

Protocolo de Ensayo Regional CREA SSF

Productos Biológicos en Soja — Red multiambiente

Red de ensayos — CREA SSF (Sur de Sta Fe-Sudeste Cba-Norte de Bs As)

1. Objetivo

Cuantificar el efecto de distintos productos biológicos para mitigar estreses abióticos aplicados sobre el cultivo de soja (bioestimulantes, promotores de crecimiento y biocontroladores) sobre el rendimiento (kg/ha), con capacidad estadística de detectar una diferencia mínima significativa (DMS) de 200 a 250 kg/ha frente al testigo, usando una red de 6 ambientes productivos de la región CREA SSF contrastantes, con un diseño de bloques por sitio y análisis combinado multiambiental (MET).

El objetivo no es solo la eficacia promedio de cada producto sobre el testigo, sino también su estabilidad: si hay respuesta diferencial por ambiente, tipo de suelo y régimen hídrico, o si es sitio-específica. ¿En qué ambiente y bajo qué condición de estrés aparece la respuesta?

DMS alcanzable combinando ambientes (potencia 80%), según CV y número de sitios

4 repeticiones por sitio en todos los casos. n del análisis combinado = $4 \times N^\circ$ de ambientes.

CV del ensayo	4 ambientes (n=16)	5 ambientes (n=20)	6 ambientes (n=24)
5%	188 kg/ha	168 kg/ha	154 kg/ha
6%	226 kg/ha	202 kg/ha	184 kg/ha
7%	263 kg/ha	236 kg/ha	215 kg/ha
8%	301 kg/ha	269 kg/ha	246 kg/ha
10%	376 kg/ha	337 kg/ha	307 kg/ha
12%	451 kg/ha	404 kg/ha	369 kg/ha

Conclusión clave: con 6 ambientes, un CV residual de 7-8% (habitual en un ensayo de soja bien manejado, sin necesitar ajuste agresivo por covariable) alcanza DMS de 215-246 kg/ha, dentro del objetivo. Con 4 ambientes, se necesita bajar el CV a 5-6% (exige covariable y manejo más estricto) para quedar en 188-226 kg/ha. Regla práctica: cada ambiente adicional relaja la exigencia de CV por sitio — por eso conviene priorizar sumar ambientes (ir a 5-6) antes que forzar repeticiones dentro de un mismo sitio.

Diseño experimental

Estructura

- Diseño de base por sitio: Bloques Completos al Azar (DBCA), 4 repeticiones, con 8 tratamientos (gl error por sitio = 21, adecuado).
- Alternativa si se supera 8-9 tratamientos o el lote muestra heterogeneidad de suelo marcada: bloques incompletos (diseño alpha-lattice), que reduce el tamaño efectivo de bloque y controla mejor esa heterogeneidad sin aumentar repeticiones.
- 6 ambientes productivos, seleccionados para maximizar el contraste de potencial de rendimiento, tipo de suelo y disponibilidad hídrica (sección 5).
- Unidad experimental: parcela de $\approx 2,1 \times 10$ m (≈ 21 m²), cosecha de los 2 surcos centrales sobre parcela completa.

- n total del análisis combinado por tratamiento: 4 repeticiones × N° de ambientes (16 a 24, según sección 2.2).

Momento y criterio de aplicación

Aplicación en forma foliar (bioestimulantes, biocontroladores)

Ventana fenológica: R1-R5 (floración a llenado de granos, escala Fehr & Caviness) para productos orientados a mitigar estrés abiótico reproductivo, con foco en R3-R5 (formación y llenado de vainas), período de mayor definición del rendimiento en soja.

- Monitoreo desde V4: balance hídrico seriado, actualizado semanalmente con datos de estación meteorológica, capacidad de agua útil del suelo y pronóstico de precipitación a 10-15 días.
- DPV (déficit de presión de vapor): cálculo diario. Alerta si se proyecta DPV sostenido > 1,8-2,0 kPa en los próximos 10-15 días durante R1-R5.
- Golpe de calor: alerta si se pronostica $T_{max} > 33-34^{\circ}\text{C}$ durante floración-llenado de grano (R1-R5) dentro de la ventana de 10-15 días.
- Regla de decisión: cuando el monitoreo indique probabilidad alta (>60-70%) de ocurrencia de estrés hídrico o térmico en los siguientes 10-15 días, se aplica el producto foliar preventivo en ese sitio. La fecha puede diferir entre sitios y se registra como covariable, sin forzar una fecha calendario común.
- Registro del estrés real ocurrido (DPV máximo, días con $T_{max} > 33^{\circ}\text{C}$, balance hídrico real), independientemente del pronóstico, para analizar si la respuesta al producto es proporcional a la intensidad del estrés.

Variables a medir

Variable principal mandatoria

Rendimiento (kg/ha), ajustado a 13% de humedad.

Componentes de rendimiento y calidad de grano

- Plantas/m² (a cosecha)
- Peso de mil granos (PMG)
- Proteína y aceite en grano (%)

Variables fisiológicas complementarias (mecanismo de acción)

- Contenido relativo de agua foliar o potencial hídrico en el pico del estrés (definir método según disponibilidad: cámara de presión o porómetro).
- Temperatura de canopeo en floración (cámara termográfica o pirómetro láser).
- SPAD / contenido de clorofila y nitrógeno foliar (%).
- GreenSeeker, NDVI.

Variables ambientales por sitio

- DPV diario, T_{max} diaria, precipitación diaria, balance hídrico seriado.
- Fecha real de aplicación, fecha de floración (R1), fecha de estrés detectado.

Análisis estadístico

Modelo mixto multiambiental (MET), con ajuste por covariable:

$$\text{Rendimiento} = \mu + \text{Tratamiento} + \text{Ambiente}(\text{aleatorio}) + \text{Tratamiento} \times \text{Ambiente}(\text{aleatorio}) + \text{Bloque}(\text{Ambiente}, \text{aleatorio}) + \beta \cdot \text{Covariable} + \varepsilon$$

- Tratamiento: efecto fijo.
- Ambiente: efecto aleatorio (para inferir sobre la región de recomendación, no solo sobre los 4-6 sitios muestreados).
- Tratamiento × Ambiente: efecto aleatorio — indica si la respuesta de cada bioinsumo es consistente entre ambientes o depende del potencial/condición hídrica del sitio.
- Bloque anidado en Ambiente: efecto aleatorio.
- Covariable (NDVI, biomasa o stand pre-tratamiento): efecto fijo, para reducir la varianza residual según lo indicado en la sección 2.2.

Interacción tratamiento × intensidad de estrés

Regresión del efecto del tratamiento (diferencia Trat–Testigo por sitio) contra la intensidad de estrés real registrada (DPV máximo, días con $T_{\max} > 33^{\circ}\text{C}$, déficit hídrico acumulado en R1-R5), para evaluar si los productos foliares del Grupo B responden más cuanto más severo es el estrés.

Análisis complementario de estabilidad

Si la interacción Tratamiento×Ambiente resulta significativa, complementar con AMMI o biplot GGE para identificar qué bioinsumos son estables entre ambientes y cuáles tienen desempeño sitio-específico (ej.: mejor respuesta en ambientes restrictivos vs. de alto potencial).

10. Limitaciones a comunicar de antemano

- La DMS de 200-250 kg/ha se alcanza en el análisis combinado de los ambientes, no necesariamente en cada sitio individual.
- El CV residual exigido depende directamente del número de ambientes: con 6 ambientes alcanza con CV 7-8% (habitual en soja bien manejada); con 4 ambientes se requiere bajar a 5-6% (exige la covariable de la sección 3). Si se arranca con 4 sitios y el CV no baja de 8-10%, la DMS realista sube a 300-380 kg/ha.
- La ventana de aplicación foliar pre-estrés depende de la calidad del pronóstico meteorológico a 10-15 días, que tiene incertidumbre inherente.
- Si se busca bajar la DMS por debajo de 200 kg/ha en el futuro, la alternativa más eficiente no es aumentar repeticiones de parcela, sino sumar más ambientes a la red o incorporar un brazo de fajas apareadas con monitor de rendimiento (mayor n efectivo sin más trabajo manual de cosecha).