

Scanlan, Juan Brian

Fertilización foliar en maíz, ensayos y meta-análisis estadístico

**Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria
Facultad de Ciencias Agrarias**

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central “San Benito Abad”. Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Scanlan, J. B. 2012. Fertilización foliar en maíz, ensayos y meta-análisis estadístico [en línea]. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/fertilizacion-foliar-maiz-ensayos-analisis.pdf> [Fecha de consulta:.....]

(Se recomienda indicar fecha de consulta al final de la cita. Ej: [Fecha de consulta: 19 de agosto de 2010]).



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA

Facultad de Ciencias Agrarias

Ingeniería en Producción Agropecuaria

**FERTILIZACIÓN FOLIAR EN MAÍZ,
ENSAYOS Y META-ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

**Trabajo final de graduación para optar por el título de:
Ingeniero en Producción Agropecuaria**

Autor: Juan Brian Scanlan

Profesor Tutor: Lic. Adriana Pérez

Co-tutor: Ing. Agr. Fernando Miguez

Fecha: 01/02/2012

FERTILIZACIÓN FOLIAR EN MAÍZ, ENSAYOS Y META-ANÁLISIS ESTADÍSTICO

RESUMEN

Existen evidencias que señalan zonas en la pampa húmeda con deficiencias de micronutrientes como el cinc, el boro y el cobre para el cultivo de maíz. Se cree que la fertilización foliar puede ser la técnica apropiada para cubrir estas deficiencias originando incrementos en los rendimientos. Por otra parte, mediante esta técnica es posible agregar pequeñas cantidades de macro-nutrientes que pueden incrementar el rendimiento. Sin embargo esta no es una práctica generalizada en la Argentina y probablemente se deba a su respuesta de baja magnitud y muchas veces errática en ensayos. En consecuencia se realizó un trabajo con el objetivo de encontrar la respuesta promedio en rendimiento del maíz que esta técnica posee. Por un lado se llevaron a cabo cuatro ensayos en la campaña 2009/2010 para encontrar esta respuesta y por el otro se realizó un meta-análisis estadístico, que resumió 31 ensayos, totalizando 108 tratamientos sin contabilizar testigos. El meta-análisis estadístico es una herramienta estadística ampliamente utilizada en otros países y otros campos de estudio como la medicina, pero es en la Argentina algo novedoso. Se incluyeron en este meta-análisis ensayos de Satus Ager S.A., empresa sin interés comercial en la venta de fertilizantes y del INTA como organismo técnico independiente. En las publicaciones de estos ensayos, de los 108 tratamientos evaluados solamente un 6,4% eran señalados como significativamente distintos a sus testigos, demostrando la escasa potencia de los ensayos pequeños para detectar incrementos en el rendimiento. Al realizar el meta-análisis se detectó heterogeneidad y falta de normalidad en los datos, la que fue solucionada subdividiendo a los ensayos en líneas endocriadas e híbridos. Los fertilizantes foliares aumentaron el rendimiento en 3,8% y 5,7% para las líneas endocriadas y los híbridos respectivamente. Ambas respuestas fueron estadísticamente significativas ($p < 0,0001$). Para los híbridos se encontró, además, que a mayor rendimiento del testigo, mayor respuesta del fertilizante, no solo en kg sino también en % ($p = 0,002$).

INTRODUCCIÓN

El maíz es un cultivo de alto potencial de rendimiento en la zona núcleo de la pampa húmeda, y para alcanzar ese objetivo se lo debe fertilizar adecuadamente para cubrir los requerimientos que el suelo no puede proveerle en la cantidad y momento necesario.

Los suelos de la pampa húmeda cuentan mayoritariamente con valores altos de micronutrientes en promedio, pero esta disponibilidad posee una alta variabilidad, encontrándose zonas en las que existen deficiencias de varios micronutrientes. Cruzate y otros (2006) han generado mapas de disponibilidad de algunos micronutrientes donde se delimitan zonas de alta probabilidad de respuesta dentro de la pampa húmeda que confirman la hipótesis de que existirían suelos con déficit de micronutrientes debido a altas tasas de extracción.

En general, los suelos de la región pampeana argentina presentan deficiencias de Nitrógeno (N) y Fósforo (P). En los últimos años, se han observado deficiencias de azufre (S) y, en algunas zonas, deficiencias de ciertos micronutrientes (Zn y Cu), como resultado de la intensificación de la agricultura (mayores rendimientos y reducción de períodos bajo pastura). (Sillanpaa, 1982) (Ratto de Miguez y col., 1997). Otro de los elementos cuyo efecto favorable ha sido mencionado reiteradamente es el boro (B) (Ferraris *et al.*, 2007 c). Urricariet y Lavado (1999) han reportado la reducción en la disponibilidad de micronutrientes relativa a los suelos prístinos del 65% y 55% para Zn y B respectivamente en suelos deteriorados de la pampa ondulada.

Ya se ha demostrado que esta deficiencia de micronutrientes puede ser corregida mediante la fertilización foliar (Yamada, 2004) y existen resultados que parecieran indicar la aparición de deficiencias incipientes de Zn en maíz en el norte de Bs. As., siendo la vía de aplicación foliar la forma más eficiente de neutralizarlas (Ferraris *et al.*, 2007 a, c y d) (Ferraris *et al.*, 2008 c).

En la teoría ya se ha reunido información muy detallada sobre los mecanismos con los cuáles las plantas absorben nutrientes por las hojas (Trinidad y Aguilar, 1999) y en Argentina es una técnica que ya cuenta con años de estudio, pero su práctica no ha tenido la difusión que goza en otros países a pesar de que en el nuestro ya se han comprobado situaciones en los que la productividad se ve incrementada. Esto probablemente se deba a su respuesta de baja magnitud y muchas veces errática en ensayos, lo que hace difícil que los productores tomen la decisión de su utilización. Es por ello que hace falta generar más información e integrarla para poder apreciar con más detalle el resultado productivo que esta práctica verdaderamente tiene.

Los ensayos realizados en la materia hasta el momento muestran resultados contrastantes. En algunos ensayos se obtuvieron tratamientos con respuestas positivas de rendimiento estadísticamente significativas (Ferraris *et al.*, 2007 a, c y d) (Ferraris *et al.*, 2008 c) (Ferraris *et al.*, 2009 a y b), pero en su mayoría son resultados no significativos (Ferraris *et al.*, 2007 b, e y f) (Ferraris *et al.*, 2008 a, b y d) (Meilán *et al.*, 2010) (Montesano *et al.*, 2003) (Zapata, 2009) (Zapata *et al.*, 2008) (Mousegne *et al.*, 2007 a y b). Cabe destacar que la mayoría de estos presentan una tendencia positiva. Esto sugiere que el efecto de los tratamientos es pequeño y que la potencia estadística de los ensayos con pocas repeticiones no es suficiente para detectarlo. No obstante se puede observar una tendencia positiva en el efecto de la fertilización foliar (Figs. N° 4 y 5) (Anexo A).

Meta-análisis

Los resultados dispares crean la necesidad de realizar un trabajo que revise una cantidad importante de ensayos realizados sobre el tema e intente encontrar un valor medio global de respuesta de rendimiento.

El meta-análisis es un método cuantitativo para integrar ensayos en donde estudios independientes se combinan para estimar el efecto de un tratamiento y su variabilidad (Hedges y Olkin, 1985). Se logra así mayor potencia estadística para detectar diferencias entre tratamientos (Molinero, 2001). Es una herramienta estadística ampliamente utilizada en otros campos de estudio como la medicina, pero es totalmente novedosa para las ciencias agronómicas en la Argentina e incluso en los Estados Unidos (Miguez F. E., 2004). Como contrapartida, pasan por alto detalles de los estudios individuales que muchas veces son importantes en busca de una respuesta más general.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es la evaluación cuantitativa del impacto de la fertilización foliar como técnica para incrementar los rendimientos en cultivos de maíz. Se intenta responder a las siguientes preguntas: ¿aumentan los fertilizantes foliares los rendimientos en maíz? y ¿en qué medida promedio lo hacen? No es el objetivo explicar en un modelo la variación que puede tener esta respuesta y cómo predecir la magnitud de la respuesta en casos puntuales, que implica la construcción de un modelo matemático con múltiples variables que contemple: el producto utilizado, dosis, precipitaciones en el ciclo, momento de aplicación, fertilización de base, etc. Con ese fin se trazaron dos líneas de trabajo. La primera fue la realización de ensayos para evaluar el impacto de la fertilización foliar en el rendimiento de maíz mediante la utilización de distintos productos. Y la segunda fue la elaboración de un meta-análisis estadístico, el cual pretende cuantificar la respuesta en rendimiento que tiene esta técnica de fertilización mediante la integración estadística de la mayor cantidad de ensayos posibles realizados en la pampa húmeda. Con esto se obtuvo una tentativa de respuesta “promedio” de esta técnica para esta zona. Se cuantificó la variabilidad de esta respuesta y se examinaron posibles variables que puedan explicar parte de esta variabilidad encontrada en la respuesta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Parte experimental

Los ensayos experimentales se realizaron junto a la empresa Satus Ager S.A. en el área de influencia de Salto, Provincia de Buenos Aires. Se realizaron dentro del área de Investigación y Desarrollo de la empresa bajo la dirección del Ing. Prod. Agr. Joaquín Kukla. Estos ensayos tenían el fin de evaluar el impacto de distintos fertilizantes foliares en lotes de maíz semilla. Se llevaron a cabo dos tipos de ensayos, dos con limitantes de polen y dos sin limitantes de polen.

Ensayos con limitantes de polen

Estos ensayos se realizaron en lotes de producción de semilla de maíz en los campos El Crisol y Don Domingo, ambos en el área de influencia de Salto, provincia de Buenos Aires. El ensayo de Don Domingo no llegó en condiciones de ser evaluado. El diseño de los ensayos fue de Cuadrado Latino dividido en cuatro tratamientos y cuatro repeticiones como se muestra en la Fig. N° 1.

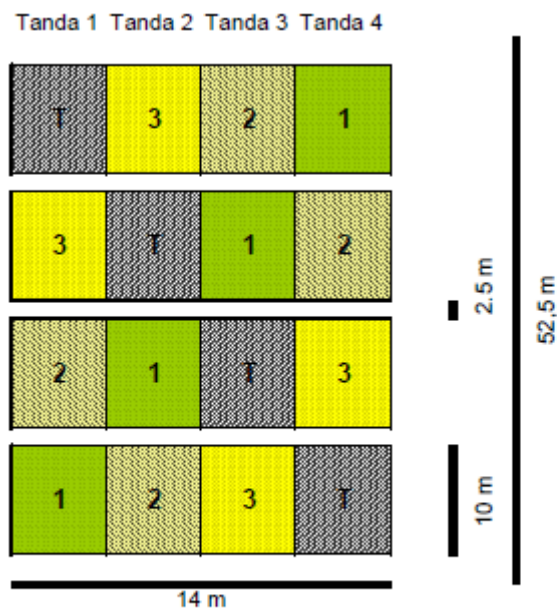


Figura N°1: Esquema de los tratamientos en campos de producción de semilla.

Las parcelas tuvieron un tamaño de 4 surcos x 10 metros con un espaciado entre surcos de 0,70 metros y pasillos de 2,5 metros, lo que produjo una superficie de ensayo de 0,0665 has. En estado fenológico de V4 se hizo la marcación de las parcelas además de un raleo para homogeneizar la población en todos los tratamientos. Se delimitó también un aislamiento de 50 metros para evitar la deriva del fertilizante foliar que se aplicó sobre el lote de producción contiguo. Los tratamientos en estos dos ensayos fueron:

- Trat. 1: Yara (Biotrac + Zintrac + Croplift + Hidromag)
- Trat. 2: ASP (Maxi Zinc)
- Trat. 3: Compo (Nitrofoska foliar + Basfoliar Zn + Petrilon Combi)
- Trat. T: Testigo

Ensayos sin limitantes de polen

Se realizaron dos ensayos en la Estación Experimental María Laura y en el campo Don Segundo Brasca, ambos en el área de influencia de Salto, provincia de Buenos Aires. Se eligieron estos dos campos ya que ofrecen diferentes condiciones de fertilidad. En María Laura las condiciones buscadas fueron sin limitantes de macronutrientes y sin limitantes de agua (se dispuso de riego complementario) y en el otro se buscaron condiciones con mayores limitantes, como lo es la menor fertilidad de suelo y no contar con el riego complementario, aunque las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron abundantes.

Además de la fertilización foliar se incorporaron en estos ensayos dos tratamientos de semilla con productos de Stoller (Stimulate + Stoller Zinc) y Yara (Teprosyn). Estos productos estimulan el desarrollo del sistema radicular aumentando la absorción de nutrientes, además de proveer de cinc, el cual se sospecha de ser el micronutriente con mayores probabilidades de ser limitante.

El diseño de estos ensayos fue en Cuadrado Latino dividido en 6 tratamientos y 6 repeticiones, y con dos líneas de maíz en evaluación (Fig. N° 2), contrastantes en su potencial de rendimiento (y quizás en su potencial de absorción de nutrientes, con lo cual se esperaba interacción en la respuesta a la fertilización foliar).

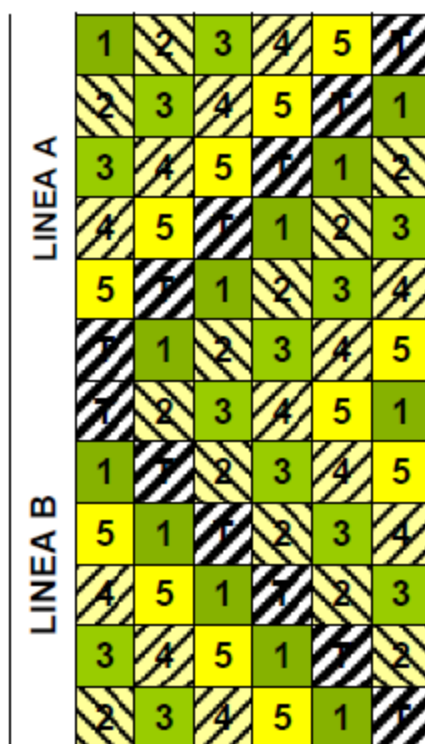


Figura N°2: Esquema de los tratamientos sin limitación de polen

El tamaño de parcela consistió en 4 surcos x 5,28 metros de largo, un espaciamiento entre surcos de 0,762 metros y pasillos de 0,78 metros, lo que produjo una superficie por ensayo de 0,133 has.

Los tratamientos fueron:

- Trat. 1: Stoller Foliar + tratamiento de semilla (Starter + Stoller Zn + Stimulate)
- Trat. 2: Yara + Teprosyn (Biotrac + Zintrac + Croplift + Hidromag + Teprosyn)
- Trat. 3: Stoller Foliar (Starter + Stoller Zn)
- Trat. 4: Yara (Biotrac + Zintrac + Croplift + Hidromag)
- Trat. 5: Compo (Nitrofoska foliar + Basfoliar Zn + Fetrilon Combi)
- Trat. T: Testigo

En las Tablas N° 1 y 2 se pueden observar los momentos fenológicos en los que se realizaron los tratamientos de acuerdo a las recomendaciones de cada fabricante y las composiciones de los mismos.

Trat	Producto	Estadio	Dosis
Maxi Zinc	Maxi Zinc	V7-V8/50% barbas	0,5 l/ha
Yara	Biotrac	V7-V8/50% barbas	1300 ml/ha
	Zintrac	V7-V8	710 ml/ha
	Croplift	V7-V8/50% barbas	1000 ml/ha
	Hidromag	50% barbas	1510 ml/ha
Compo	Nitrofoska foliar	V7-V8/50% barbas	3000 ml/ha
	Basfoliar Zn	V7-V8	400 ml/ha
	Fetrilon Combi	50% barbas	200 gr/ha
Stoller	Starter	V6	3000 ml/ha
	Stoller Zn	V6	4000 ml/ha

Tabla N°1: Productos utilizados en cada tratamiento, estadio y dosis de aplicación

Fertilizante	N	P2O5	K2O	B	CU	Mn	Zn	Mg	S	Fe
Biotrac	5,6			1,1			1,1			
Zintrac							40			
Croplift	8,5	3,4	6,0	0,02	0,1	0,1	0,1			
Hidromag								20		
Nitrofoska foliar	10*	4*						0,2*	0,8*	
Basfoliar Zn							40,6			
Fetrilon Combi	5,5			1,5	0,5	3,0	4,0	1,2	2,8	4,0
Starter				0,5	0,5	3,0	5,0		4,0	
Stoller Zn				3,0			7,0			

Tabla N°2: Composición química de los productos utilizados expresados en porcentaje de nutrientes p/p.
(* nutrientes expresados en p/v)

Los tratamientos se realizaron con mochila manual de presión constante con un caudal de 130 l/ha. El viento nunca superó los 10 km/h durante las aplicaciones y la temperatura osciló entre 23°C y 27°C.

La cosecha se realizó en forma manual a la madurez fisiológica del maíz, haciéndolo sobre los dos surcos centrales para evitar efectos de bordura. Se realizó además un secado posterior y trilla con máquina estática para evitar pérdidas de cosecha.

Para el análisis de los datos se utilizó el programa SAS aplicando el modelo GLM. Se realizó el Test de Fisher LSD para agrupar según diferencias mínimas significativas.

Meta-análisis estadístico

El meta-análisis fue realizado siguiendo los procedimientos sugeridos por Cooper et. al (2009) con el seguimiento de la Lic. Adriana Pérez, profesora de las Cátedras de Estadística y Métodos de Investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UCA. Los pasos a seguir fueron los de búsqueda y selección del material en primer lugar y en segundo la elaboración del análisis estadístico en sí.

Criterios para la búsqueda y selección de ensayos

Se realizó una búsqueda de la mayor cantidad posible de ensayos de fertilización foliar en la pampa húmeda. Las fuentes que se consultaron para la búsqueda de ensayos fueron las siguientes:

- i) consulta a organismos independientes que puedan haber realizado ensayos en la materia: INTA y CREA.
- ii) bases de datos electrónicas suscriptas por la Universidad Católica Argentina: EBSCO y MINCYT.
- iii) Google Academic Search

Se seleccionaron únicamente los ensayos que cumplen con las siguientes condiciones:

- i) se hayan realizado en la región pampeana.
- ii) no sean conducidos por empresas que comercialicen fertilizantes.
- iii) incluyan alguna medida de variabilidad interna.

Basados en este criterio se seleccionaron 26 trabajos de investigación (Apéndice A) con 31 testigos y 110 tratamientos de fertilización foliar, incluidos los ensayos que se presentan en esta tesis y tres ensayos inéditos realizados por la empresa Satus Ager S.A.

Meta-análisis estadístico

El primer paso fue obtener un mismo estimador, T , del efecto del fertilizante foliar por sobre el testigo, para todos los ensayos. En este caso todos los datos se encontraban en kilos, por lo que se decidió crear una diferencia cruda de medias, $D = \bar{Y}_1 - \bar{Y}_2$, donde $\bar{Y}_1$ y $\bar{Y}_2$ son las medias muestrales del testigo y el tratamiento respectivamente (Borenstein, 2009). Representa la diferencia en kilos entre el testigo y el tratamiento con fertilizante foliar.

El siguiente paso fue encontrar una medida de variabilidad similar para todos los trabajos. En este caso se han encontrado distintas medidas de variabilidad en los reportes de cada ensayo: Varianza, Coeficiente de Variación y Diferencia Mínima Significativa. Todas las medidas de variabilidad se convirtieron a la varianza mediante las ecuaciones correspondientes.

En este meta-análisis se intenta obtener el mejor estimador $\bar{T}$ de un parámetro poblacional θ que es en este caso el efecto del tratamiento con fertilizantes foliares. $\bar{T}$

representa en este caso el efecto promedio de todos los ensayos en kilos de los tratamientos de fertilización foliar por sobre los testigos. $\bar{T}$ es el efecto promedio ponderado de todos los ensayos incluidos en el análisis. La ponderación puede realizarse con distintos tipos de “pesos”.

La fórmula clásica utilizada para el efecto promedio ponderado de los ensayos en los meta-análisis es la siguiente:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i T_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad [1]$$

Donde k es el número de ensayos incluidos en el meta-análisis, T_i es el efecto reportado por el ensayo i y w_i es el peso asignado al ensayo i .

Para minimizar la varianza de $\bar{T}$ y hacerlo un estimador más preciso se debe utilizar como peso para ponderar los efectos de cada ensayo a la inversa de la varianza:

$$w_i = \frac{1}{v_i} \quad [2]$$

De esta manera los ensayos realizados con mayor precisión poseen mayor peso en el efecto promedio que los efectos de los ensayos que poseen una varianza mayor.

Las fórmulas para la varianza condicional v_i cambian para cada tipo de estimador (diferencia de medias, cociente, correlación, etc.). Para la diferencia de medias, que es el índice utilizado para $\bar{T}$ en este caso, la fórmula es la siguiente:

$$v_i = \sigma_i^2 (1/n_i^T + 1/n_i^C) \quad [3]$$

Donde σ_i^2 es asumida como la varianza común del ensayo, que es el tipo de varianza que se publica en todos los ensayos, n_i^T es el tamaño de la muestra o cantidad de réplicas del tratamiento de fertilización del ensayo i , n_i^C es la cantidad de réplicas del control o testigo del ensayo i .

Con el objetivo de obtener el estimador $\bar{T}$ se debe determinar si el meta-análisis seguirá un modelo de efectos fijos o un modelo de efectos aleatorios. Supongamos que los datos que combinaremos surgen de un número k de estudios independientes en donde el estudio i reporta un efecto observado T_i , que posee un parámetro poblacional θ_i y una varianza v_i . Por lo tanto los datos a combinar son los estimadores del efecto $T_1, \dots, T_k$ de los parámetros poblacionales $\theta_1, \dots, \theta_k$ y las varianzas $v_1, \dots, v_k$.

Bajo el modelo de efectos fijos se supone que $\theta_1 = \dots = \theta_k = \theta$, es decir, existe un único parámetro poblacional o efecto, que todos los ensayos intentan estimar. Los estimadores T_i en cualquier ensayo difieren del valor de θ por el error de muestreo, que es llamada variabilidad condicional.

Bajo el modelo de efectos aleatorios θ no es fija, sino que es aleatoria y tiene su propia variabilidad y distribución. Es decir, no existe una única θ sino que cada ensayo en particular intenta estimar su propia θ , obteniendo así una población de ensayos cada uno con su propia θ . Este nuevo conjunto tiene su propia media y distribución, que es la que intentamos estimar en todo meta-análisis realizado bajo el modelo de efectos aleatorios.

Esto está basado en el concepto de que las diferencias existentes entre los ensayos (diferencias en el diseño, la población utilizada, el año de realización, etc.) generan diferencias entre los parámetros poblacionales a estimar, es decir, $\theta_k \neq \theta_{k+1}$.

Este tipo de enfoque es muy útil a la hora de cuantificar las diferencias existentes entre los ensayos, ya que cuantifica esta heterogeneidad e incorpora esta fuente de variación al análisis de los ensayos.

Por lo tanto estos meta-análisis pueden ser vistos como un proceso de muestreo en dos etapas. Una primera en donde se extrae una muestra de estudios de una población mayor posiblemente infinita en donde se considera que varían en su parámetro poblacional. Y una segunda, ya dentro del ensayo individual, donde se extrae una muestra de la población a la que ese ensayo hace referencia. Dicho esto, el enfoque de diseño de “doble-muestreo” implica un modelo de doble varianza. Una varianza entre estudios y una varianza dentro cada estudio.

Para determinar si nos encontramos ante una situación de modelo de efectos fijos o de efectos aleatorios se tienen que examinar los ensayos que se incluirán en el meta-análisis y determinar si éstos son lo suficientemente homogéneos entre sí para realizar un modelo de efectos fijos o tienen un comportamiento distinto, lo que obliga a optar por un modelo de efectos aleatorios. Es necesario entonces aplicar herramientas matemáticas para determinar si existe heterogeneidad entre los estudios. Este análisis se denomina Análisis de Homogeneidad. Existen varios coeficientes (Q , I^2 , $s^2(T)$ y $\sigma^2\theta$) que se emplean en el análisis de homogeneidad. Se han calculado todos ellos según las normas establecidas por Cooper y otros (2009).

El estadístico Q analiza la homogeneidad y sigue una distribución Chi-cuadrado. Si Q excede un valor crítico de una cola con $k - 1$ grados de libertad donde k es el número de ensayos, la varianza observada entre los efectos de los ensayos es mayor de la esperada por el azar rechazando la hipótesis nula ($\alpha=0.05$) que sostiene que todos los ensayos comparten una θ común. En términos prácticos esto implica que existe heterogeneidad entre los ensayos en la respuesta a la fertilización y que tienen efectos distintos sobre el cultivo. Si esta hipótesis se rechaza se sugiere seguir el modelo de efectos aleatorios.

El estadístico Q se calcula como:

$$Q = \sum_{i=1}^k [(T_i - \bar{T})^2 / v_i] \quad [4]$$

Donde T_i es el efecto reportado por cada ensayo i , $\bar{T}$ es el efecto promedio ponderado de todos los ensayos (ecuación [1]) y v_i es la varianza condicional (ecuación [3]).

La magnitud de Q depende de la unidad de medición utilizada y por lo tanto no es comparable entre distintos meta-análisis. Otro índice utilizado para la medición de heterogeneidad entre estudios que sí es comparable entre meta-análisis es I^2 , ya que representa la proporción de la variación total en los estimadores de los efectos que se debe a la heterogeneidad de los ensayos y no al azar.

El estadístico I^2 se calcula como:

$$I^2 = 100\% * \frac{Q - (k - 1)}{Q} \quad [5]$$

Donde Q es el estadístico calculado en la ecuación [4] y k el número de ensayos.

Los valores orientativos que propusieron los creadores de este índice (Higgins y Thompson, 2002) para interpretarlo son: $I^2 = 25\%$ (baja heterogeneidad), $I^2 = 50\%$ (mediana heterogeneidad) y $I^2 = 75\%$ (alta heterogeneidad).

Una vez que el investigador decide utilizar un modelo de efectos aleatorios debido al rechazo de la hipótesis que la varianza entre estudios es nula, debe cuantificarla. Por lo tanto la varianza total, v_i^* , de un estimador del efecto de un ensayo i , T_i , refleja ahora la varianza dentro del ensayo, v_i , y la varianza entre estudios, σ_θ^2 , que refleja la variabilidad de la distribución de cada θ_i , respecto del estimador del efecto promedio $\bar{T}$.

$$v_i^* = \sigma_\theta^2 + v_i \quad [6]$$

Para estimar la varianza entre estudios, que será muy importante incluir en el meta-análisis para obtener el mejor estimador $\bar{T}$, se debe calcular un valor c previo al cálculo final.

$$c = \sum_{i=1}^k w_i - \left[\sum_{i=1}^k w_i^2 / \sum_{i=1}^k w_i \right] \quad [7]$$

La siguiente es la fórmula del mejor estimador de σ_θ^2 :

$$\sigma_\theta^2 = [Q - (k - 1)] / c \quad [8]$$

Una vez realizado el cálculo de la varianza entre estudios hay que agregar esta varianza a la varianza interna de cada ensayo con la ecuación [6]. Con este nuevo valor de varianza total para cada ensayo, se debe recalcular $\bar{T}$, siendo ahora $\bar{T}^*$:

$$\bar{T}^* = \frac{\sum_{i=1}^k w_i T_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad [9]$$

Con w_i ahora tomando la varianza entre estudios:

$$w_i = \frac{1}{v_i^*} \quad [10]$$

La varianza de $\bar{T}^*$ se calcula con la siguiente fórmula:

$$v_{*} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k (1/v_i^*)} \quad [11]$$

Esta varianza entre estudios agregada al análisis de efectos aleatorios nos brinda resultados que permiten sacar conclusiones más conservadoras.

La raíz cuadrada de la varianza es el desvío estándar, el cual multiplicado por 1,96 (u otro valor crítico de t), y sumando y restando este valor al efecto promedio $\bar{T}^*$, se convertirá en los límites de un intervalo de confianza del 95%. Si el intervalo de confianza no incluye al cero, se podría afirmar que existen evidencias estadísticas de que $\bar{T}^*$ es significativamente distinto de cero. Esta afirmación se puede realizar bajo el supuesto de normalidad, la cual se probó mediante el método de Shapiro-Wilks modificado. Se consideraron significativas aquellas pruebas con $p < 0,05$.

Software y herramientas estadísticas utilizadas

- *Microsoft Excel*. Los cálculos del meta-análisis, los gráficos y tablas fueron realizados en su totalidad en Microsoft Excel.
- *Infostat*. Las pruebas de Shapiro Wilks modificado, así como también los análisis de regresión fueron realizados en Infostat.
- *Math Type 6.7*. Todos los textos de las fórmulas incluídas en esta tesis fueron realizados con Math Type 6.7.
- Los valores de p aproximados para las distribuciones de chi-cuadrado y normal fueron obtenidos a través de las tablas provistas en la Cátedra de Estadística de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Católica Argentina.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parte Experimental

Como puede apreciarse en las Tablas N° 3, 4, 5, 6 y 7, que son los resultados obtenidos en los ensayos de Satus Ager S.A., no existen diferencias significativas entre los rendimientos de los distintos tratamientos de fertilización en comparación con los testigos. Sí hubo diferencias entre algunos tratamientos de fertilización pero ninguno ha superado significativamente a un testigo. Lo siguiente es consistente con lo señalado anteriormente, es frecuente observar ensayos sin diferencias significativas.

El Crisol						
Trat	Rend medio	Dif. Con testigo sin aj. de pob.		Dif. Con testigo con aj. de pob.		Población media
	(Kg/ha)	(kg/ha)	%	(kg/ha)	%	(Plantas/ha)
3	2921 a	101	3,58	255	9,04	63389 a
1	2919 a	99	3,51	401	14,22	60297 a
T	2820 a	-	-	-	-	67100 a
2	2767 a	-53	-1,88	228	8,24	60606 a

Tabla N° 3: Resultados de los tratamientos en El Crisol. Rendimiento Medio= 2857 kg/ha. DMS = 649 kg/ha. Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas detectadas mediante el Test de Fisher para lograr el agrupamiento según diferencias mínimas significativas (DMS).

María Laura Línea A						
Trat	Rend medio	Dif. Con testigo sin aj. de pob.		Dif. Con testigo con aj. de pob.		Población media
	(Kg/ha)	(kg/ha)	%	(kg/ha)	%	(Plantas/ha)
2	2884 a	92	3,29	197	7,05	67106 a
T	2792 ab	-	-	-	-	69799 a
4	2726 ab	-66	-2,36	190	6,80	63585 a
5	2716 ab	-76	-2,72	179	6,41	63585 a
3	2703 ab	-89	-3,19	-38	-1,36	68556 a
1	2618 b	-174	-6,23	69	2,47	63793 a

Tabla N° 4: Resultados de los tratamientos en María Laura con Línea A. Rendimiento Medio = 2740 kg/ha. DMS = 229 kg/ha. Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas detectadas mediante el Test de Fisher.

María Laura Línea B						
Trat	Rend medio	Dif. Con testigo sin aj. de pob.		Dif. Con testigo con aj. de pob.		Población media
	(Kg/ha)	(kg/ha)	%	(kg/ha)	%	(Plantas/ha)
1	5052 a	145	2,95	256	5,22	58200 ab
3	4933 a	26	0,53	586	11,94	53229 bc
2	4924 a	17	0,35	-185	-3,77	62342 a
T	4907 a	-	-	-	-	59650 ab
4	4841 a	-66	-1,34	968	19,72	48673 c
5	4711 a	-196	-3,99	147	2,99	55508 abc

Tabla N° 5: Resultados de los tratamientos en María Laura con Línea B. Rendimiento Medio = 4895 kg/ha. DMS = 514 kg/ha. Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas detectadas mediante el Test de Fisher.

Segundo Brasca Línea A						
Trat	Rend medio	Dif. Con testigo sin aj. de pob.		Dif. Con testigo con aj. de pob.		Población media
	(Kg/ha)	(kg/ha)	%	(kg/ha)	%	(Plantas/ha)
4	2750 a	312	12,79	0	0	104566 ab
5	2712 a	297	12,18	-145	-5,95	107653 ab
2	2518 a	80	3,28	294	12,06	101920 ab
T	2438 a	-	-	-	-	103685 a
3	2415 a	-23	-0,94	201	8,24	92660 b
1	2399 a	-39	-1,59	64	2,62	97070 ab

Tabla N° 6: Resultados de los tratamientos en Segundo Brasca con Línea A. Rendimiento Medio = 2539 kg/ha. DMS = 609 kg/ha. Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas detectadas mediante el Test de Fisher.

Segundo Brasca Línea B						
Trat	Rend medio	Dif. Con testigo sin aj. de pob.		Dif. Con testigo con aj. de pob.		Población media
	(Kg/ha)	(kg/ha)	%	(kg/ha)	%	(Plantas/ha)
2	5130 a	542	11,81	808	17,61	85108 ab
5	4999 ab	411	8,95	446	9,72	89077 ab
4	4859 ab	271	5,91	381	8,31	87754 ab
T	4588 ab	-	-	-	-	89958 a
3	4442 ab	-146	-3,18	326	7,11	81139 b
1	4264 b	-324	-7,06	-293	-6,38	89518 a

Tabla N° 7: Resultados de los tratamientos en Segundo Brasca con Línea B. Rendimiento Medio = 4713 kg/ha. DMS = 609 kg/ha. Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas detectadas mediante el Test de Fisher.

La tendencia observada en estos ensayos una vez corregidos los efectos de población fue de un incremento en el rendimiento de 232 kg/ha que representa un 6,18% de aumento.

Es debido a este hecho y a la observación de los ensayos referenciados en la bibliografía que se decidió realizar el meta-análisis para probar la hipótesis que los fertilizantes foliares aumentan el rendimiento del maíz y determinar en qué magnitud lo hacen.

Meta-análisis estadístico

Se realizó el test Q de homogeneidad (ecuación [4]) para la totalidad de los datos (108 tratamientos sin contabilizar testigos), obteniéndose los siguientes valores: $Q = 246,1$ ($p < 0,0001$), sugiriendo que existe heterogeneidad entre los ensayos incluidos en el estudio, es decir, que los valores de θ que los ensayos intentan estimar son distintos entre sí. En términos prácticos esto implica que existen evidencias de heterogeneidad entre los tratamientos en la respuesta a la fertilización y que tienen efectos distintos sobre el cultivo. El valor del índice I^2 (ecuación [5]) fue de 56,5%. Este indicador señala qué proporción de la variación entre ensayos se debe a la heterogeneidad y no al azar en la variación total observada. De acuerdo a Higgins y Thompson (2002), este valor indica una heterogeneidad de media a alta, lo que coincide con el resultado anterior.

El ideal sería en este punto intentar explicar la variabilidad existente entre los ensayos. Esto implica la construcción de un modelo matemático con múltiples variables que contemple: el producto utilizado, dosis, precipitaciones en el ciclo, momento de aplicación, fertilización de base, etc, que dejó propuesta como línea de investigación a seguir en este tema. Esta tesis intenta simplemente contestar si los fertilizantes foliares aumentan o no los rendimientos y en qué medida promedio lo hacen, y no explicar la variación de estos y cómo predecir la magnitud de la respuesta en casos puntuales.

Indagando sobre las posibles fuentes de variación se analizó la posible diferencia en la respuesta que podrían tener híbridos y líneas endocriadas. Se pensó que los híbridos podrían tener mayor respuesta principalmente por dos motivos. En primer lugar si se espera la misma respuesta en términos porcentuales, es lógico que los híbridos tengan una mayor respuesta en kilos que las líneas endocriadas solamente por el hecho de que rinden más. En segundo lugar se planteó una hipótesis en la que se obtiene una mayor respuesta por parte de los híbridos debido a que al rendir más, es más probable que encuentren una limitante que pueda ser corregida mediante la fertilización foliar antes que las líneas endocriadas que cubren sus requerimientos con lo disponible en el suelo en la gran mayoría de los casos. Estos conceptos sugieren realizar una división de los datos según genética (híbridos y líneas endocriadas).

El gráfico de L'Abbé para todos los datos sin discriminar genética (híbridos y líneas endocriadas) ayuda a interpretar esta situación y comprender la necesidad de dividir los datos (Fig. N° 3). Los puntos que se encuentran por encima de la línea $y=x$ son ensayos en los que la respuesta fue positiva y los que se encuentran por debajo, ensayos con respuestas negativas. Se observa que a rendimientos más altos (híbridos) la línea de tendencia de L'Abbé se separa más de $y=x$, demostrando que la respuesta es mayor en híbridos que en líneas endocriadas. El gráfico de L'Abbé nos está mostrando además que la mayoría de los puntos se encuentran por sobre la línea $y = x$ lo que muestra claramente la tendencia de los tratamientos a aumentar los rendimientos.

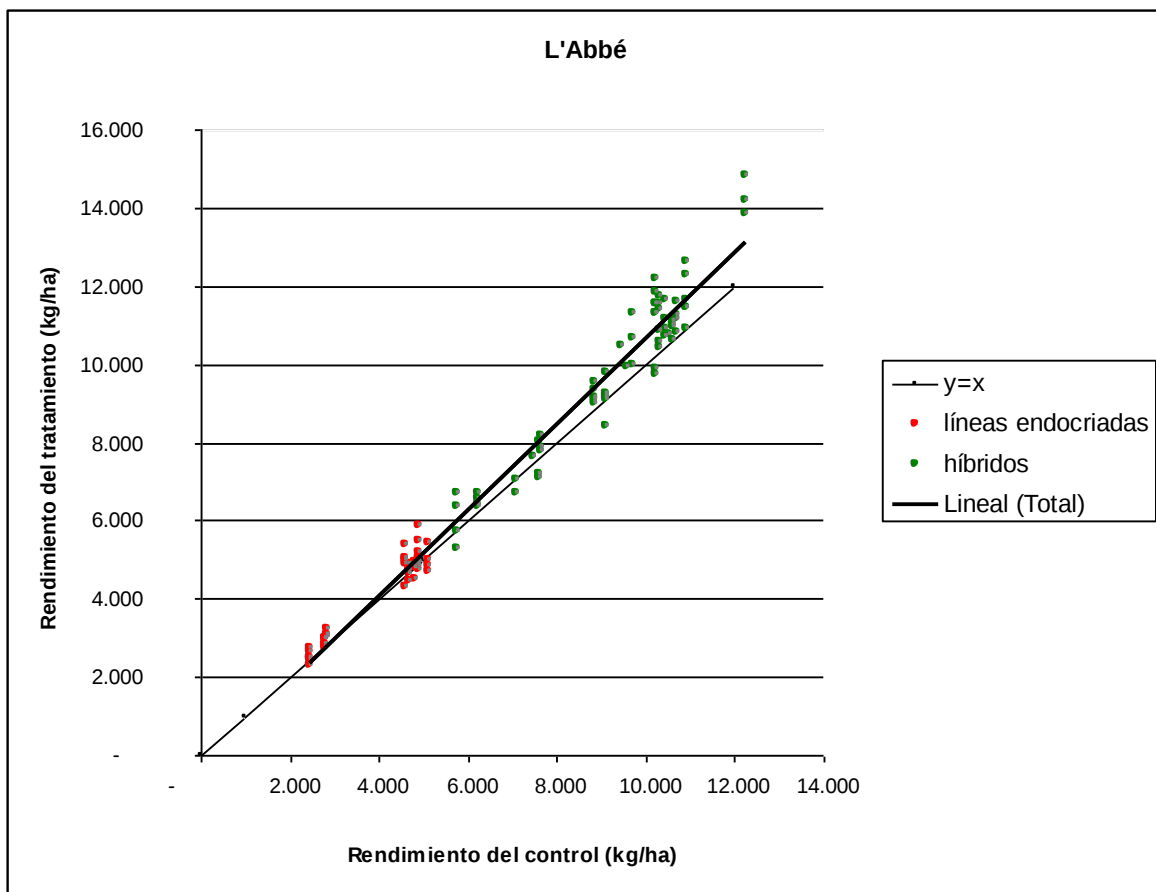


Figura N° 3: Gráfico de L'Abbé.

Debido a esto se decidió hacer la comparación de los resultados obtenidos realizando un meta-análisis con todos los datos juntos y otro discriminando entre híbridos y líneas endocriadas.

Aunque existe un aumento significativo en kilos para todos los ensayos sin discriminar genética, la respuesta es distinta no solo en kilos sino también en porcentaje de aumento si se tratan por separado los híbridos y las líneas endocriadas (Tabla N° 8). Allí se observan los incrementos en los rendimientos que se obtuvieron mediante la fertilización foliar. Los incrementos reportados son los promedios ponderados en el meta-análisis, donde los ensayos más precisos (menor varianza) poseen mayor peso.

	Híbridos	Líneas Endocriadas
Testigos: Rendimiento promedio (kg/ha)	9064	4188
Tratamientos: Diferencia ponderada (kg/ha)	518	160
Tratamientos: Diferencia ponderada (%)	5,7%	3,8%
Error Estándar (kg)	75,3	40,2
P	< 0,0001	< 0,0001

Tabla N° 8: Efecto de la fertilización sobre híbridos y líneas endocriadas según meta-análisis.

Se puede observar que los híbridos tuvieron un mayor rendimiento y una mayor respuesta a la fertilización foliar ($R^2 = 0,25$) (Tabla N° 8).

Por otra parte los cultivos de maíz híbrido y de líneas endocriadas destinadas a la producción de semilla híbrida difieren no solamente en aspectos técnicos sino también en económicos. Por lo tanto es relevante determinar diferencias en los aumentos de rendimiento si las hay entre ambos para poder realizar análisis económicos para cada situación por separado.

Por todo lo dicho anteriormente, se presentan en adelante los datos divididos en híbridos por un lado y líneas endocriadas por el otro.

Meta-analisis para Líneas endocriadas

En este grupo se analizaron 39 tratamientos (sin contabilizar testigos). Se obtuvo $Q = 87,9$ ($p < 0,0001$) con 38 grados de libertad e $I^2 = 56,8\%$. Estos valores indican que existe una importante variabilidad en las respuestas dentro de las líneas endocriadas, aún después de la división de datos, sugiriendo que quedan por elaborar modelos que terminen de explicar los factores de estas variaciones en las respuestas. Esta elevada variabilidad es marcada en las líneas endocriadas debido probablemente a la elevada inestabilidad intrínseca que las líneas poseen en su naturaleza. Por lo tanto se aplicó un modelo de efectos aleatorios.

De acuerdo a la ecuación [9] (utilizada en lugar de [1] ya que se siguió el modelo de efectos aleatorios y se introdujo la variación entre ensayos en el mismo), el aumento de rendimiento para este grupo fue de 160 kg/ha respecto al testigo, un 3,8% respecto del rendimiento medio de los testigos que fue de 4188 kg/ha. Este valor no es para nada desechable si se tiene en cuenta el alto valor de lo producido en este caso (semilla híbrida). La varianza obtenida (ecuación [11]) fue de $1616 \text{ kg}^2/\text{ha}^2$, obteniendo así un desvío estándar de 40,2 kg/ha. Multiplicado el error estándar por 1,96, se obtuvo el siguiente intervalo de confianza del 95% para el aumento del rendimiento utilizando fertilizantes foliares en líneas endocriadas de maíz: [81 kg/ha - 239 kg/ha]. Se observa que el cero no pertenece a este intervalo, lo que señala que el aumento del rendimiento es significativo y rechaza la hipótesis nula. Se obtuvo un estadístico $Z = 3,97$ ($p < 0,0001$) remarcando nuevamente la significancia estadística. Previamente se realizó una prueba de normalidad (Shapiro-Wilks modificado), en la cual no se rechazó ($p > 0,05$) la hipótesis nula, es decir que no se encontraron evidencias de apartamiento de la distribución normal para la variable.

La interpretación visual clásica de los meta-análisis consiste en el llamado Forest-Plot (Molinero, 2003), en el cual cada tratamiento figura como un punto cuyo tamaño varía de acuerdo al peso que posea en la ponderación (Fig. N° 4). Los ensayos más precisos poseen mayor peso en la ponderación del promedio final que se realiza en el meta-análisis y por lo tanto el punto que los representa es mayor. Se agregan también los intervalos de confianza del 95% de cada ensayo en forma de líneas verticales que atraviesan el punto. Se puede apreciar como la mayoría de los ensayos poseen un efecto positivo, pero no significativo (que queda ilustrado en el hecho que las líneas verticales atraviesan el eje x). El valor medio final figura en color rojo y en forma de rombo.

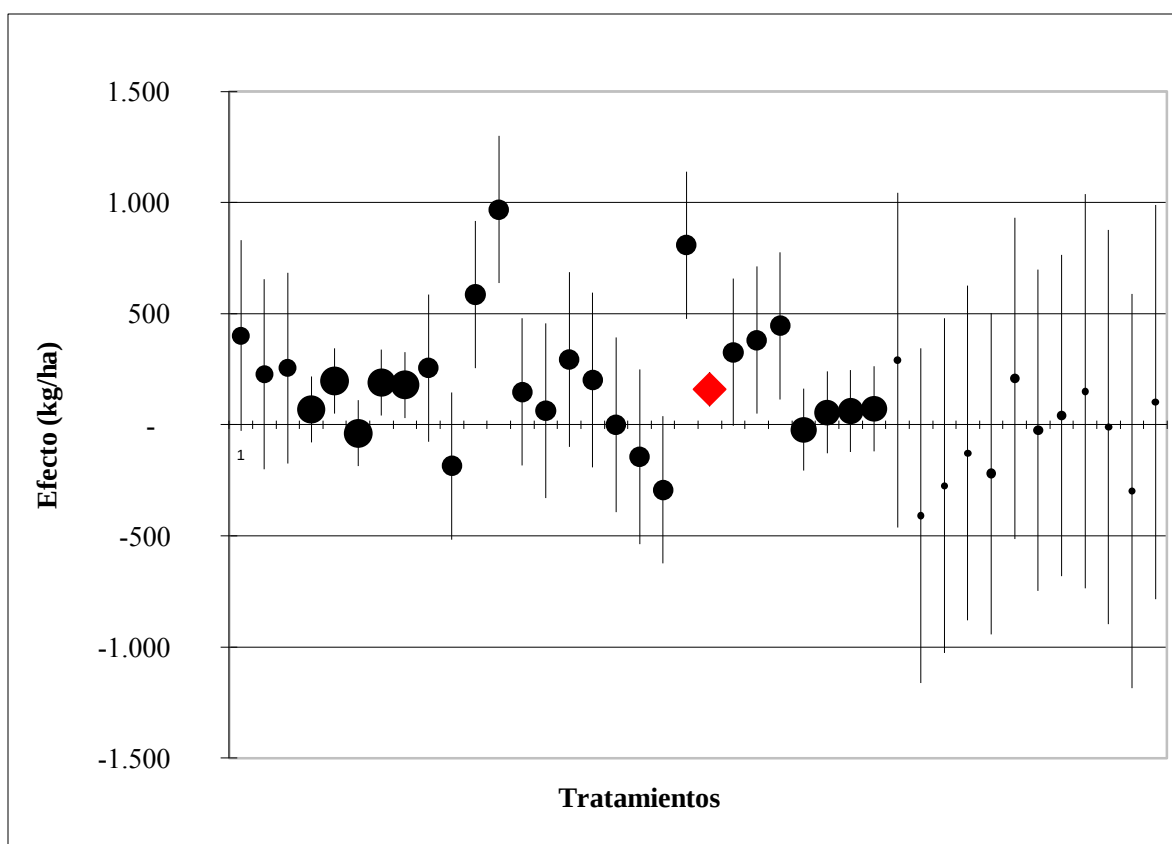


Figura N° 4: Forest-Plot perteneciente a las líneas endocriadas, donde el tamaño del punto indica el peso del tratamiento dentro de la ponderación y las barras indican el intervalo de confianza del 95%.

Meta-analisis para Híbridos

A este grupo pertenecen 69 tratamientos (sin contabilizar testigos). En el test de homogeneidad, se obtuvo un valor $Q = 112,3$ ($p = 0,0006$) con 68 grados de libertad. El índice I^2 fue del 39,5%, calificado entre medio y bajo por Higgins y Thompson (2002). Estos valores indican que existe variabilidad en las respuestas dentro de este grupo de ensayos, y que queda aún trabajo para elaborar modelos matemáticos que expliquen los factores de estas variaciones en las respuestas. Esta variabilidad existente es menor que en las líneas endocriadas (esto puede verse en sus I^2) y la I^2 de todos los datos en su conjunto

sin discriminar genética, lo que predice una tarea más sencilla a la hora de modelar a futuro las respuestas. Se aplicó al igual que con las líneas endocriadas un modelo de efectos aleatorios.

Resolviendo la ecuación [9], el aumento de rendimiento de los tratamientos de fertilización foliar respecto al control fue de 518 kg/ha, equivalente en este caso al 5,7% respecto del rendimiento medio de los testigos que fue de 9064 kg/ha. Aquí vemos la diferencia no solamente en kilos sino también en porcentaje. El desvío estándar obtenido fue de 75,3 kg/ha, y bajo la misma metodología seguida para las líneas el intervalo de confianza del 95% fue [370 kg/ha - 665 kg/ha], significativo desde que el cero no está incluido en el intervalo. Se obtuvo un estadístico $Z = 6,88$, ($p < 0,0001$), valor extremadamente alto. En la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks modificado no se rechazó ($p > 0,05$) la hipótesis nula, es decir que no se encontraron evidencias de apartamiento de la distribución normal para la variable.

Estos valores nos indican que los rendimientos son significativamente incrementados cuando se utilizan fertilizantes foliares en maíz. Visualmente esta afirmación puede apreciarse mejor con un Forest-Plot que sigue la misma lógica empleada para las líneas endocriadas (Fig. N° 5).

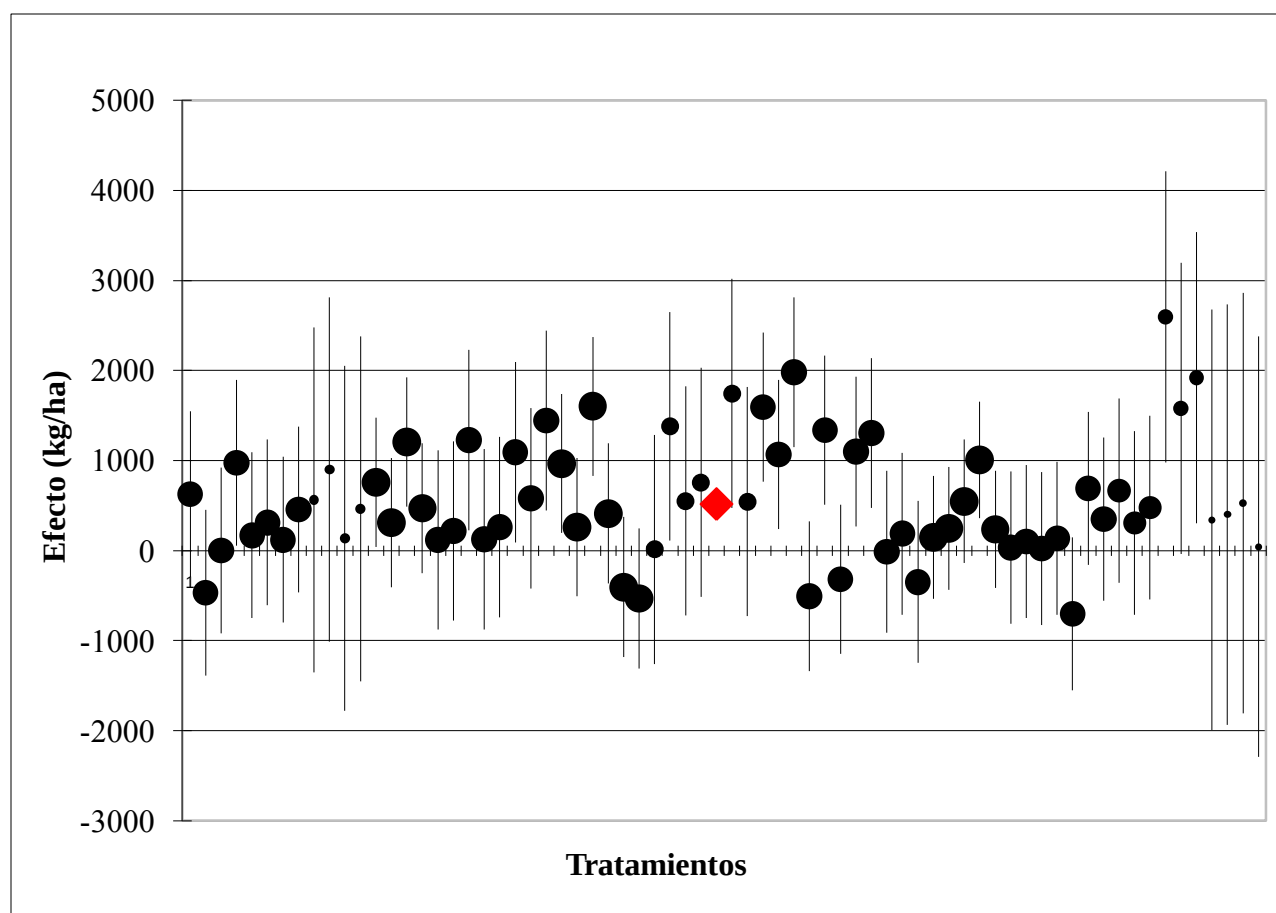


Figura N° 5: Forest-Plot perteneciente a los híbridos, donde el tamaño del punto indica el peso del tratamiento dentro de la ponderación y las barras indican el error estándar.

Los resultados obtenidos resaltan, como lo sugería la hipótesis de trabajo, al meta-análisis como una poderosa herramienta estadística para otorgar validez a un gran número de ensayos sin significancia estadística.

Efecto del ambiente como modulador de la respuesta.

A través de la observación de las Figuras N° 3 y N° 6 y de la Tabla N° 8 se elaboró una hipótesis que establece que a mayores rendimientos de maíz (mejor ambiente), la respuesta al tratamiento de fertilización foliar es mayor no solamente en kg/ha sino también en porcentaje (aumentos más que proporcionales). La causa podría ser que probablemente a mayores rendimientos (mejor ambiente), el maíz pasa a tener otras limitantes diferentes al agua, que es la principal, cobrando importancia los micro-nutrientes o los macro-nutrientes aplicados en momentos críticos, lo que aumentarían los rendimientos en mayor medida en los ambientes de alto potencial que en los de bajo potencial. La Tabla N°8, en la que se observan mayores porcentajes de aumento en híbridos, que rinden más que las líneas endocriadas apoya también esta hipótesis. Lo mismo ocurre con la observación del Gráfico de L'Abbé (Fig. N°3), donde la separación de la línea de ajuste es mayor a medida que avanzamos en el eje x (mejores ambientes).

Se decidió realizar un análisis de regresión que permitiese relacionar el % de aumento de rendimiento con el rendimiento del control. Dentro del grupo de los híbridos se encontró una relación significativa en la cual a mayores rendimientos del control (mejor ambiente), mayores respuestas tanto en kg/ha como en porcentaje, es decir, aumentos más que proporcionales (Fig. N° 7).

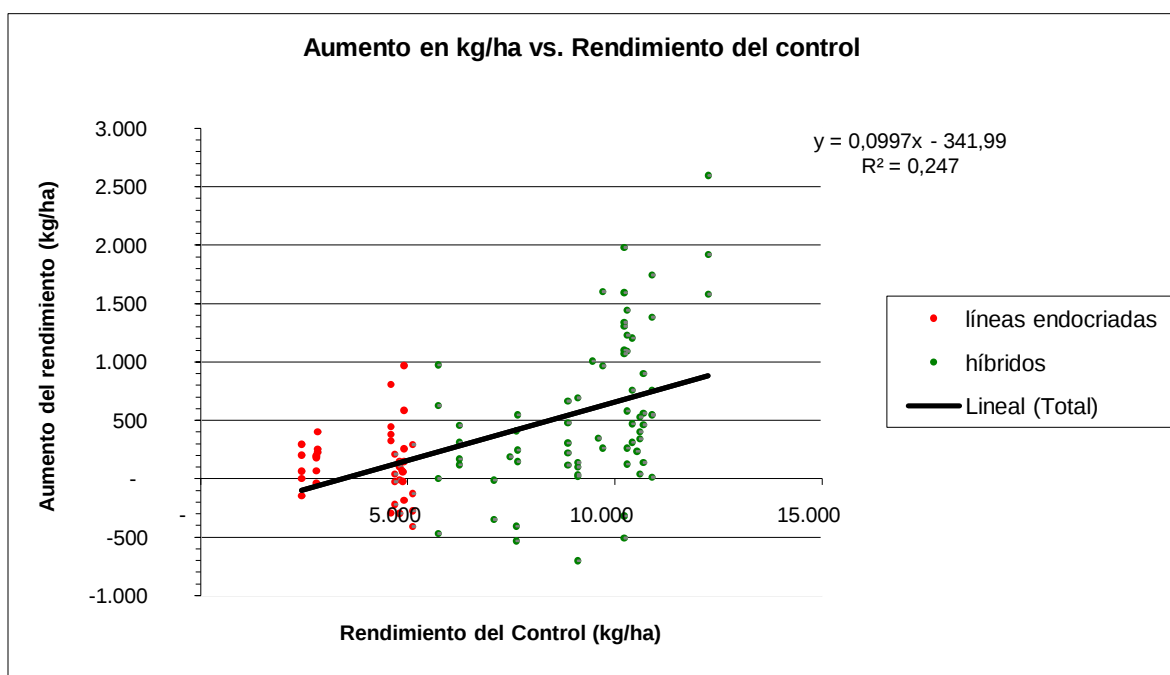


Figura N° 6: Aumento en el rendimiento en kg/ha vs. rendimiento del control.

Esta relación encontrada exige un estudio más amplio pero la ecuación de la recta que estima el incremento en rendimiento es $y = 1,4x - 7,41$, estando x expresada en toneladas e y en porcentaje ($p = 0,002$). Por ejemplo, en un ambiente de 10 Tn/ha la respuesta esperada es de 6,59%, es decir 659 kg/ha. Hay que recordar aquí que esta ecuación es una aproximación debido a que restan por explicar varios factores como lo son el producto a aplicar, dosis, etc.

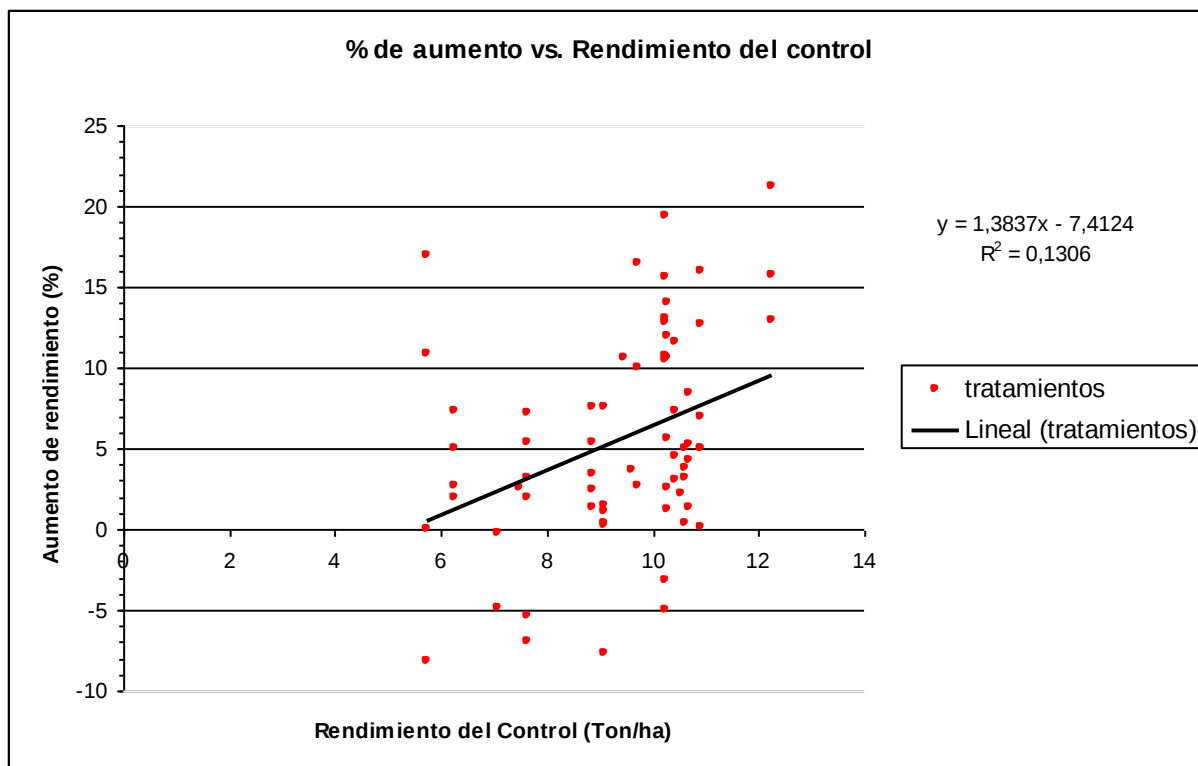


Figura N° 7: % de aumento del rendimiento vs. rendimiento del control en híbridos.

El análisis de regresión que relacionó el % de aumento del rendimiento con el rendimiento del control para líneas endocriadas dio como resultado un modelo no significativo ($p = 0,175$) (Fig. N° 8). Esto no implica que los rendimientos no se han incrementado debido al uso de fertilizantes foliares, ya que esto quedó demostrado en el meta-análisis correspondiente a líneas endocriadas. El significado de este resultado es que la respuesta de las líneas endocriadas al uso de fertilizantes foliares no se ve afectada por el rendimiento de los testigos, es decir, por ambientes de mayor o menor rendimiento potencial.

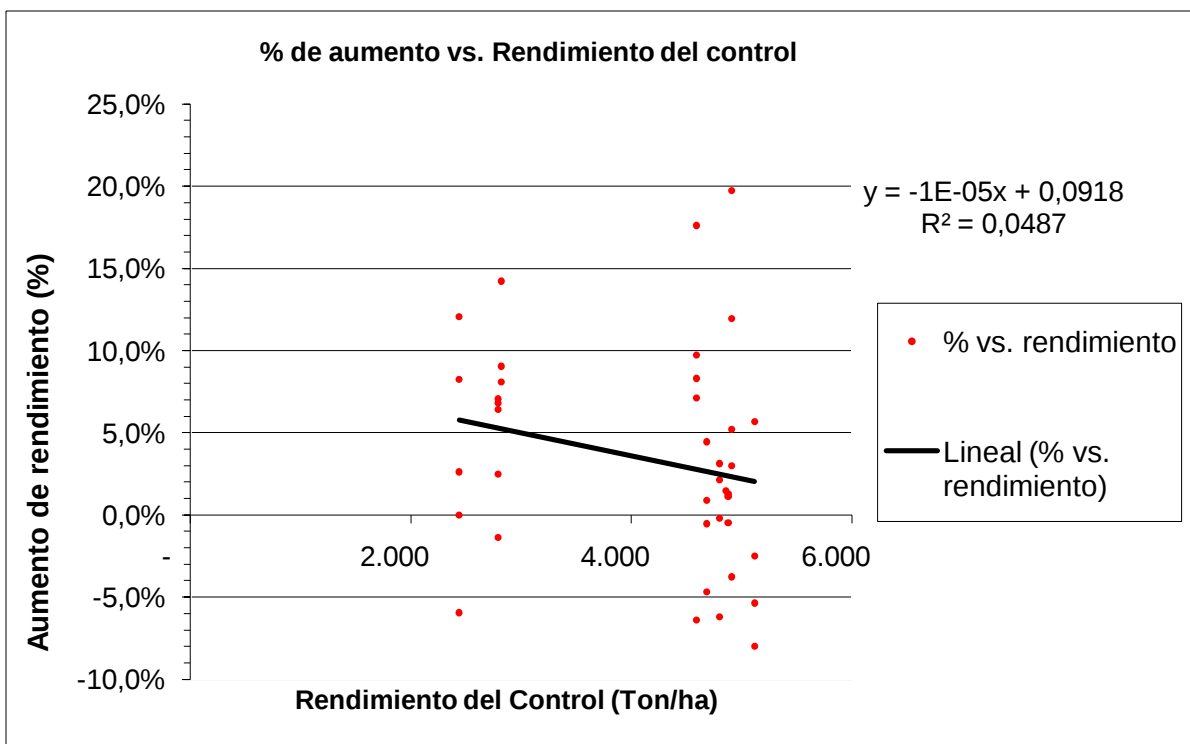


Figura N° 8: % de aumento del rendimiento vs. rendimiento del control en líneas endocriadas.

CONCLUSIONES

Se han cumplido los objetivos trazados al poder cuantificar el impacto de la fertilización foliar como técnica para incrementar los rendimientos en cultivos de maíz. Se han respondido las preguntas planteadas; ¿aumentan los fertilizantes foliares los rendimientos en maíz? ¿en qué medida promedio lo hacen? Se cuantificó, además, la variabilidad de esta respuesta y se examinaron posibles variables que puedan explicar parte de esta variabilidad encontrada en la respuesta. Quedaron por examinar en un modelo estadístico más abarcativo otras variables que permitan explicar gran parte de la variabilidad observada.

Se concluye que:

- El Meta-análisis constituye una poderosa herramienta estadística que le permite al investigador resumir y dar significado estadístico a una gran cantidad de ensayos que, estando aislados, fueron no significativos estadísticamente. Además otorga mayor alcance a las conclusiones comparado con el análisis de ensayos individuales. No obstante cabe señalar que debe ser utilizada cuidadosamente a efectos de evitar sacar conclusiones equivocadas o apresuradas.
- Los análisis de homogeneidad sugirieron que los tratamientos evaluados son distintos entre sí y tienen efectos diferentes sobre el cultivo. Este punto sugiere una línea de estudio para la elaboración de un modelo matemático que explique la variación en la magnitud de las respuestas mediante factores tales como el producto utilizado, dosis, precipitaciones en el ciclo, momento de aplicación, fertilización de base, etc.
- Se hallaron evidencias de que la utilización de fertilizantes foliares en maíz aumenta significativamente el rendimiento en promedio. A nivel del meta-análisis, se encontró una diferencia en el aumento del rendimiento entre los híbridos y las líneas endocriadas. El efecto sobre los híbridos fue un aumento promedio de 518 kg/ha con un intervalo de confianza del 95% de [370 kg/ha - 665 kg/ha], implicando un aumento promedio del 5,7%. El aumento sobre las líneas endocriadas fue de 160 kg/ha en promedio, con un intervalo de confianza del 95% de [81 kg/ha - 239 kg/ha], equivalente a un 3,8 %.
- En híbridos de maíz, a mayores rendimientos (mejores ambientes) la respuesta en rendimiento de los fertilizantes foliares no sólo es mayor en kilos sino también en porcentaje. La ecuación de la recta que estima el incremento en rendimiento es $y = 1,4x - 7,41$, estando x expresada en toneladas e y en porcentaje. Hay que recordar aquí que esta es una aproximación debido a que restan por explicar varios factores como lo son el producto a aplicar, dosis, etc. Esto probablemente se deba a que el maíz pasa a tener otras limitantes diferentes al agua, que es la principal, cobrando importancia los micro-nutrientes o los macro-nutrientes aplicados en momentos críticos mediante fertilizaciones foliares.
- En líneas endocriadas, la respuesta en % de aumento del rendimiento por el uso de fertilizantes foliares no se relacionó significativamente con el ambiente a diferencia de los híbridos.

- Este trabajo le permite al productor analizar a la fertilización foliar en maíz como una alternativa para incrementar los rendimientos del maíz disminuyendo la incertidumbre que existía previamente debido a la elevada cantidad de ensayos con resultados no significativos.

BIBLIOGRAFÍA

- Borenstein, M. Effect sizes for continuous data. En: Cooper, H.; Hedges, L. V.; Valentine, J. C. (eds.) *The Handbook of Research Synthesis and Meta-analysis*. California, Russell Sage Foundation, 2ª edición, 2009, pág. 221-235.
- Cooper, H.; Hedges, L. V.; Valentine, J. C. *The Handbook of Research Synthesis and Meta-analysis*. California, Russell Sage Foundation, 2ª edición, 2009.
- Cruzate, G. A.; Rivero, E.; Turati, R. (2006) *Cobre, Hierro y Manganeso: Mapas de disponibilidad y respuesta a la fertilización en suelos de la región pampeana*. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Septiembre 2006.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2007 a) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria por vía foliar. Experiencias en fertilización y protección en el cultivo de Maíz. INTA. Págs. 116-122.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2007 b) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria con nitrógeno y cinc por vía foliar. Maíz en Siembra Directa. AAPRESID 2007. Pág. 114-119.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A.; Ponsa, J. C. (2007 c) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria mediante el agregado de nutrientes y compuestos orgánicos y promotores del crecimiento por vía foliar. Experiencias en fertilización y protección en el cultivo de Maíz. INTA. Págs. 91-96.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2007 d) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria mediante el agregado de nutrientes por vía foliar. Experiencias en fertilización y protección en el cultivo de Maíz. INTA. Págs. 86-90.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2007 e) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria por vía foliar. Experiencias en fertilización y protección en el cultivo de Maíz. INTA. Págs. 107-112.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2007 f) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria por vía foliar. Experiencias en fertilización y protección en el cultivo de Maíz. INTA. Págs. 123-127.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2008 a) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria con nitrógeno y cinc por vía foliar. INTA.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A.; Ponsa, J. C. (2008 b) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria. INTA.
- Ferraris, G. N.; Ponsa, J. C.; Couretot, L. A. (2008 c) Efecto de la fertilización sobre la recuperación de un maíz afectado por heladas. INTA.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2008 d) Evaluación aditiva de tecnologías complementarias en maíz. El caso de los promotores de crecimiento, fertilizantes foliares y fungicidas. Campaña 2007/2008. INTA.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2009 a) Respuesta del maíz a la fertilización complementaria con nitrógeno, cinc, boro y otros nutrientes aplicados por vía foliar. Agromercado. Julio 2009. Pág. 22-24.
- Ferraris, G. N.; Couretot, L. A. (2009 b) Tecnologías para la aplicación de microelementos en maíz. Dosis y sistemas de aplicación de zinc en combinación con fuentes nitrógeno-azufradas. Campaña 2008/2009. INTA.
- Hedges, L.V., Olkin, I. (1985) *Statistical Methods for Meta-Analysis*. Academic Press, New York.

- Higgins, J. P.T.; Thompson, S. G. (2002) Quantifying Heterogeneity in a Meta-Analysis. *Statistics in Medicine* 21(11): 1539-58.
- Meilán, P.; Zapata, C. (2010) Informe preliminar. Ensayo fertilización foliar 09-10. Sector Investigación y Desarrollo, Satus Ager S.A.
- Miguez, F. E. Winter Cover Crops: Meta-analysis and Illinois Field Study (Tesis de Maestría) University of Illinois (2004).
- Molinero Casares, L. M. (2001) Metaanálisis: claves para interpretar una herramienta de investigación controvertida. *Hipertensión*. 5 (18): 232-240.
- Molinero Casares, L. M. (2003) Meta-análisis. Artículo preparado para la página web de la Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión. <http://www.seh-lilha.org/metaanalisis.htm> .
- Montesano, A. M.; Salomón, A.; Teramo, C. D.; Masiero, B. (2003) Fertilización del cultivo de Maíz. INTA.
- Mousegne, F.; López de Sabando, M. (2007 a) Maíz: Fertilización Foliar Campaña 2005-06. Experiencias en fertilización y protección en el cultivo de Maíz. INTA. Págs. 9-12.
- Mousegne, F.; López de Sabando, M.; Paganini, A. (2007 b) Maíz: Fertilización Foliar Campaña 2006-07. Experiencias en fertilización y protección en el cultivo de Maíz. INTA. Págs. 20-24.
- Ratto de Miguez, S., Giuffré, L. y Sainato, C. (1997) Variación espacial de micronutrientes en suelo y planta en un molisol. *Ciencia del Suelo* 15:39-41.
- Sillanpaa, M. (1982) Micronutrient and the nutrient status of soils a global study. *FAO Soils Boll.* Roma, Italia.
- Trinidad Santos, A.; Aguilar Manjarrez, D. (1999) Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos. *Terra*. 3 (17).
- Urricariet, S. y Lavado, R. S. (1999) Deterioro de los suelos de la Pampa Ondulada. *Ciencia del suelo*. 17:37-44.
- Yamada, T. (2004) Deficiencias de micronutrientes, ocurrencia, detección y corrección: “El éxito de la experiencia brasilera”. *Informaciones Agronómicas*. N° 24. Dic. 2004.
- Zapata, C.; Cosentino, F. (2008) Informe preliminar. Ensayo fertilización foliar 07-08. Sector Investigación y Desarrollo, Satus Ager S.A.
- Zapata, C. (2009) Informe preliminar. Ensayo fertilización foliar 08-09. Sector Investigación y Desarrollo, Satus Ager S.A.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	1
<i>Meta-análisis</i>	2
<i>Objetivos</i>	3
MATERIALES Y MÉTODOS	3
<i>Parte experimental</i>	3
<i>Ensayos con limitantes de polen</i>	3
<i>Ensayos sin limitantes de polen</i>	4
<i>Meta-análisis estadístico</i>	7
<i>Criterios para la búsqueda y selección de ensayos</i>	7
<i>Meta-análisis estadístico</i>	7
<i>Software y herramientas estadísticas utilizadas</i>	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
<i>Parte Experimental</i>	11
<i>Meta-análisis estadístico</i>	14
<i>Meta-analisis para Líneas endocriadas</i>	16
<i>Meta-analisis para Híbridos</i>	17
<i>Efecto del ambiente como modulador de la respuesta.</i>	19
CONCLUSIONES	22
BIBLIOGRAFÍA	24
ÍNDICE GENERAL	26
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	27
ANEXO A	28

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura N° 1. Esquema de los tratamientos en campos de producción de semillas	4
Figura N° 2. Esquema de los tratamientos sin limitación de polen	5
Tabla N° 1. Productos utilizados en cada tratamiento, estadio y dosis de aplicación	6
Tabla N° 2. Composición química de los productos utilizados	6
Tabla N° 3. Resultados de los tratamientos en El Crisol	12
Tabla N° 4. Resultados de los tratamientos en María Laura con Línea A	12
Tabla N° 5. Resultados de los tratamientos en María Laura con Línea A	12
Tabla N° 6. Resultados de los tratamientos en Segundo Brasca con Línea A	13
Tabla N° 7. Resultados de los tratamientos en Segundo Brasca con Línea A	13
Figura N° 3. Gráfico de L'Abbé	15
Tabla N° 8: Efecto de la fertilización sobre híbridos y líneas endocriadas según meta-análisis	16
Figura N° 4. Forest-Plot perteneciente a las líneas endocriadas	17
Figura N° 5. Forest-Plot perteneciente a los híbridos	18
Figura N° 6. Aumento en el rendimiento en kg/ha vs. rendimiento del control	19
Figura N° 7. % de aumento del rendimiento vs. rendimiento del control en híbridos	20
Figura N° 8. % de aumento del rendimiento vs. rendimiento del control en líneas endocriadas	21

ANEXO A

Se incluye en este anexo una tabla que resume los resultados de los ensayos utilizados en la elaboración del meta-análisis. El código es un número utilizado para diferenciar ensayos debido a la presencia en muchos casos de más de un ensayo por cita bibliográfica. Cabe aclarar que no se ha respetado la terminología original de los tratamientos sino que se unificó el criterio utilizando números. Los efectos reportados en la tabla son la diferencia sobre el testigo de cada ensayo.

Bibliografía	Codigo	Trat	Producto	Rendimiento	Efecto (kg/ha)	Efecto (%)
Meilán 2010	1	1	Yara	3.221	401	14,2%
Meilán 2010	1	2	Maxi Zinc	3.048	228	8,1%
Meilán 2010	1	3	Compo	3.075	255	9,0%
Meilán 2010	1	0	Testigo	2.820	-	0,0%
Meilán 2010	2	1	Stoller+Stim.	2.861	69	2,5%
Meilán 2010	2	2	Yara+Tepro.	2.989	197	7,1%
Meilán 2010	2	3	Stoller	2.754	- 38	-1,4%
Meilán 2010	2	4	Yara	2.982	190	6,8%
Meilán 2010	2	5	Compo	2.971	179	6,4%
Meilán 2010	2	0	Testigo Linea A	2.792	-	0,0%
Meilán 2010	3	1	Stoller+Stim.	5.163	256	5,2%
Meilán 2010	3	2	Yara+Tepro.	4.722	- 185	-3,8%
Meilán 2010	3	3	Stoller	5.493	586	11,9%
Meilán 2010	3	4	Yara	5.875	968	19,7%
Meilán 2010	3	5	Compo	5.054	147	3,0%
Meilán 2010	3	0	Testigo Linea B	4.907	-	0,0%
Meilán 2010	4	1	Stoller+Stim.	2.502	64	2,6%
Meilán 2010	4	2	Yara+Tepro.	2.732	294	12,1%
Meilán 2010	4	3	Stoller	2.639	201	8,2%
Meilán 2010	4	4	Yara	2.438	-	0,0%
Meilán 2010	4	5	Compo	2.293	- 145	-5,9%
Meilán 2010	4	0	Testigo Linea A	2.438	-	0,0%
Meilán 2010	5	1	Stoller+Stim.	4.295	- 293	-6,4%
Meilán 2010	5	2	Yara+Tepro.	5.396	808	17,6%
Meilán 2010	5	3	Stoller	4.914	326	7,1%
Meilán 2010	5	4	Yara	4.969	381	8,3%
Meilán 2010	5	5	Compo	5.034	446	9,7%
Meilán 2010	5	0	Testigo Linea B	4.588	-	0,0%
Zapata 2009	6	1	Yara 1	4.854	- 23	-0,5%
Zapata 2009	6	2	Yara 2	4.932	55	1,1%
Zapata 2009	6	3	Compo	4.939	62	1,3%
Zapata 2009	6	0	Testigo	4.877	-	0,0%
Zapata 2008	7	1	Foliar	4.929	72	1,5%
Zapata 2008	7	0	Testigo	4.857	-	0,0%
Ferraris 2009 a	8	0	Testigo	5.738	-	0,0%
Ferraris 2009 a	8	3	Genofix S	6.363	625	10,9%
Ferraris 2009 a	8	4	Topfix	5.269	- 469	-8,2%

Ferraris 2009 a	8	5	Macrofix	5.738	-	0,0%
Ferraris 2009 a	8	6	Complefix	6.713	975	17,0%
Ferraris 2009 a	9	0	Testigo Zn	6.244	-	0,0%
Ferraris 2009 a	9	7	Genofix S +Z	6.413	169	2,7%
Ferraris 2009 a	9	8	Topfix +Zn	6.556	312	5,0%
Ferraris 2009 a	9	9	Macrofix +Z	6.363	119	1,9%
Ferraris 2009 a	9	10	Complefix +Z	6.700	456	7,3%
Ferraris 2008 b	10	0	Testigo	10.688	-	0,0%
Ferraris 2008 b	10	1	Fertideg NS P 6000	11.250	562	5,3%
Ferraris 2008 b	10	2	Fertideg NS P 10000	11.588	900	8,4%
Ferraris 2008 b	10	3	Fertideg Max 3000	10.825	137	1,3%
Ferraris 2008 b	10	4	Fertideg Max 5000	11.150	462	4,3%
Ferraris 2007 a	11	T	Testigo	10.417	-	0,0%
Ferraris 2007 a	11	1	FoliarsolU (urea)!	11.173	756	7,3%
Ferraris 2007 a	11	2	Zn 1000	10.729	312	3,0%
Ferraris 2007 a	11	3	FoliarsolU + Zn1000	11.622	1.205	11,6%
Ferraris 2007 a	11	4	FoliarsolU + Zn2000	10.887	470	4,5%
Ferraris 2007 b	12	0	Testigo	8.861	-	0,0%
Ferraris 2007 b	12	1	Fertideg NS 6 litros	8.979	118	1,3%
Ferraris 2007 b	12	2	Fertideg NS 10 litros	9.080	219	2,5%
Ferraris 2007 d	13	0	Testigo	10.295	-	0,0%
Ferraris 2007 d	13	1	Zinc	11.523	1.228	11,9%
Ferraris 2007 d	13	2	Azufre	10.420	125	1,2%
Ferraris 2007 d	13	3	Boro	10.557	262	2,5%
Ferraris 2007 d	13	4	Zinc + Boro	11.386	1.091	10,6%
Ferraris 2007 d	13	5	Complefix	10.875	580	5,6%
Ferraris 2007 d	13	6	Nitrógeno	11.739	1.444	14,0%
Ferraris 2007 c	14	0	Testigo	9.705	-	0,0%
Ferraris 2007 c	14	2	Chase en v6	10.670	965	9,9%
Ferraris 2007 c	14	3	Chase en v9	9.966	261	2,7%
Ferraris 2007 c	14	4	Chase en v6 y v9	11.307	1.602	16,5%
Ferraris 2009 b	15	0	Testigo	7.620	-	0,0%
Ferraris 2009 b	15	2	N	8.030	410	5,4%
Ferraris 2009 b	15	3	Zn	7.213	- 407	-5,3%
Ferraris 2009 b	15	4	N + Zn	7.087	- 533	-7,0%
Ferraris 2008 a	16	0	Testigo	10.894	-	0,0%
Ferraris 2008 a	16	1	Urea foliar	10.906	12	0,1%
Ferraris 2008 a	16	2	Basfoliar Zn	12.275	1.381	12,7%
Ferraris 2008 a	16	3	Urea f + Basfoliar Zn	11.444	550	5,0%
Ferraris 2008 a	16	4	Sulfato de Zn	11.650	756	6,9%
Ferraris 2008 a	16	5	Urea f + sulf de Zn	12.638	1.744	16,0%
Ferraris 2008 a	16	6	Urea f + Basfo Zn2	11.438	544	5,0%
Ferraris 2008 c	17	0	Testigo	10.225	-	0,0%
Ferraris 2008 c	17	1	Zinc	11.819	1.594	15,6%
Ferraris 2008 c	17	2	Boro	11.294	1.069	10,5%
Ferraris 2008 c	17	3	Zn + B	12.206	1.981	19,4%
Ferraris 2008 c	17	4	Nitrógeno	9.719	- 506	-5,0%
Ferraris 2008 c	17	5	Zn + N + B	11.563	1.338	13,1%
Ferraris 2008 c	17	6	Topfix	9.906	- 319	-3,1%

Ferraris 2008 c	17	7	Macrofix	11.325	1.100	10,8%
Ferraris 2008 c	17	8	Complefix	11.531	1.306	12,8%
Montesano 2003	18	0	Testigo 18 N	7.076	-	0,0%
Montesano 2003	18	5	18N + foliar	7.063	- 13	-0,2%
Montesano 2003	19	0	Testigo 41N	7.466	-	0,0%
Montesano 2003	19	7	41N + foliar	7.654	188	2,5%
Montesano 2003	20	0	Testigo 22N + S	7.075	-	0,0%
Montesano 2003	20	10	22N + S + foliar	6.726	- 349	-4,9%
Zapata 2009	21	0	Testigo	7.648	-	0,0%
Zapata 2009	21	2	Basfoliar Zn	7.795	147	1,9%
Zapata 2009	21	3	Nfka PS + Basf Zn	7.893	245	3,2%
Zapata 2009	21	4	Basf Zn + Nfka + Basf	8.195	547	7,2%
Ferraris 2008 d	22	2	Testigo Pseudom	9.456	-	0,0%
Ferraris 2008 d	22	4	Pseudo + fertideg NS pl	10.463	1.007	10,6%
Ferraris 2008 d	23	3	Pseud + Fungi	10.531	-	0,0%
Ferraris 2008 d	23	5	Ps. + FG + Fertideg	10.766	235	2,2%
Ferraris 2007 f	24	0	Testigo	9.101	-	0,0%
Ferraris 2007 f	24	1	Zinc V6	9.134	33	0,4%
Ferraris 2007 f	24	2	Azufre V6	9.202	101	1,1%
Ferraris 2007 f	24	3	Complejo V6	9.122	21	0,2%
Ferraris 2007 f	24	4	Boro V9	9.238	137	1,5%
Ferraris 2007 f	24	5	Fósforo Vt	8.399	- 702	-7,7%
Ferraris 2007 f	24	6	Nitrógeno V9	9.792	691	7,6%
Ferraris 2007 f	25	0	Testigo zn semilla	9.598	-	0,0%
Ferraris 2007 f	25	1	Zinc semilla + boro	9.946	348	3,6%
Ferraris 2007 e	26	0	Testigo	8.861	-	0,0%
Ferraris 2007 e	26	1	Chase N4 + SM3 V6	9.527	666	7,5%
Ferraris 2007 e	26	2	Chase N4 + SM3 V9	9.167	306	3,5%
Ferraris 2007 e	26	3	Chase N4 + SM3 V6+V9	9.339	478	5,4%
Mousegne 2007 b	27	0	Testigo	12.252	-	0,0%
Mousegne 2007 b	27	1	Natufert 0,75 l	14.848	2.596	21,2%
Mousegne 2007 b	27	2	Natufert 1,5 l	13.832	1.580	12,9%
Mousegne 2007 b	27	3	Natufert 2 l	14.173	1.921	15,7%
Mousegne 2007 a	28	0	Testigo	10.600	-	0,0%
Mousegne 2007 a	28	1	Nitrofoska 2k + Zn foliar	10.941	341	3,2%
Mousegne 2007 a	28	2	Nitrofoska 2k + Fetrilon	11.001	401	3,8%
Mousegne 2007 a	28	3	Fertideg 6l	11.128	528	5,0%
Mousegne 2007 a	28	4	Chase nitro + SM3	10.641	41	0,4%
S. Ager 2011 inédito	29	0	Testigo	5.117	-	0,0%
S. Ager 2011 inédito	29	1	Brandt	5.407	290	5,7%
S. Ager 2011 inédito	29	2	Stoller	4.708	- 409	-8,0%
S. Ager 2011 inédito	29	3	Yara 2	4.843	- 274	-5,4%
S. Ager 2011 inédito	29	4	Compo	4.989	- 128	-2,5%
S. Ager 2011 inédito	30	0	Testigo	4.681	-	0,0%
S. Ager 2011 inédito	30	1	Brandt	4.462	- 220	-4,7%
S. Ager 2011 inédito	30	2	Stoller	4.889	208	4,4%
S. Ager 2011 inédito	30	3	Yara 2	4.656	- 25	-0,5%
S. Ager 2011 inédito	30	4	Compo	4.723	42	0,9%
S. Ager 2011 inédito	31	0	Testigo	4.798	-	0,0%

S. Ager 2011 inédito	31	1	Brandt	4.948		150	3,1%
S. Ager 2011 inédito	31	2	Stoller	4.788	-	10	-0,2%
S. Ager 2011 inédito	31	3	Yara 2	4.500	-	297	-6,2%
S. Ager 2011 inédito	31	4	Compo	4.900		102	2,1%