % datos.
- Necesidad de parcelas sobrefertilizadas para cada tipo de fertilización (purín y mineral).

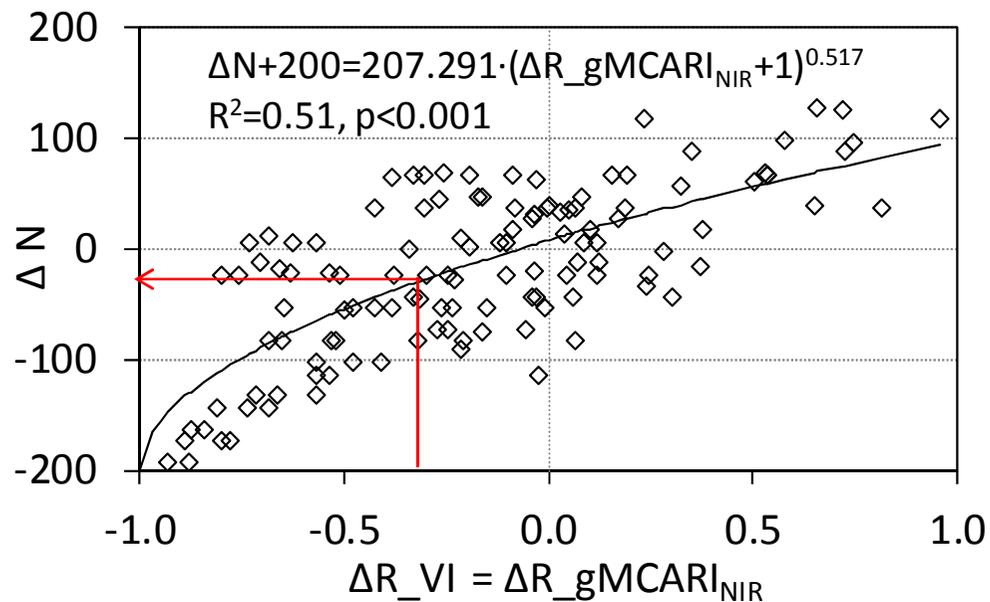
## HERRAMIENTA PARA RECOMENDACIÓN DE N EN COBERTERA

### ➤ Herramienta $\Delta N$ (diseño):

- Usa los índices de vegetación como indicador del estado nutricional del cultivo (NNI) (Denuit et al., 2002; Xue y Yang, 2008).

$$\Delta N = N_T - C$$

$$\Delta R_{VI} = R_{VI} - 1 \quad R_{VI} = \frac{VI \text{ value}_{Plot}}{\text{Maximum VI}}$$



Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

### ➤ Uso herramienta:

- Obtención valor VI en campo
- Cálculo  $R_{VI}$  usando parcelas sobrefertilizadas
- Cálculo  $\Delta R_{VI}$
- Estimación de  $\Delta N$  usando ecuación
- Si  $\Delta N$  estimado es  $\geq 0$  **NO fertilización**
- Si  $\Delta N$  estimado es  $< 0$  **SÍ fertilización**  
Dosis N =  $|\Delta N|$

## HERRAMIENTA PARA RECOMENDACIÓN DE N EN COBERTERA

➤ Estrategias validación:

Se evaluaron 4 estrategias:

- Uso **GNDVI**
- Uso **gMCARI<sub>NIR</sub>**
- Combinación **GNDVI & gMCARI<sub>NIR</sub>**:  
la parcela se fertiliza cuando ambos VIs recomiendan fertilización.
- Combinación **GNDVI OR gMCARI<sub>NIR</sub>**:  
la parcela se fertiliza sólo con que uno de los dos VIs recomiende fertilización.

## HERRAMIENTA PARA RECOMENDACIÓN DE N EN COBERTERA

- Validación herramienta  $\Delta N$  (cálculo del % éxito):
  - Si  $\Delta N$  estimado es  $\geq 0$ , la herramienta nos indica que la parcela **NO** hubiera necesitado fertilización.
    - $R_{\text{yield}} \geq 1$  **ÉXITO**
    - $R_{\text{yield}} < 1$  **ERROR** → **DEFECTO DE N**
  - Si  $\Delta N$  estimado es  $< 0$ , la herramienta nos indica que la parcela **SÍ** hubiera necesitado fertilización.
    - $R_{\text{yield}} < 1$  **ÉXITO**
    - $R_{\text{yield}} \geq 1$  **ERROR** → **EXCESO DE N**

## HERRAMIENTA PARA RECOMENDACIÓN DE N EN COBERTERA

➤ Validación:

Estrategia	ÉXITO %	EXCESO N %	DEFECTO N %
GNDVI	83.3	12.5	4.2
gMCARI <sub>NIR</sub>	<b>87.5</b>	<b>4.2</b>	<b>8.3</b>
GNDVI & gMCARI <sub>NIR</sub>	87.5	4.2	8.3
GNDVI OR gMCARI <sub>NIR</sub>	83.3	12.5	4.2

Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

- El uso del índice gMCARI<sub>NIR</sub> es la mejor estrategia.
- El uso combinado de índices no mejora la capacidad de predicción.
- Se seleccionó el índice gMCARI<sub>NIR</sub> para la evaluación económica.

## OBJETIVOS

- Establecer relaciones entre el rendimiento y diferentes VIs derivados de imágenes aéreas multiespectrales tomadas en estado de panícula en zurrón y evaluar posibles diferencias en estas relaciones entre la fertilización orgánica y mineral.
- Diseñar y evaluar una herramienta de recomendación de N basada en la información obtenida en el punto anterior.
- Comparar económicamente diferentes escenarios para el ajuste de la cobertera** basados en las recomendaciones obtenidas previamente con las herramienta diseñada.

## ANÁLISIS ECONÓMICO

$$\text{Beneficio Neto} = (\text{Rend}_{N\text{ cob}} - \text{Rend}_{\text{real}}) \cdot \text{Precio}_{\text{grano}} - \text{Precio}_N \cdot \text{Dosis } N - \text{Coste}_{\text{Aplicación } N}$$

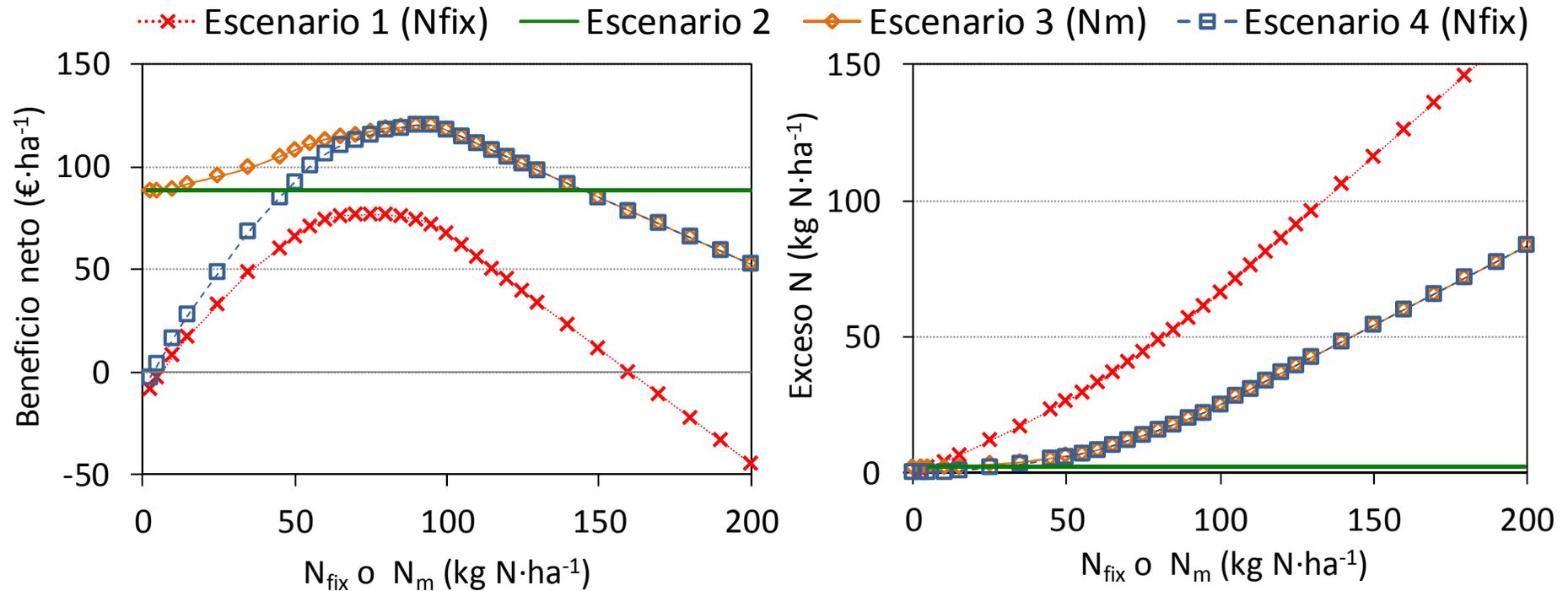
➤ Se evaluaron económicamente 4 escenarios:

- **Escenario 1:** todas las parcelas se fertilizan con una dosis fija ( $N_{\text{fix}}$ ) sin seguir ninguna recomendación (agricultor).
- **Escenario 2:** Herramienta  $\Delta N$ . Las parcelas se fertilizan con el valor de  $\Delta N$  estimado  $|\Delta N|$ .
- **Escenario 3:** *Variación herramienta  $\Delta N$ .* Las parcelas se fertilizan con el valor de  $\Delta N$  estimado pero se establece una dosis mínima ( $N_m$ ), Si  $\Delta N < N_m$  se aplica  $N_m$ .
- **Escenario 4:** *Variación herramienta  $\Delta N$ .* Las parcelas se fertilizan si lo indica la herramienta, con una dosis fija ( $N_{\text{fix}}$ ).

## ANÁLISIS AMBIENTAL

- Adicionalmente se evaluó el **exceso de N**:
  - Para las parcelas fertilizadas se calculó como la diferencia entre la dosis aplicada y la dosis teórica que se necesitaría para alcanzar el máximo rendimiento según las curvas respuesta.
  
- Ambos análisis se realizaron sobre las parcelas utilizadas en la validación de las herramientas: 24 parcelas.

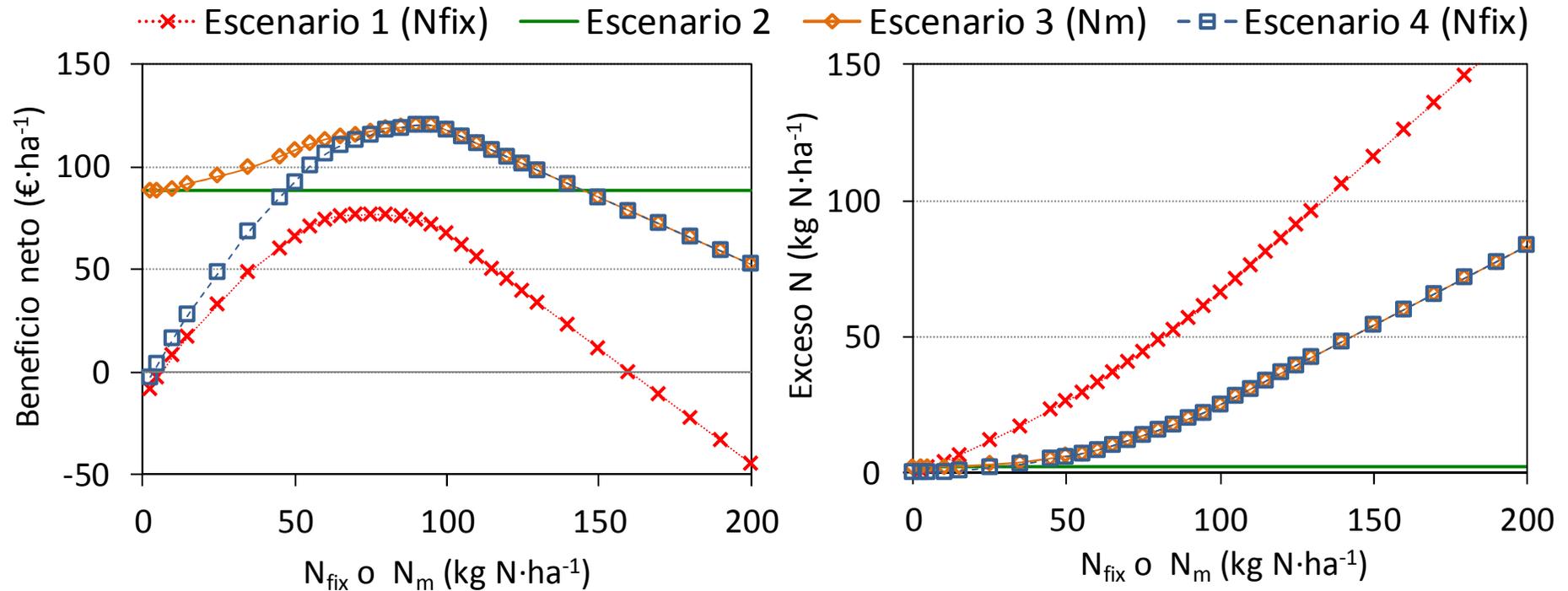
ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL



Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

- **Escenario 1:** Menor beneficio, Mayor exceso de N.
- **Escenario 2:** Aumento del beneficio, menor contaminación ambiental.
- **Escenario 3:** Incrementa el beneficio con respecto al 2, pero también aumenta el exceso de N.
- **Escenario 4:** la elección de la dosis fija de N ( $N_{fix}$ ) es crítica, el beneficio puede caer drásticamente.

ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL



Fuente: Moreno-García, 2017. Tesis doctoral

- **Escenario 1:** Menor beneficio, Mayor exceso de N.
- **Escenario 2:** Aumento del beneficio, menor contaminación ambiental.
- **Escenario 3:** Incrementa el beneficio con respecto al 2, pero también aumenta el exceso de N.
- **Escenario 4:** la elección de la dosis fija de N (Nfix) es crítica, el beneficio puede caer drásticamente.

## CONCLUSIONES

- Las **relaciones entre rendimiento y VIs** mostraron **diferencias** entre **tipos de fertilización**. Este resultado es crítico en el diseño de herramientas de recomendación de N, ya que implica trabajar con parcelas sobrefertilizadas para ambos tipos de fertilización.
- Las mejores relaciones se obtuvieron con VIs que incluían la banda del verde: GNDVI,  $MCARI_{NIR}$  y  **$gMCARI_{NIR}$**  (propuesto en este estudio).
- La herramienta  $\Delta N$  mostró un alto porcentaje en la predicción de la recomendación de N siendo **la mejor opción el uso del índice  $gMCARI_{NIR}$** .
- El análisis económico mostró que el **uso de la herramienta diseñada para la recomendación de N en cobertera** supone una clara ventaja frente a la fertilización sin ninguna recomendación.

## TRABAJOS FUTUROS

- Análisis en mayor profundidad de información espectral obtenida mediante vuelos y radiometría junto con muestreos de biomasa en otros ensayos en 2015 y 2016.
- Validación de la herramienta con los datos de otras parcelas y años.
- Validación real en campo.
- Comprobar la robustez del índice propuesto  $gMCARI_{NIR}$  :
  - Aplicación en arroz con imágenes de otras parcelas y años.
  - Aplicación a otros cultivos (maíz, alfalfa, cereales de invierno).
  - Aplicación con imágenes de satélite en cultivo de arroz/otros en zonas de alta producción para comprobar su robustez frente la saturación.



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**