



Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria  
U R U G U A Y

# Manejo de fósforo en sistemas agrícola ganaderos: algunas ideas para integrar aspectos agronómicos y ambientales

Proyecto Dinámica de Nutrientes en Sistemas Agrícola Ganaderos.

Agustín Núñez, Andrés Quincke

Taller Alternativas para la fertilización de fósforo

AUSID

Julio 29, 2023

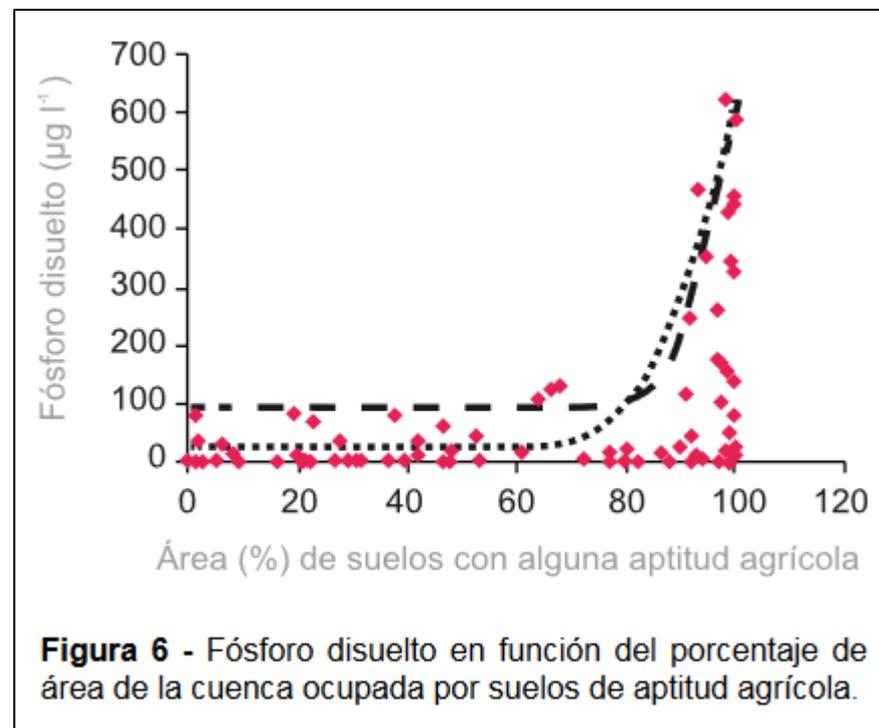
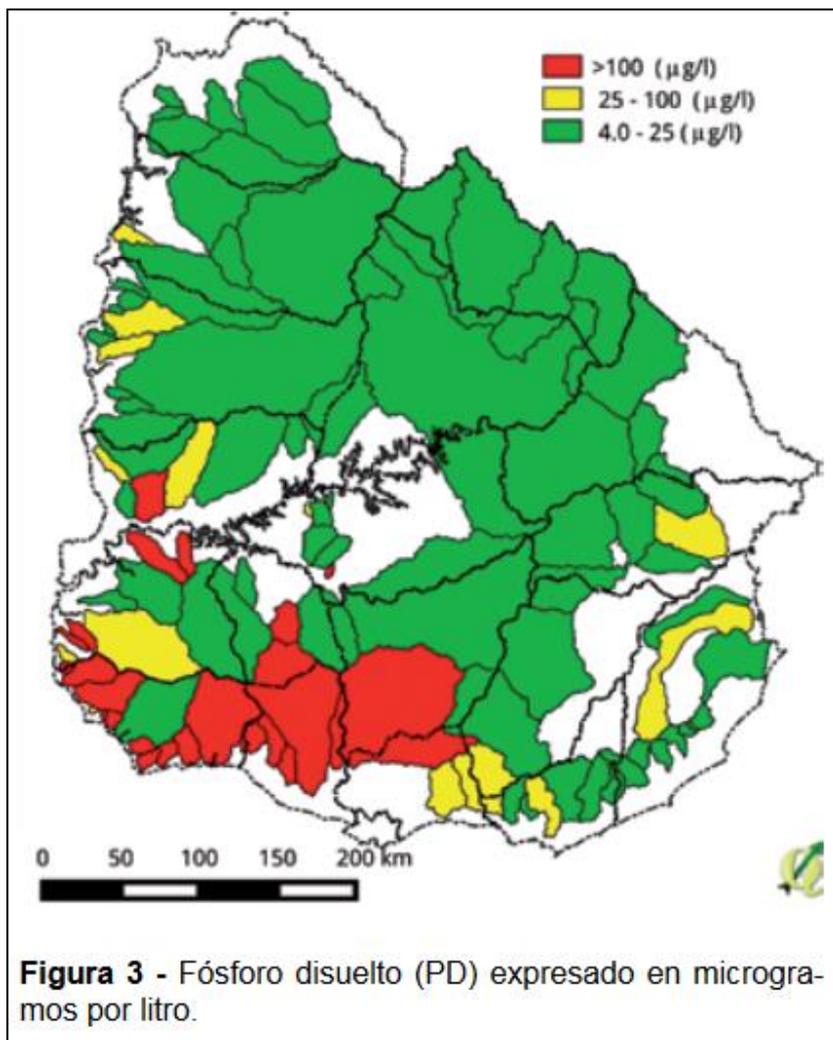


# Introducción

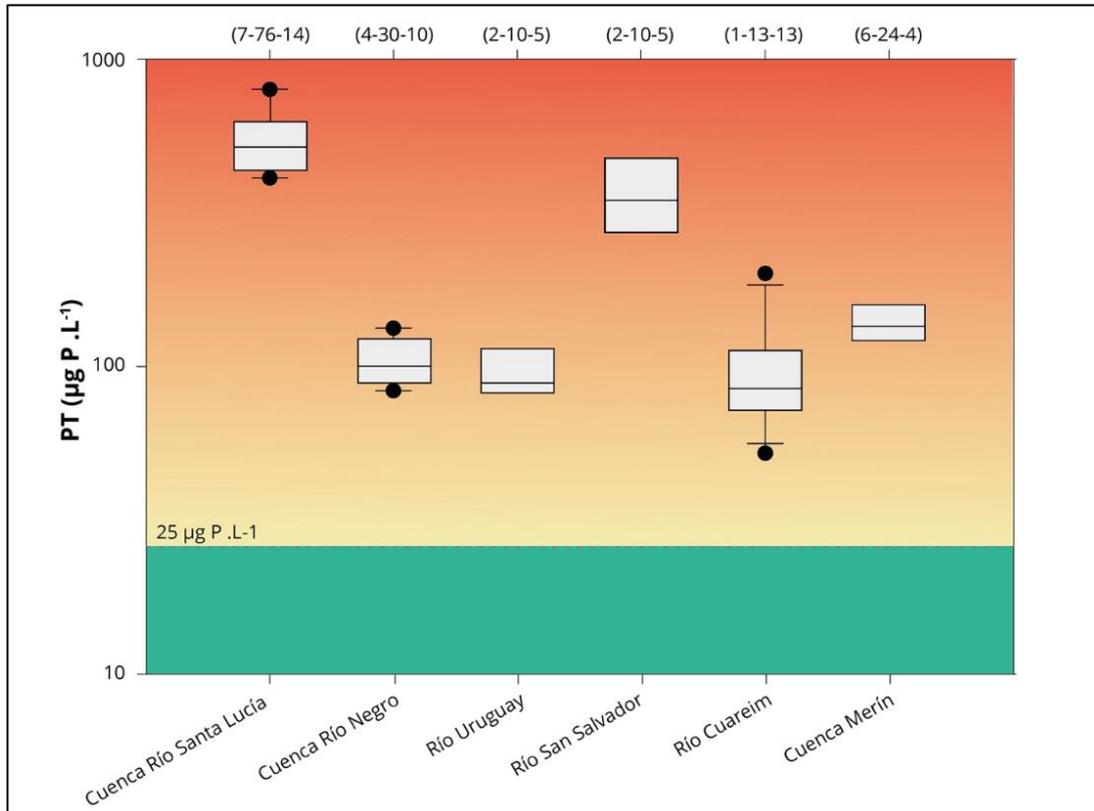
- Importancia del fósforo
  - Macronutriente esencial y limitante
  - Impacto ambiental – calidad de aguas
- Diagnóstico
  - Disponibilidad de P en suelos del litoral
  - Contaminante de aguas superficiales
- Alternativas de manejo eficiente del P
  - Factores a considerar
  - Proyecto Dinámica de Nutrientes en Sistemas Agrícola Ganaderos ★

# Diagnóstico

# Calidad del agua en cuencas de uso agropecuario - P disuelto en agua (2014)



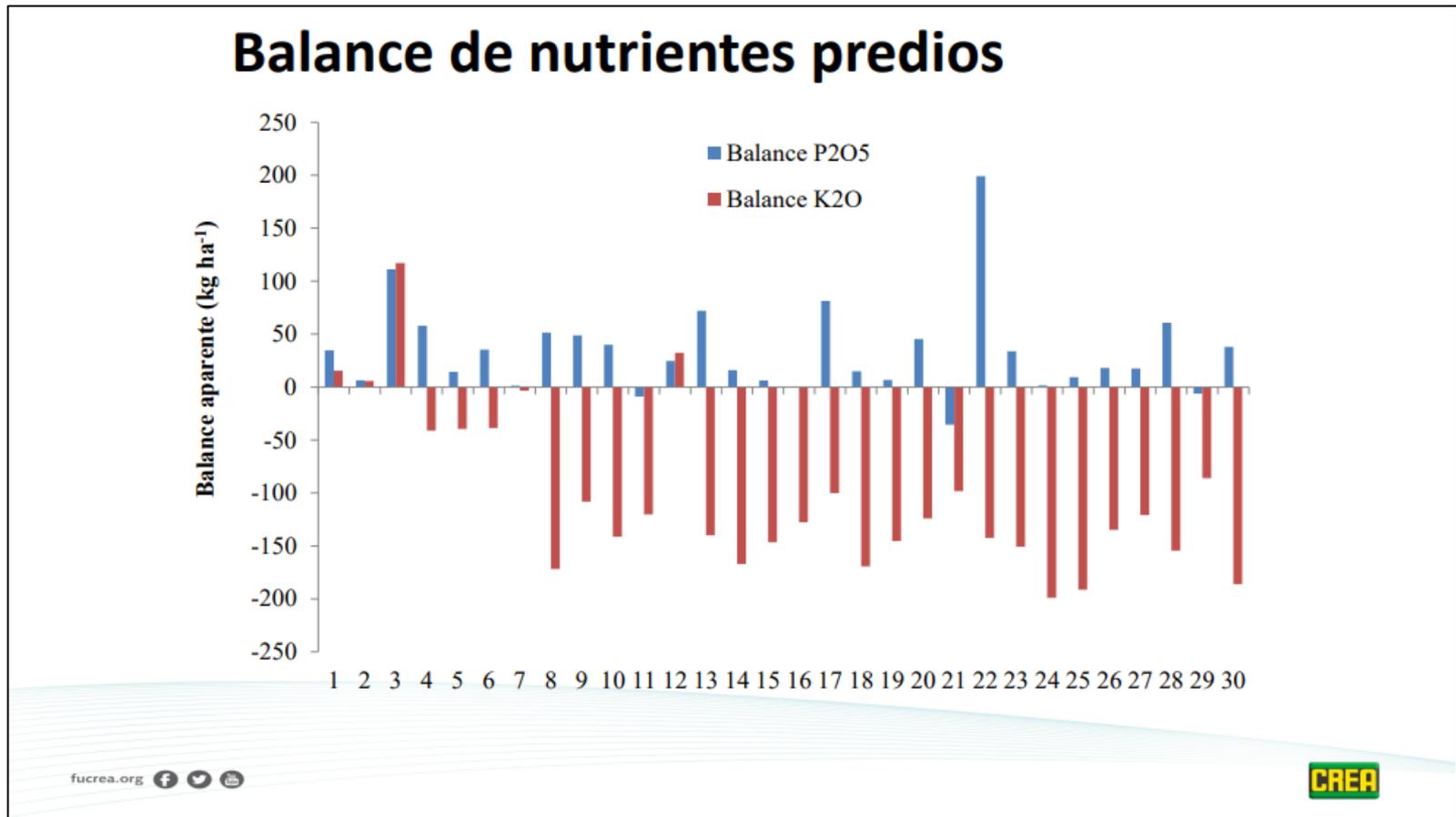
# P total en ecosistemas acuáticos (2020)



- Niveles excesivos de fósforo en agua
- Consenso sobre la actividad agropecuaria como una de las fuentes de contaminación

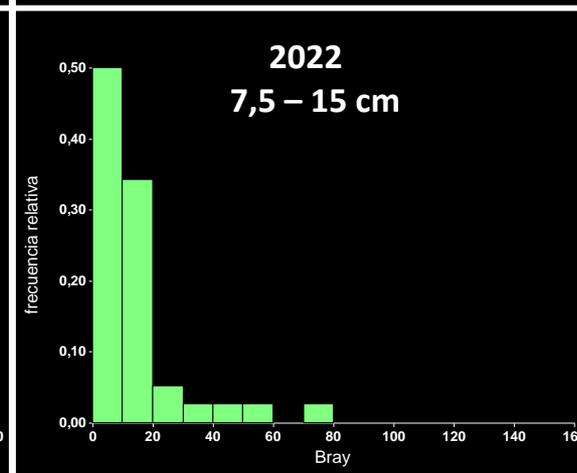
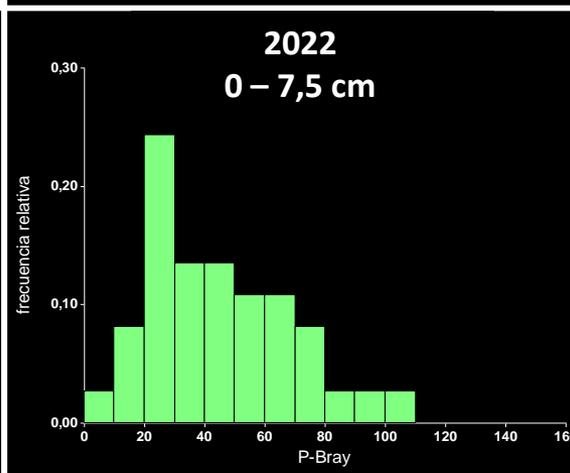
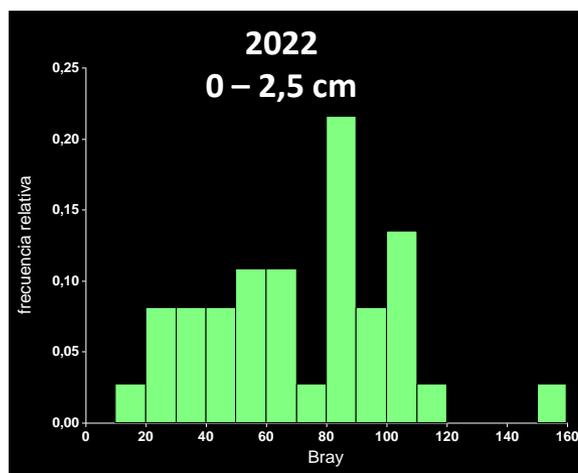
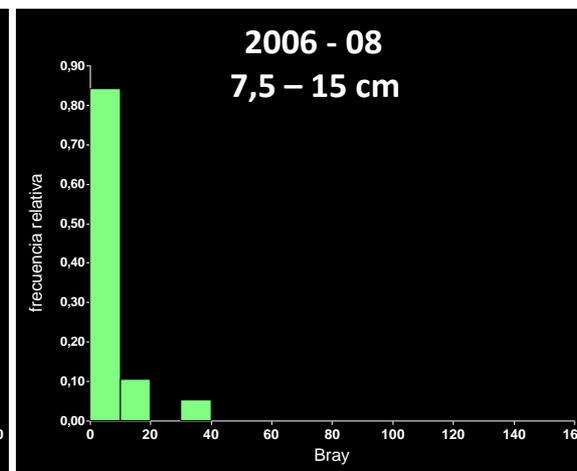
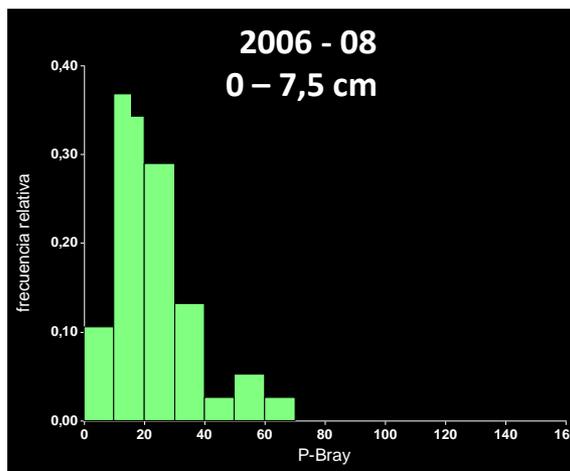
25 ppm límite establecido en la normativa, síntomas de eutrofización evidentes a partir de 50-60 ppm

# Balances positivos de P en sistemas agrícolas



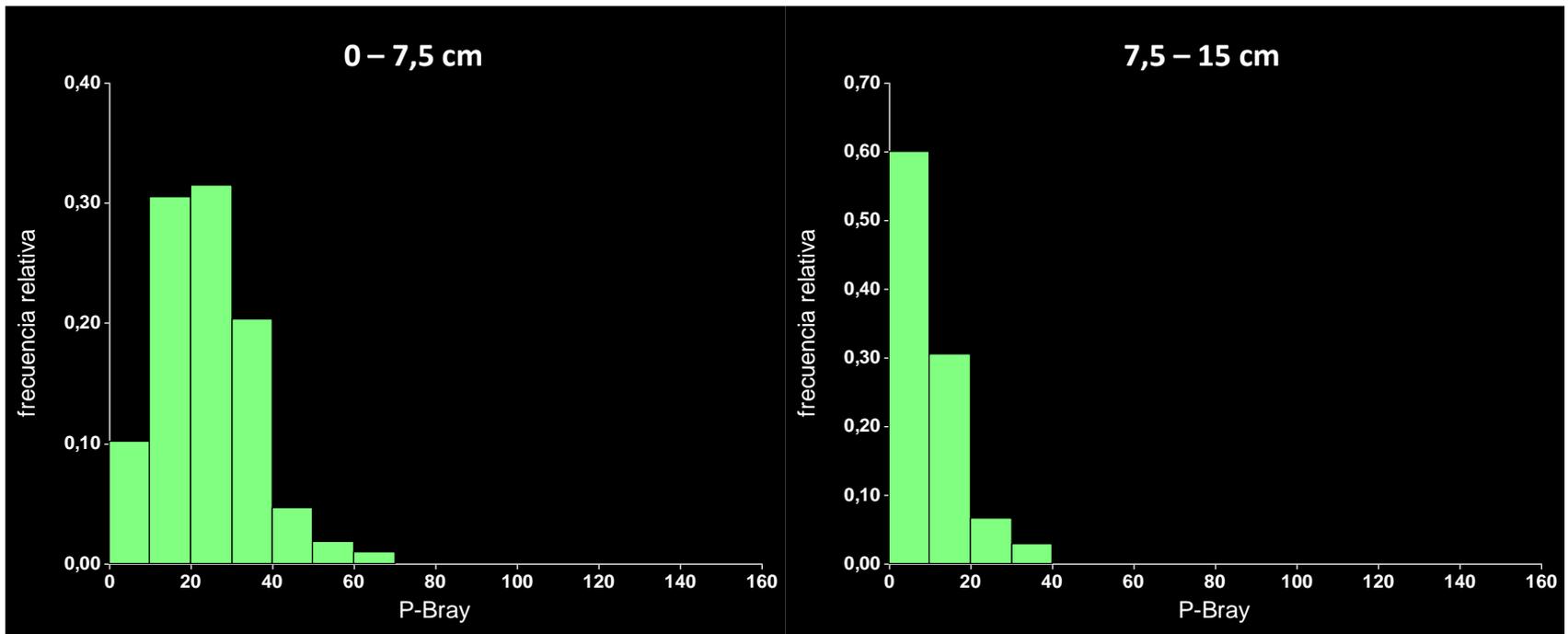
# Acumulación y estratificación de P en el suelo (1)

P-Bray en suelos  
de sistemas lecheros  
**Conaprole – INIA**  
**2006-08 y 2022**

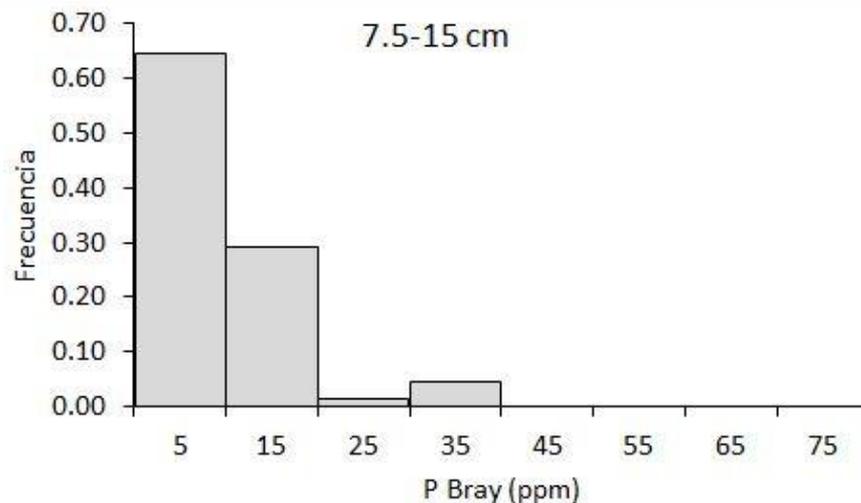
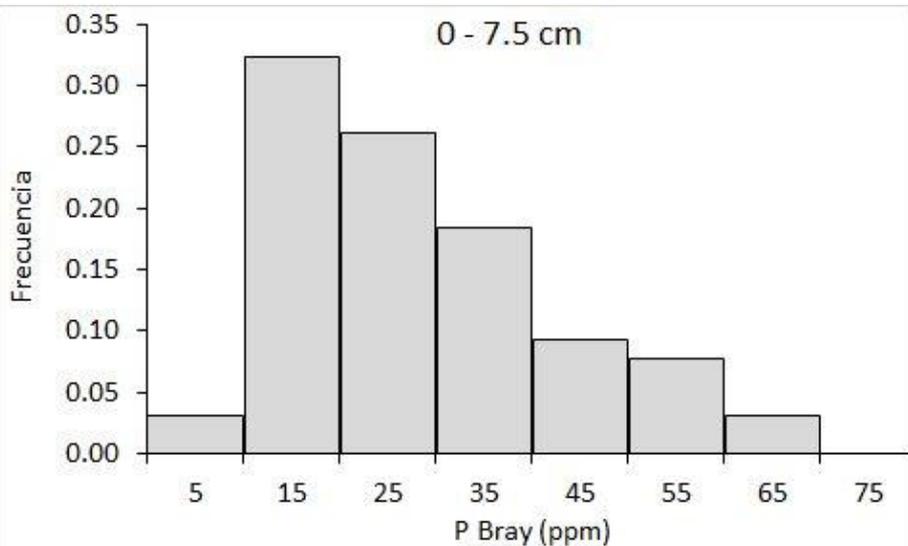


# Acumulación y estratificación de P en el suelo (2)

P-Bray en suelos de sistemas agrícolas  
AUSID – INIA, 2009 y 2010



# Acumulación y estratificación de P en el suelo (3)



Chacras AUSID - Santiago Álvarez

Primavera 2019, barbecho previo a siembra de soja

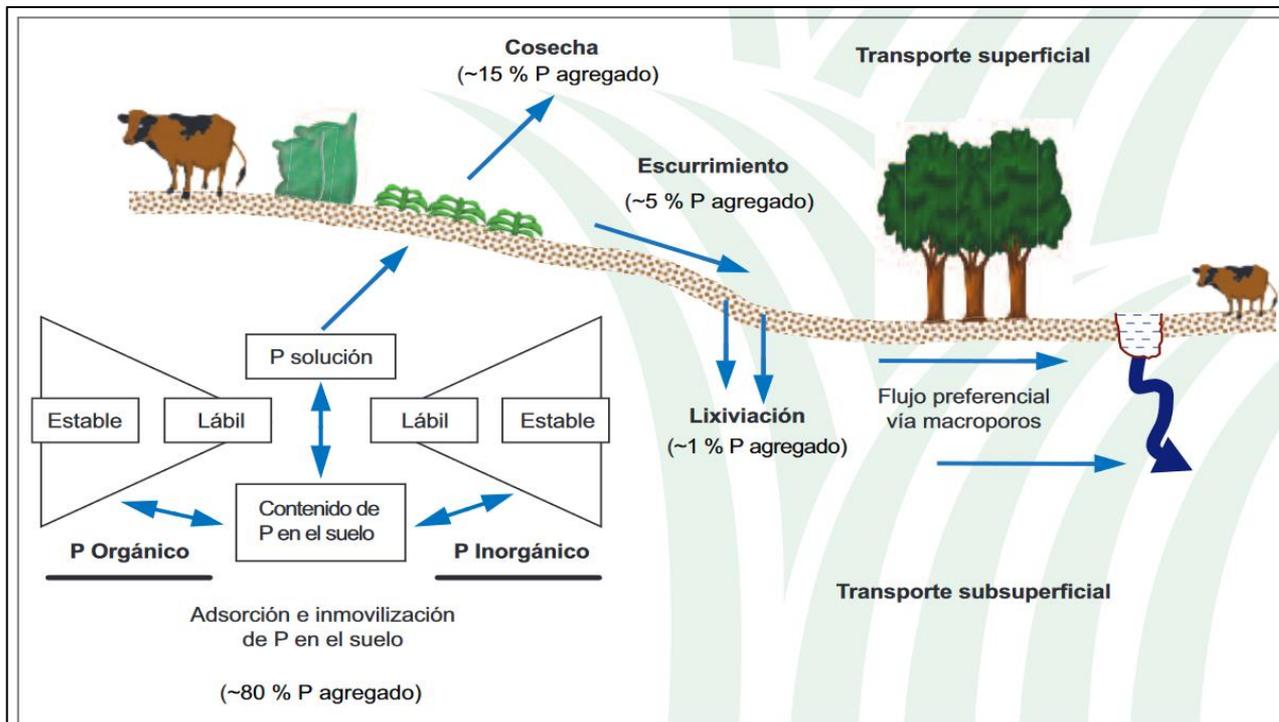
65 casos

➤ Nutriente poco móvil, estratificación por acumulación en superficie sin laboreo

# Destino del P en la agricultura y el ambiente

Contaminación de aguas por P va a depender de:

- Factores de fuente
- X
- Factores de transporte: procesos de erosión y escurrimiento (hidrología)



## Dos formas de pérdida:

- Erosión
  - P particulado
  - Control erosión
- Escorrimento
  - P soluble (+ disponible)
  - Ocurre aún sin erosión
  - Maximizado por la estratificación

Sharpley (2010)

# Pérdidas de P por erosión y escurrimiento en sistemas agrícola-ganaderos de Uruguay

- Carlos Perdomo y equipo: trabajos en EEMAC y Cuenca del Santa Lucía
- Carolina Lizarralde: mediciones en Estanzuela

Carlos Perdomo. Pérdidas de fósforo desde suelos agrícolas hacia aguas superficiales: resultados preliminares para Uruguay y posibles medidas de manejo para mitigar los riesgos. VII Encuentro de la SUCS 2016. <http://sucs.org.uy/pdf/Encuentro2016/Perdomo.pdf>

Lizarralde et al. 2016 Revista INIA N° 46. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6134/1/Revista-INIA-Uruguay-n.-46.-p.-41-43.-2016.pdf>

# Barreto et al.

## Ensayo EEMAC: Parte de la Tesis de Doctorado de Patricia Barreto

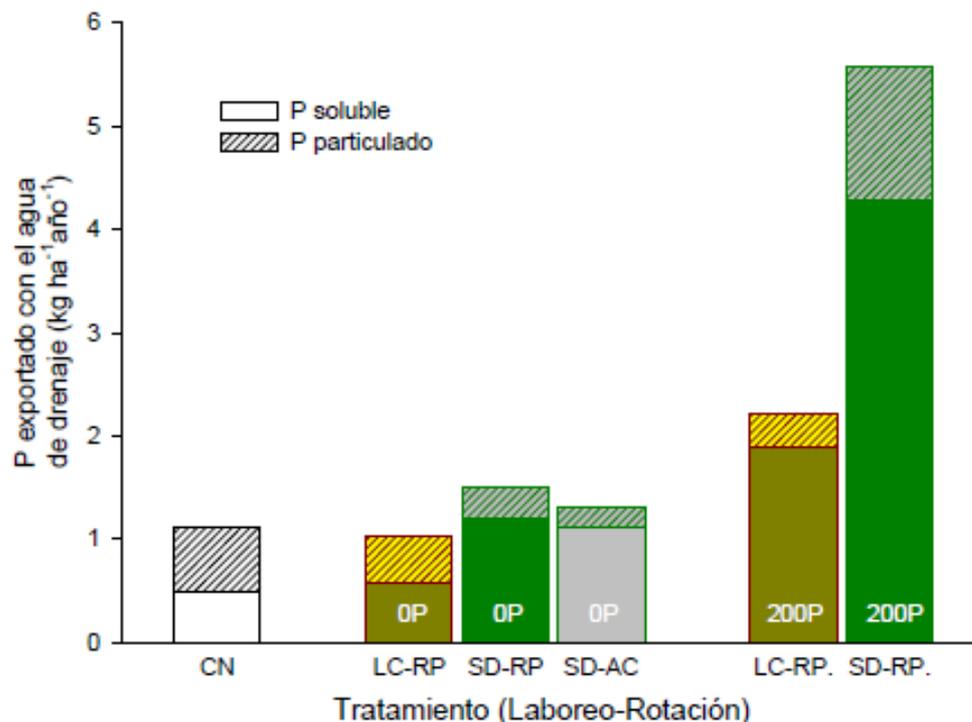
Ensayo de largo plazo de O. Ernst

### Tratamientos:

- Lab. Convencional (LC) vs Siembra Directa (SD)
- Rot. Pasturas (RP) vs Agricultura Continua (AC)

### Resultados de un año

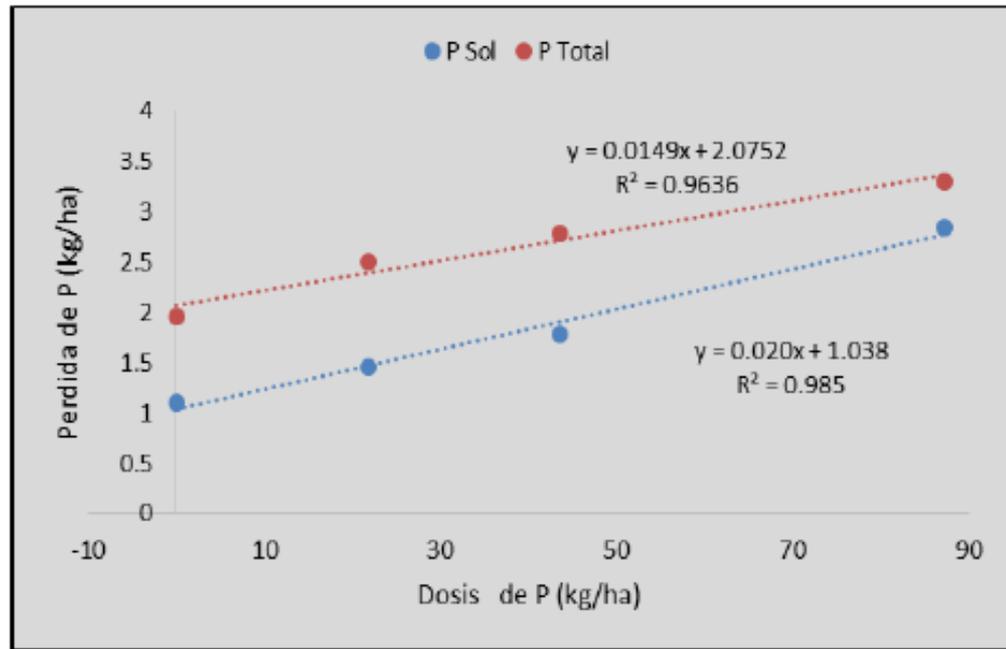
- Altas dosis de P > mayores pérdidas de P Total en el agua de escurrimiento.
- Mayores pérdidas bajo forma de P soluble, especialmente bajo SD => fertilización en superficie.



# Piñeiro et al.

## Perdida anual de P: Sitio “Candil” 2014

- P Bray 1 (0-2,5 cm) = 34 mg kg<sup>-1</sup>
- Lluvia: 1677 mm (INUMET Florida)
- Escurrimiento:
  - “observado”: 321 mm
  - estimado: 308-347 mm (*Numero de Curva*)
- P Soluble
  - Perdida del suelo 1,0 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>
  - % Perdida del fertilizante 2,0 %
- P Total
  - Perdida del suelo 2,1 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>
  - % Perdida del fertilizante 1,5 %

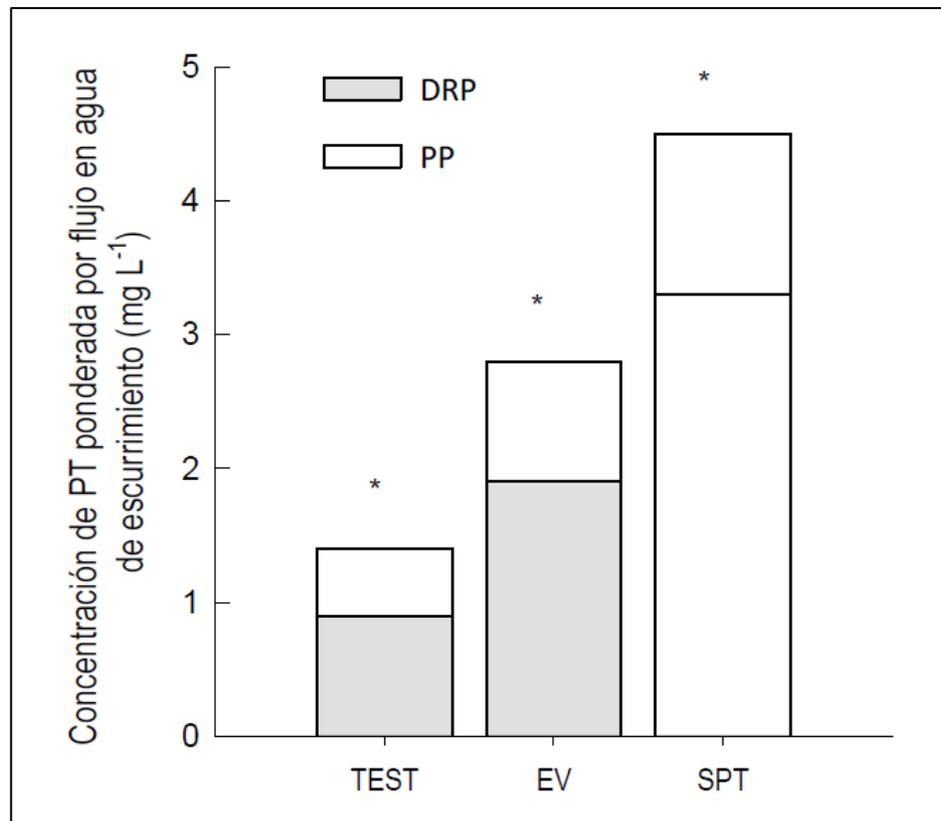


Maestría Verónica Piñeiro  
Fertilización en superficie

# De Lucca 2020

Pérdidas de fósforo por escorrentía desde el suelo, fertilizante y estiércol: cuantificación y distribución en el tiempo. Tesis de Maestría

- Pradera mixta bajo lluvia natural: testigo, 250 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha como superfosfato triple, 250 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha como estiércol de vaca



DRP: Fósforo soluble reactivo  
PP: Fósforo particulado

- Las mayores pérdidas de P en el escurrimiento se observaron en los primeros eventos de escurrimiento post-aplicación de las fuentes fosfatadas (= Hart et al., 2004)
- 75% del PT perdido fue en forma soluble
- Coeficiente de exportación para SPT 5%

# Lizarralde et al. 2016: Rotaciones LE

- Dos tratamientos contrastantes:
  - Agricultura continua P Bray 22,1 ppm
  - Agricultura pastura P Bray 17,0 ppm
- Escurrimiento medido con simulador de lluvia (*Cornell Sprinkler*)
- Invierno 2015 sobre rastrojo de sorgo

**Cuadro 1** - Resultados de los ensayos de simulación de lluvia: tasa de infiltración del suelo y concentración de nutrientes en agua de escurrimiento ( $p < 0,05$ ).

	Agricultura continua	Agricultura Pastura
Tasa de infiltración (mm/hora)	42a	60b
Fósforo total (mg/L)	0,46a	0,37a
Fósforo soluble (mg/L)	0,25a	0,23a
Nitrógeno total (mg/L)	1,24a	0,51b
Nitratos (mg/L)	0,77a	0,63a

# En resumen

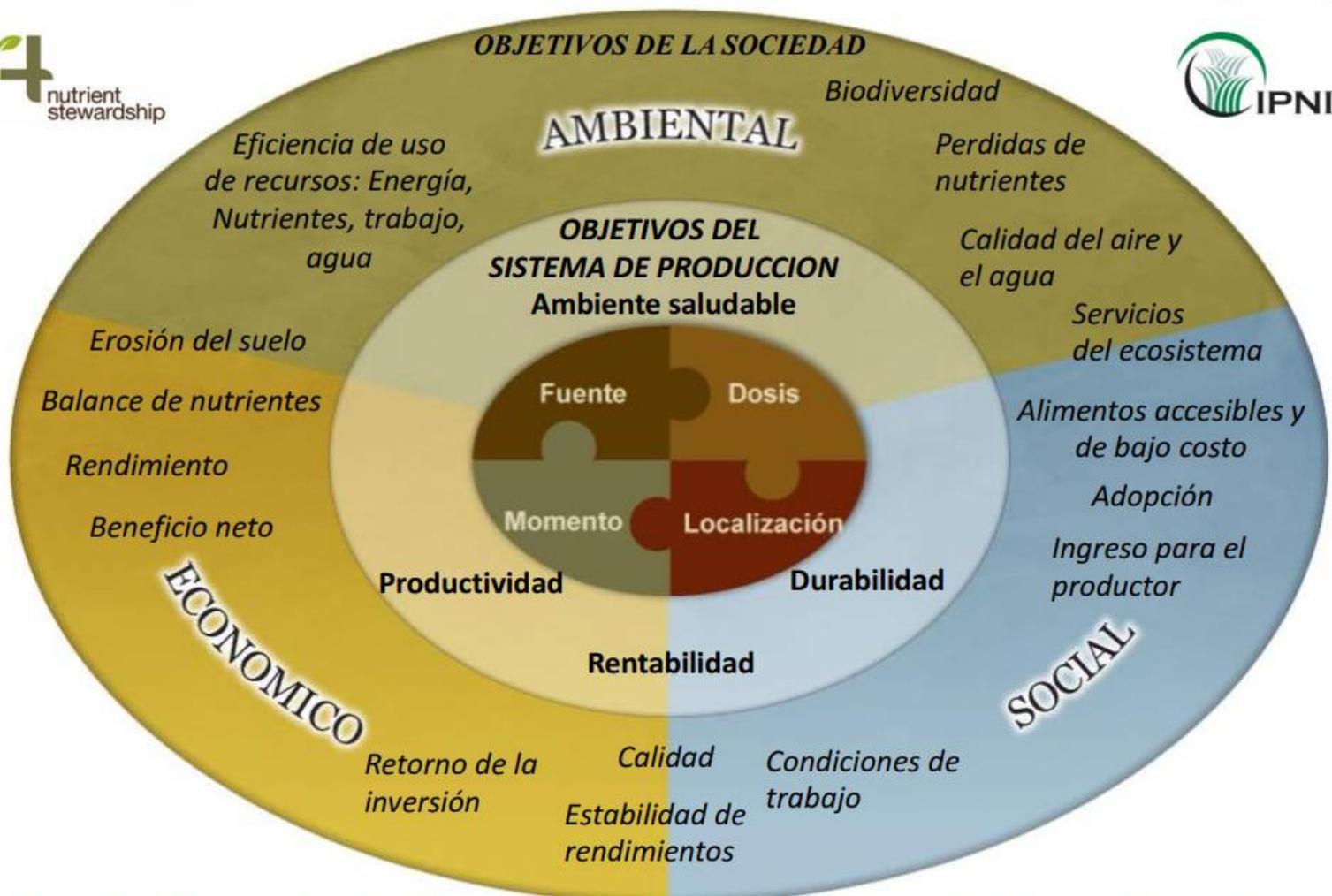
- Dos formas de pérdidas de P:
  - Particulado:
    - Pérdidas de partículas de suelo
    - Asociado a erosión
    - Fortaleza de sistemas de SD
  - Disuelto:
    - Pérdidas por escurrimiento (poco móvil ≠ inmóvil)
    - Asociado a estratificación
    - Debilidad de sistemas de SD (mayor proporción se pierde como PS)
- Controlar erosión es necesario, pero no suficiente
- Acumulación en superficie = alto riesgo de pérdida
  - No es la única determinante (Factores de transporte)
  - Pero la fuente está

# Alternativas de Manejo

# Mejores prácticas de manejo para controlar o reducir las pérdidas de P

- **Ajuste de la fertilización (4R) ★**
- Balances de P neutros o negativos
- Reducir erosión (< transporte P particulado)
- Mantener/recuperar zonas buffer o riparias
- Extracción de P del suelo con cultivos (minería vegetativa)
- Aplicación de productos químicos para disminuir la disponibilidad de P (ej: cloruro férrico)
- Laboreo esporádico para eliminar estratificación

# Los 4 Requisitos del Manejo Responsable de Nutrientes (4Rs)



**Fuente Correcta a la Dosis Correcta, en el Momento Correcto, y de la Forma Correcta**

# Dosis

- Definir en función de criterios objetivos según esquema de análisis:
  - Manejo por suficiencia
  - Manejo por balance
- Evitar sobre fertilizar
- No fertilizar sitios con exceso para disminuir contenidos excesivos de P

# Manejo por suficiencia – fertilización del cultivo

- Información necesaria:
  - Disponibilidad de nutrientes (muestreo)
  - Niveles críticos
  - Dosis a agregar
- Información nacional disponible para cultivos y pasturas.

Cultivo	Nivel Crítico (P Bray I)	Fuente
Soja	10-12 ppm	Morón (2004)
Trigo	13-14 ppm	Bordoli (2001)
Trigo	17 ppm	Pérez (1981)*
Cebada	11-13 ppm	Capurro et al. (1982)



\* Rabuffetti (2017)

# Dosis a agregar: Equivalente Fertilizante

## Fijación o retención de P

- Principal causa de la “ineficiencia” del fertilizante;
- Factores de suelo que afectan:
  - cantidad y tipo de arcillas, óxidos de Fe y Al, pH.
- Puede modificarse por historial de fertilización con P.
  - Saturación de puntos de retención
- Determinación en el laboratorio:
  - Isotermas de adsorción
  - Índices de retención de P.

## Equivalente Fertilizante (EF)

- Es la dosis para incrementar el análisis del suelo en una unidad ( $\rightarrow$  kg  $P_2O_5$  / ha / ppm Bray);
- Se determina con experimentos a campo;
- Alternativamente, se pueden caracterizar y comparar suelos con ensayos en macetas:
  - Más prácticos y rápidos,
  - Pero, ¿tiene precisión esta estimación de EF respecto al EF “real”?

# Equivalente Fertilizante



Objetivo general: establecer una metodología para la estimación confiable del **equivalente fertilizante** a nivel de chacra.

Objetivos específicos:

1. Obtener relaciones cuantitativas para estimar el EF a campo a partir del método macetero, índice de retención de P, y propiedades químicas;
2. Estudiar el efecto de la historia de fertilización sobre la fijación de P y el EF.

## Experimentos:

- Suelos de 2 materiales contrastantes: Basamento cristalino y sedimentos cuaternarios;
- Experimentos a campo: fertilización al voleo (con supertriple). Tiempo = 6 meses;
- Experimentos maceteros: “fertilización” con solución de  $K_2PO_4$ . Tiempo = 45 días;
- Determinaciones de laboratorio:
  - P-Bray y P-cítrico
  - Índice de retención de P.
  - pH, textura, etc.

# Fertilización al Sistema – Balance de nutrientes

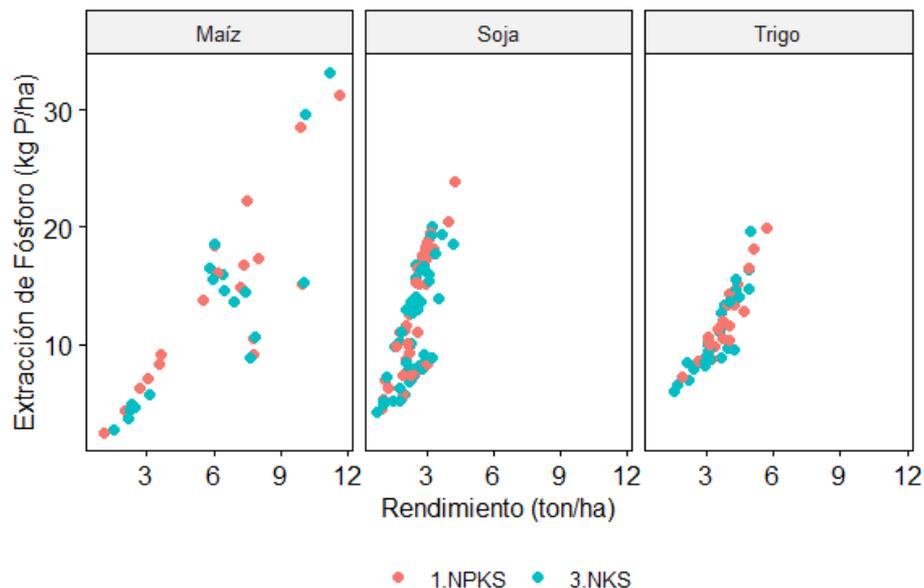
- Útil para nutrientes poco móviles como P y K
- Busca mantener la disponibilidad de nutrientes / evitar la degradación por pérdida de fertilidad
- Información necesaria:
  - Rango objetivo: en función del nivel crítico, levemente superior
  - Extracción de los cultivos: balance aparente
  - Evolución en suelo
  - Relaciones balances – disponibilidad

# Extracción de P por cultivo

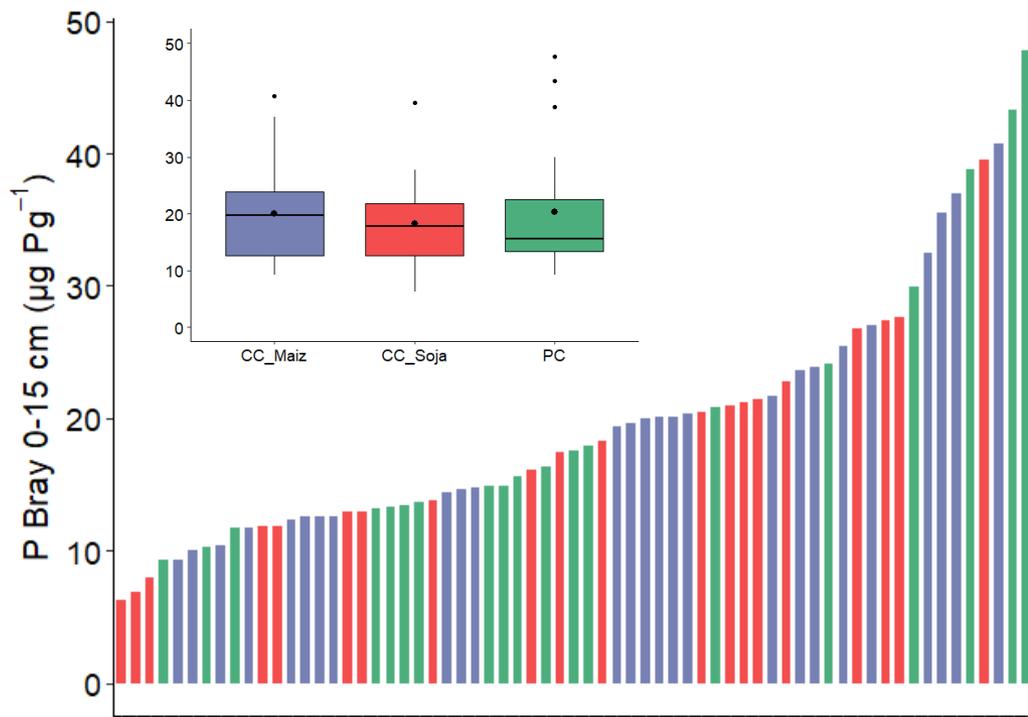


Cultivo	N° cultivos	Extracción P (kg/ton)	IPNI (kg/ton)
Soja	15	4,99 ± 1,24	6,20
Maíz	6	2,21 ± 0,55	3,04
Trigo	9	3,23 ± 0,40	4,00

Rendimiento en base seca (0% humedad), media ± sd en sitios INIA-Nutrien. (IPNI)



# ¿Es necesario fertilizar siempre?

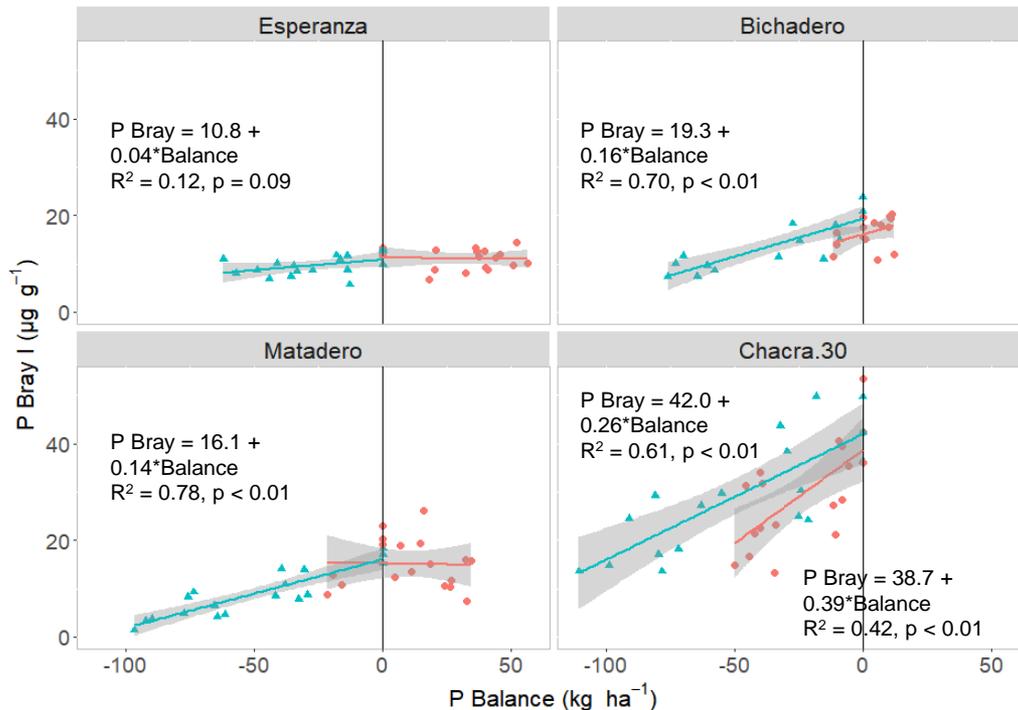


- 50% de los casos P Bray > 18 ppm
- 43% de los casos con + 20 ppm
- 12% + 30 ppm

Cultivo	Nivel Crítico (P Bray I)	Fuente
Soja	10-12 ppm	Morón (2004)
Trigo	13-14 ppm	Bordoli (2001)
Trigo	17 ppm	Pérez (1981)*
Cebada	11-13 ppm	Capurro et al. (1982)

Chacras AUSID- Santiago Álvarez

# No fertilizar sitios con exceso de P

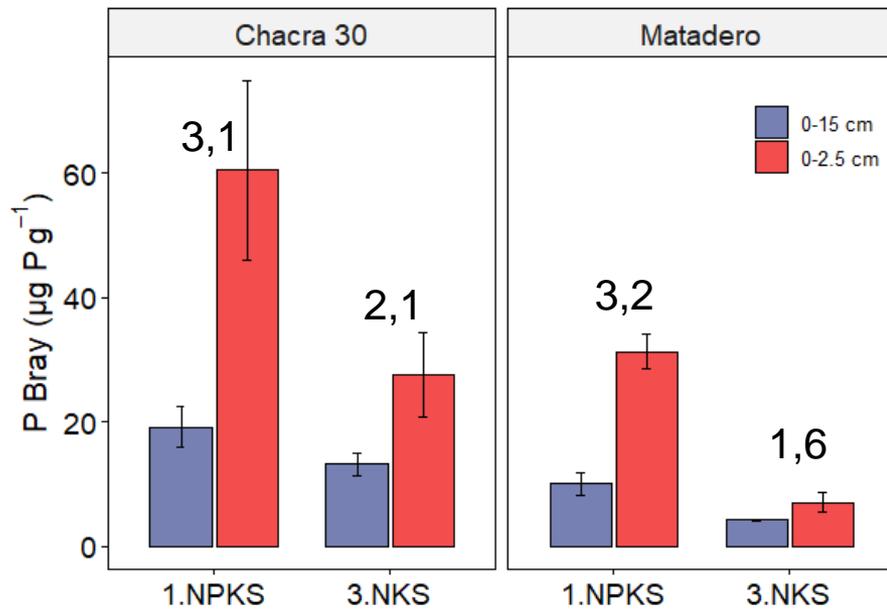


## Balances negativos:

- Disminución disponibilidad
  - Dependiente del suelo:
    - 1 ppm por cada 9 a 16 (56) kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha
- No fertilizar (o subfertilizar) útil para disminuir disponibilidad
- Pero la disminución puede ser rápida

➤ Necesidad de monitorear evolución

# Factor de estratificación de P



## Factor de estratificación (FE)

$$FE = \frac{P \text{ Bray1 (0 - 2,5 cm)}}{P \text{ Bray1 (0 - 15cm)}}$$

$$P \text{ Bray1 (0-2,5 cm)} = FE \times P \text{ Bray1 (0-15cm)}$$

### FE: Resultados de 32 Sitios:

- Promedio=4,0
- Max. =8,6
- Min.=1,3

Perdomo 2016

Muestreo otoño 2022

Sin fertilizar disminuyó el nivel de P disponible y también su estratificación

# Fuente

## Fertilizantes especiales

Fertilizantes diferenciados respecto a los fertilizantes *commodities* por innovaciones basadas en distintos mecanismos o procesos:

- Cubiertas o “coatings” que retardan / enlentecen el contacto del fertilizante con el suelo;
- Microgranulación que aumenta la superficie de contacto del fertilizante con el suelo;
- Formulación con bioestimulantes (p. ej., sustancias húmicas, aminoácidos, etc.);
- Otros ...
- Roca fosfórica parcialmente acidulada, donde el P se solubiliza a través de la reacción con la acidez del suelo (fosforita, Hyperfos).

# Fuente

## Fertilizantes con innovaciones



Objetivo general: Conocer la respuesta a P y la eficiencia agronómica del P de fertilizantes *especiales* en comparación con fuentes tipo *commodities*.

Objetivos específicos:

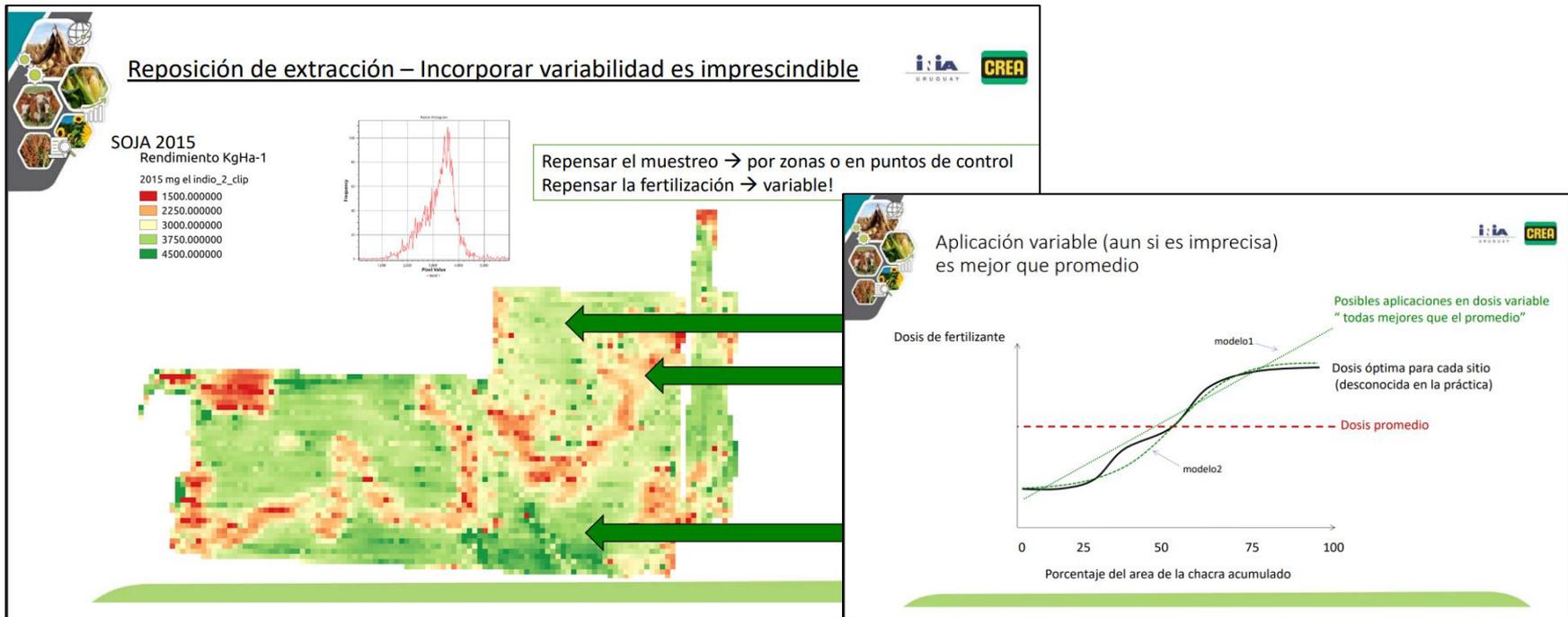
1. Estudiar la respuesta a P y validar los umbrales establecidos en el sistema OptiFert-P para gramíneas anuales;
2. Estudiar la eficiencia agronómica de los fertilizantes y relacionar con propiedades de suelo;
3. Estudiar el efecto de la aplicación al SURCO vs VOLEO para el fertilizante soluble commodity (testigo).

Experimentos:	
Cultivo a usar	Raigrás anual.
Método de siembra	Siembra directa
Localización del fertilizante	Todos los fertilizantes al SURCO. El fertilizante líquido CHORREADO; Además, el fertilizante testigo al VOLEO.
Manejo de N	Uniforme en cada sitio y con objetivo de asegurar muy alta disponibilidad de N (~90 % requerimiento para máximo potencial). Urea al voleo. 30 kg N a la siembra; 3 refertilizaciones con 40 kg N.
Manejo de K y S	Uniforme en cada sitio y con objetivo de asegurar alta disponibilidad.

# Lugar

- Variabilidad espacial
- Localización (surco vs voleo)

# Considerar variabilidad espacial para evitar zonas de exceso o deficiencia



- Fertilización fija con rendimientos variables = zonas de acumulación
- Distancia de esas zonas a desagües/cursos de agua puede agravar el problema

# ¿Fertilización al voleo vs al surco?

## Respuesta agronómica

AUSID y Facultad de Agronomía  
(Martín Bordoli):

- Trigo, años 1997, 1998 y 1999
- Total 21 experimentos
- P-Bray (0-20cm) mayor a 7 ppm

Resultados / conclusiones:

- La fertilización al surco no aumentó los rendimientos respecto a la aplicación al voleo.

Barbagelata y Melchiori (2010), Entre Ríos, Argentina:

- Trigo, años 2006 y 2007
- Total 19 experimentos
- P-Bray (0-20cm) 4 – 17 ppm
- Resultados / conclusiones:
- No hubo diferencias entre voleo y al surco

Posibles razones:

- . Bajo contacto del fertilizante con el suelo, que resulta en menor fijación de P
- . La primera capa debajo del *mulch* es una zona de alta actividad radicular

# ¿Fertilización al voleo vs al surco?

## Respuesta ambiental



- Enterrar el fertilizante por debajo de la zona de mezclado (~3 cm) disminuye pérdidas (Yuan et al., 2018; Smith et al., 2016)
- Es importante cuantificar la magnitud del cambio a nivel nacional
- Experimento en parcelas de escurrimiento: fertilización al surco vs al voleo



# Momento

- Pérdidas asociadas a eventos de escurrimiento con aplicaciones recientes
- Difícil controlar intervalo aplicación – lluvia/escurrimiento
- Minimizar intervalo fertilización – absorción
  - Evitar fertilización anticipada
- ¿Uso de cultivos de servicio como cultivo trampa? 
- Efectividad (ambiental y agronómica)
- Sincronización oferta-demanda del cultivo de renta

# Resumen

- En SD mayores pérdidas de P soluble
- Control de erosión necesario, pero no suficiente
- Evitar acumulación y estratificación en superficie
- Ajuste de la fertilización – 4R
  - Dosis correcta
    - En base a diagnóstico objetivo, evitar sobrefertilizar
    - Monitorear evolución
      - *Equivalente fertilizante*
      - *(Coeficientes de extracción)*
  - Fuente correcta
    - *Fuentes especiales*
  - Lugar correcto
    - Considerar variabilidad espacial
    - Incorporar el fertilizante (*cuantificar efecto*)
  - Momento correcto
    - Evitar fertilizaciones anticipadas
    - *Cultivos de servicio*

Muchas gracias

[anunez@inia.org.uy](mailto:anunez@inia.org.uy)

[aquincke@inia.org.uy](mailto:aquincke@inia.org.uy)