

Zinc en los fertilizantes

La contribución a la solución de un problema nutricional mundial

Internacional Zinc Association (IZA) y Asociación Latinoamericana del Zinc (LATIZA)



“La deficiencia de Zinc en los cultivos es un problema global que reduce el rendimiento de las cosechas y el estatus nutricional...” “Un tercio de la población mundial está bajo riesgo de padecer deficiencia de zinc, en ciertos países en rangos del 4% al 73% de sus habitantes...” “Frecuentemente las áreas con deficiencia de zinc en suelos, también son las regiones en donde la falta de zinc en los humanos está más generalizada...” “De acuerdo al Consenso de Copenhague, el zinc y la vitamina A pueden tratar efectivamente el problema de nutrición humana considerado como el número uno que enfrenta el mundo..”

Introducción

Desde hace años la deficiencia de zinc en humanos, ganado y cultivos, se ha reconocido como un asunto crítico por nutricionistas, médicos y

Tabla 1: Sensibilidad relativa de los cultivos a la deficiencia de zinc

Alta	Media	Baja
Poroto	Cebada	Alfalfa
Cítricos	Algodón	Espárragos
Lino	Lechuga	Zanahoria
Frutales de hoja caduca	Papa	Trébol
Uva	Soja	Pastos
Lúpulo	Pasto Sudan	Avena
Maíz	Remolacha azucarera	Arvejas
Cebolla	Rábano Centeno	
Pecan	Tomate	
Arroz		
Sorgo		
Trigo		
Modificada por Alloway, 2008		

agrónomos. Sin embargo, recientemente ha recibido mayor atención por otros grupos, incluyendo economistas y sociólogos, que reconocen que este es un problema nutricional global con implicaciones significativas en temas de salud, sociales y económicos. Se estima que cerca de la mitad de la población mundial tiene deficiencias de zinc, causando numerosas complicaciones de

salud, incluyendo daños al sistema inmunológico y funciones mentales. Se estima también que cerca de la mitad de los suelos agrícolas del mundo son deficientes en zinc, lo que lleva a reducciones de rendimientos de cultivos y de su valor nutritivo.

Adicionalmente, el consumo de alimentos basados en cereales, que son

típicamente bajos en zinc, contribuye hasta un 70% de la ingesta diaria de calorías en la mayoría de los países en desarrollo, lo que resulta en la permanencia de la deficiencia de zinc en estas poblaciones (Cakmak, 2008).

Esta relación directa entre la distribución de los suelos deficientes en zinc y la incidencia de la falta de zinc en la población humana, puede ser tratada con el uso de fertilizantes portadores zinc. Como parte de una recomendación de fertilización balanceada para los suelos agrícolas, el agregado de zinc incrementa la producción de cultivos y su estatus nutricional (ejemplo: mayores niveles de zinc disponible para consumo humano y animal). Esto puede beneficiar a todos los involucrados, desde el productor agrícola quien tendrá mayor rentabilidad por incrementar sus rendimientos, los engor-dadores de distintas cadenas de carnes (avícola, porcina, bovina) hasta las familias que obtendrán más zinc en su dieta.

Los suelos deficientes en Zinc, la causa original de deficiencia de Zn en los cultivos

Hoy, se estima que el 50% de los suelos agrícolas destinados al cultivo de cereales son potencialmente deficientes en zinc. Más de dos terceras partes del arroz cultivado en el mundo son producidos en suelos inundados, que generalmente contienen muy baja cantidad de zinc disponible para las plantas. El trigo se cultiva extensivamente también en suelos alcalinos, calcáreos, con baja materia orgánica en regiones semiáridas en varias regiones del mundo. Estos suelos y las condiciones climáticas, conllevan a que haya menos zinc disponible para la absorción y uso de la planta. Bajo condiciones de suelos deficientes en zinc, las plantas muestran una

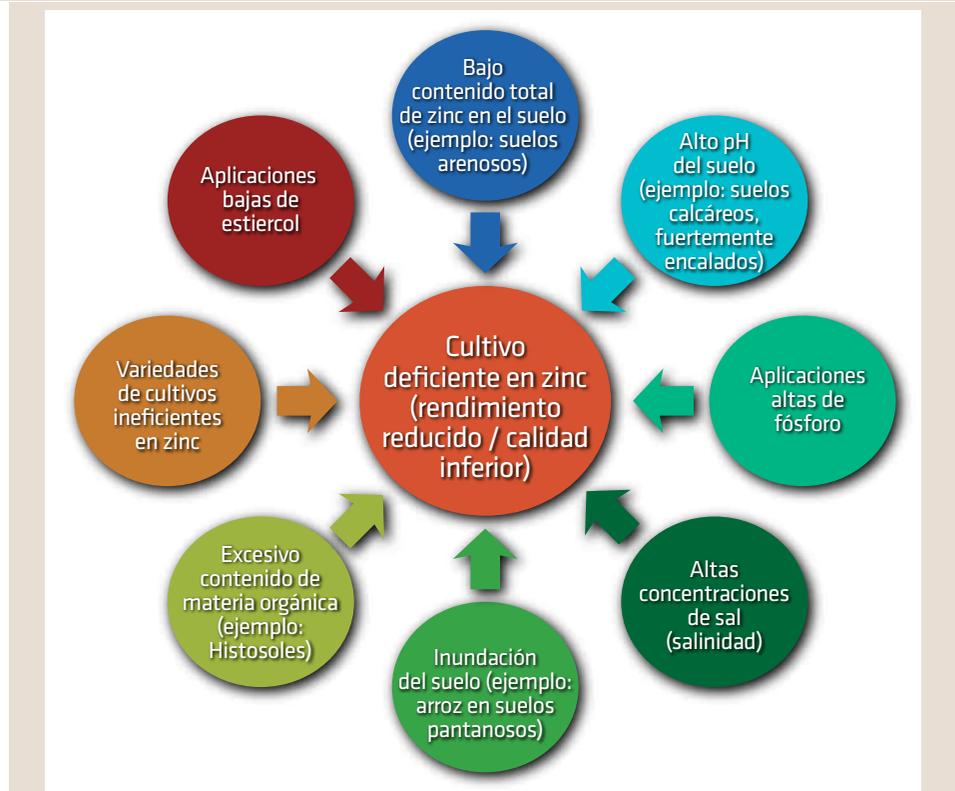


Figura 2. Diagrama Esquemático de las causas de deficiencia del zinc en cultivos.

alta susceptibilidad a los factores de estrés del medio ambiente, tales como la sequía, alta temperatura e infecciones patológicas, que estimulan el desarrollo de la clorosis y necrosis en las hojas, causando un retraso en el crecimiento (Figura 2).

La alta incidencia de suelos deficientes en zinc en la mayoría de las zonas agrícolas limita severamente la productividad agrícola. Por lo tanto, los fertilizantes de zinc pueden hacer una contribución significativa hacia el objetivo de obtener mayores rendimientos de una manera sustentable y ambientalmente responsable. De manera simultánea, los fertilizantes de zinc pueden mejorar la concentración de este microelemento en el grano y por lo tanto, contribuir grandemente a la ingesta diaria de zinc de la población humana.

Un estudio para la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) realizado por Sillanpää encontró que entre los

micronutrientes, la deficiencia de zinc era la más común del mundo. El estudio, que examinó 190 campos experimentales en 15 países, encontró que esta problemática Alloway 2008 ocurre en uno de cada dos experimentos.

La deficiencia de zinc en los cultivos alimenticios reduce el rendimiento y su valor nutricional. El zinc es uno de los ocho microelementos en trazas que las plantas requieren para un normal crecimiento y reproducción. Cerca del 10% de todas las proteínas en los sistemas biológicos necesitan al zinc para sus funciones y estructura. Las plantas requieren del zinc en pequeñas pero críticas concentraciones para cumplir con varias funciones clave, incluyendo: funciones en la membrana, fotosíntesis, síntesis proteica y de fitohormonas (ejemplo: auxina), vigor de la plántula, formación de azúcares y defensas contra factores de estrés abióticos (ejemplo: sequías) y enfermedades. Aún cuando a una planta se le suministren macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio y

agua), la deficiencia de zinc impide que las plantas alcancen su potencial productivo.

El zinc reduce la acumulación de cadmio en las plantas

Se sabe que el cadmio es un metal tóxico. Cuando se acumula en altas concentraciones en el cuerpo, puede causar severas consecuencias a la salud, como un incremento en el riesgo de fracturas óseas, daño pulmonar, disfunción renal e hipertensión. Los alimentos contaminados con cadmio son la ruta predominante para la acumulación de este metal pesado en los organismos que lo consumen. En muchos países, especialmente en Asia, donde varias estimaciones indican que la ingesta originada por el arroz contaminado, es la responsable del 40-45% del total de cadmio ingerido en poblaciones humanas de algunos países asiáticos. En los Estados Unidos, aproximadamente el 20% de la ingesta diaria de cadmio se deriva de los cereales. El arroz, trigo duro (pastas) y tubérculos (papas), también pueden acumular grandes cantidades de cadmio, ocasionando baja calidad de los alimentos cosechados y amenazando con exportar productos contaminados.

Cada vez existen más evidencias, que muestran que el zinc interfiere significativamente con la absorción y transporte del cadmio en la estructura de las plantas (metabolismo). El zinc y el cadmio son químicamente similares, y por lo tanto compiten por sitios de enlace y proteínas de células transportadoras de la planta. Cuando las plantas son deficientes en zinc, o cuando el medio de

crecimiento contiene poco zinc, absorben y transportan grandes cantidades de cadmio. Hay disponibles varios reportes que muestran que las plantas establecidas en condiciones de suelo deficiente en zinc, acumulan más cadmio en el grano u otras partes comestibles.

Las aplicaciones de zinc al suelo o foliares, son por lo tanto, muy útiles para reducir la acumulación de cadmio. Datos de Australia, Canadá y Turquía muestran una reducción significativa de la absorción de cadmio en la zona radicular y finalmente su concentración en el grano, después de aplicaciones de fertilizantes de zinc al suelo o foliares. Un ejemplo se muestra en la Tabla 2. Adonde se aplicó sulfato de zinc al suelo que redujo significativamente la acumulación de cadmio en el grano de semillas de lino y trigo mientras que la concentración de zinc se incrementó.

El zinc en los cultivos y la salud humana, el vínculo vital

El zinc es vital para muchas funciones biológicas en el cuerpo humano. Un cuerpo adulto contiene 2-3 gramos de zinc, presentes en todas las partes del cuerpo, incluyendo: órganos, tejidos, huesos, fluidos y células. El zinc es esencial para el funcionamiento correcto de

un gran número de proteínas y de más de 100 enzimas específicas (Andreini et al, 2006). El zinc también protege a células vegetales y de humanos del ataque dañino de los radicales libres que son muy tóxicos. La ingesta diaria de zinc recomendada para una mujer adulta es de 12 mg y para un hombre adulto es de 15 mg. “...se estima que la deficiencia de zinc afecta a aproximadamente un tercio de la población mundial... Globalmente, la deficiencia de zinc es responsable de aproximadamente 16% de las infecciones de las vías respiratorias, 18% de la malaria, y 10% de la diarrea... 800,000 muertes en el mundo fueron ocasionadas por la deficiencia de zinc.” – Reporte de salud mundial 2002, Organización Mundial de la Salud (OMS).

La deficiencia de zinc al inicio de la vida puede dañar el crecimiento y desarrollo físico y neurológico, funciones cerebrales, habilidades de memoria y aprendizaje. La deficiencia severa de zinc se caracteriza en provocar retraso en el desarrollo físico y sexual, inmunidad baja, enfermedades de la piel y anorexia. Además, se estima que la deficiencia de zinc es responsable de cerca de 450,000 muertes, o 4.4% de los niños menores a cinco años (UNICEF, Black et al, 2008). De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), la deficiencia de zinc es la quinta mayor causa de

Tratamiento	Zn en Fert.	Concentración de Zn en grano		Concentración de Cd en grano	
		Lino (mg Zn/kg)	Trigo	Lino (µg kg-1)	Trigo
MAP	NO	22	9	226	267
MAP	SI	39	27	136	90
MAP+Cd	NO	25	10	330	275
MAP+Cd	SI	42	31	211	165
TSP	NO	22	8	228	254
TSP	SI	41	27	138	112

TABLA 2: Efecto de la Concentración de Zinc en el Suelo en la Concentración de Zinc y Cadmio en el grano de Lino y de Trigo (Jiao et al 2004).

	Solución	Desafío
1	Suministro de micronutrientes a los niños (Vitamina A y Zn)	Desnutrición
2	Agenda de desarrollo de Doha	Reglas de Comercio
3	Fortificación de micronutrientes (hierro y iodización de la sal)	Desnutrición
4	Cobertura de inmunización extensiva a los niños	Enfermedades
5	Biofortificación	Desnutrición
6	Desparasitación y otros programas de nutrición en las escuelas	Desnutrición y educación
7	Reducción del costo de la educación	Educación
8	Aumentar y mejorar la educación de las niñas	Rol de las Mujeres
9	Promoción nutricional en las comunidades	Desnutrición
10	Proveer asistencia a mujeres en edad reproductiva	Rol de las Mujeres

Consenso Copenhague 2008

Tabla 3: Consenso Copenhague 2008: Los 10 Problemas más Importantes del Mundo

compuesto orgánico bien conocido como fertilizante portador de zinc. Sin embargo, debido a su alto costo, su empleo en la agricultura es limitado. Adicionalmente, resultados recientes muestran que, en aspersiones foliares, el sulfato de zinc es más efectivo que el EDTA en términos del incremento de la concentración de zinc en el grano.

En general, el zinc aplicado como aspersión foliar se usa una dosis entre

muerte y enfermedades en los países en desarrollo (OMS, 2002).

Los impactos globales en la salud han sido claramente identificados por el Consenso Copenhague (www.copenhagenconsensus.com), conformado por un grupo de ocho economistas líderes, incluyendo a cinco ganadores del premio Nobel.

En 2008, el Consenso declaró que, en términos de soluciones económicamente efectivas a los problemas más persistentes del mundo, proveer zinc y vitamina A debería ser la primera prioridad (de 40) (Tabla 3). El grupo también concluyó que el zinc y la vitamina A podrían ser suministradas al 80% anual, con beneficios resultantes (en términos de mejor salud, incremento en ganancias futuras y menos muertes) de más de US\$1,000 millones. Un retorno de US\$17 por cada dólar gastado.

En diversas regiones del Mundo, los cereales son la principal fuente de calorías, proteínas y minerales, en general cultivos producidos en suelos deficientes en zinc, y por ende son las regiones con carencia de zinc en los humanos.

En los países en desarrollo, los cereales proveen hasta el 70% de la ingesta de calorías. Por esta razón, el contenido de zinc en los principales cultivos básicos como trigo, arroz, maíz y frijol es de particular interés. Por consiguiente, hay una liga vital y directa entre la deficiencia de zinc en los suelos, cultivos y humanos en estas áreas. De hecho, un estudio en la India ha documentado el más bajo estatus de zinc (en el plasma sanguíneo) en gente que se alimenta de cereales con menor contenido de zinc, que viene de suelos deficientes (Singh, 2009).

Resolviendo la Deficiencia de zinc con fertilizantes de zinc

Aplicación de fertilizantes de zinc

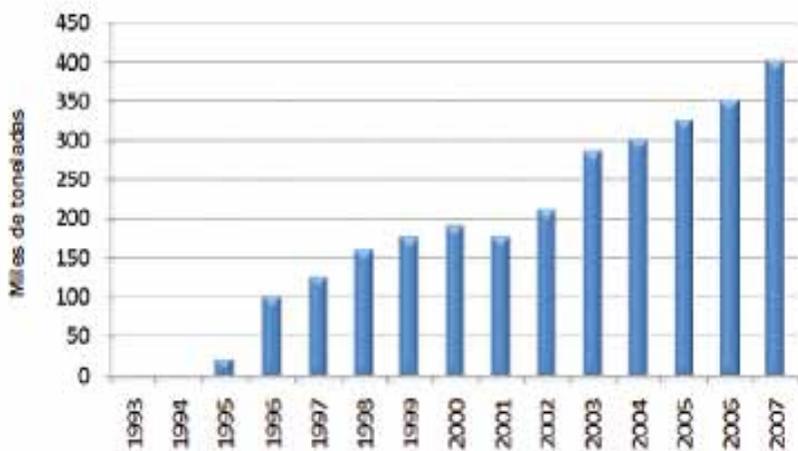
La deficiencia de zinc se corrige de manera rutinaria con aplicaciones tanto al suelo como foliares. El sulfato de zinc ($ZnSO_4$) es la fuente inorgánica de zinc más usada debido a su alta solubilidad, bajo costo y disponibilidad en el mercado. También se puede aplicar zinc al suelo en forma de óxido y oxisulfato (preferentemente en suelos ácidos). El EDTA (ácido etilen diamin tetra acético) es un

entre 0.2% a 0.5% de sulfato de zinc monohidratado. Este tipo de aplicación puede repetirse en dos o tres ocasiones durante el ciclo de crecimiento del cultivo, dependiendo de la severidad en la deficiencia de zinc en las plantas, o dependiendo del objetivo de incrementar la concentración de zinc en el grano, necesaria para una mejor nutrición humana.

Biofortificación Agronómica

Experimentos de campo con trigo mostraron que dos aplicaciones foliares de zinc, a razón de 0.5% en forma de sulfato, puede duplicar la concentración de zinc en el grano sin ningún efecto negativo en el rendimiento cuando se cultivan en suelos deficientes.

Un factor importante que afecta la aplicación de fertilizantes de zinc a los suelos es qué tan uniformemente se puede distribuir este micronutriente. Para asegurar la aplicación uniforme, el zinc se puede incorporar, o recubrir con él a los fertilizantes NPK mas comunes. Actualmente están disponibles en diferentes países, tanto el zinc incorporado (a los gránulos) o recubiertos con zinc, fertilizantes commodities de N, NP



Cakmak 2008

Figura 3: Uso de Fertilizantes NP y NPK con Zinc en Turquía

o NPK. Por ejemplo, se han producido y aplicado fertilizantes NP o NPK que contienen zinc en Sudáfrica por 25 años y en Turquía por 15 años. Las cantidades anuales de NP o NPK que contienen zinc aplicadas en Sudáfrica y Turquía representan alrededor de 500,000 t y 400,000 t, respectivamente.

En Sudáfrica, son producidas y aplicados fertilizantes que contienen zinc (al 0.5%); en Turquía, se usan fertilizantes que contienen 1% de zinc. Al agregar este micronutriente a los fertilizantes NP o NPK, se usa sulfato u óxido de zinc. En la mayoría de los casos, tanto el sulfato

como el óxido de zinc se aplican a razón de 20 a 100 kg por hectárea dependiendo del análisis del suelo.

Nuevas tecnologías

Recientemente la asociación internacional del Zinc (IZA) y el Centro Internacional de Desarrollo de fertilizantes (IFDC) se asociaron para impulsar una nueva tecnología de enriquecimiento de Zn (Zinc-Rich Core). La urea es el fertilizante más comúnmente usado, comprendiendo más de un tercio de todos los fertilizantes consumidos globalmente. Por lo tanto combinar zinc con urea (urea zincada) representa una forma ideal para aumentar el uso de fertilizantes con zinc para aumentar la productividad de los cultivos y mejorar la salud humana a través de una estrategia de intervención de nutrición más balanceada para los cultivos.

Sin embargo esta tecnología convencional posee tres problemas significativos: 1) Una inversión de capital significativa de infraestructura de aspersión en las plantas de urea, 2) Pérdidas del recubrimiento de zinc durante el transporte y manipuleo, y 3) Costos

operativos asociados con el uso de maquinaria de aspersión, lo que la convierte en un producto más caro para los productores.

La tecnología de enriquecimiento de zinc en los fertilizantes que procuran impulsar el IZA y el IFDC, implica sustituir lo que se llama la “semilla” de formación del granulo, una partícula muy pequeña normalmente de urea que sirve para iniciar la granulación en la manufactura de la urea, por una partícula de un compuesto de zinc “semilla”. Las capas de urea son así aplicadas encima del centro enriquecido de zinc para formar producir gránulos de tamaño normal (de 2 a 4 mm). Esta tecnología puede usarse para otros micronutrientes también, y soluciona todos los problemas identificados arriba asociados con la tecnología convencional de enriquecimiento.

En el primer año de pruebas en invernáculos, se demostró que la concentración de Zn en granos de arroz aumentó un 30% por encima de la urea sola y en 23% en trigo. Los rendimientos también aumentaron 17 % en arroz y 14 % en trigo, más que suficiente para cubrir los costos adicionales asociados con el costo de fortificación con zinc.

Ejemplos de la relación Beneficio/Costo de los fertilizantes de zinc

Están disponibles varios reportes publicados que muestran efectos significativos en la relación beneficio/costo en las aplicaciones de fertilizantes de zinc para agricultores con pocos recursos, especialmente en regiones donde se ha mostrado que los suelos deficientes de zinc son una preocupación mayor, como en la India (Tabla 4), Turquía, Pakistán y China:

Cerca del 50% de los suelos en la India son deficientes en zinc. El



Partícula de Urea conteniendo 3% de zinc en el centro de un granulo en sección transversal

análisis de aproximadamente 250,000 muestras de suelos y de 25,000 de plantas colectadas en la India indicaron que aproximadamente el 50% de las muestras de suelos y 45% de las plantas contenían niveles deficientes de zinc (Singh, 2007). Según Singh, se deben aplicar 325,000 toneladas de zinc anualmente hasta el año 2025 para mantener un estatus nutricional adecuado de zinc en los cultivos de la India.

Experimentos de campo en Pakistán mostraron que el enriquecimiento de las semillas con zinc, resultó en un marcado incremento del rendimiento y concentración de las semillas de trigo y garbanzo.

Según los cálculos, el incrementar la concentración de zinc en la semilla fue muy rentable y mejoró la relación beneficio/costo de 75:1 para el trigo y 780:1 para el garbanzo (Harris et al, 2008).

En China, se aplican comúnmente fertilizantes de zinc al maíz, arroz, trigo, soya y muchos cultivos hortícolas. Un estudio mostró que, cuando se agregó zinc a cinco diferentes tipos de cultivos, los rendimientos subieron entre 3.6% y 35.3% en trigo, arroz, soya, maíz y hasta de un 87.9% en naranja (Alloway, 2007).

En experimentos de campo, en cuatro variedades de trigo establecido bajo condiciones de riego en Turquía,

se incrementaron los rendimientos entre el 29% y el 355%, por la aplicación de fertilizantes con zinc, representando un promedio de incremento del 58%. Lo anterior señala que los ingresos promedio de las cuatro variedades de trigo fue de US\$477/ha. Calcular un incremento del 20%, puede ser más realista a largo plazo con el uso de fertilizantes de zinc, y el agricultor podría esperar ganancias adicionales en el orden de US\$123/ha (Phillips, 2006).

Conclusión

El Zinc es un micronutriente esencial para la salud, el desarrollo y el crecimiento normal de plantas, animales y seres humanos. Actualmente, se sabe que grandes áreas de tierra arable tienen deficiencia de zinc, ocasionando reducciones severas en la productividad de los cultivos y en la calidad nutricional de los alimentos. Todavía en muchos países, la deficiencia de zinc no se reconoce o se le da un menor valor, y no es atendida. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de entender y corregir la deficiencia para poder contribuir tanto a la producción y productividad de cultivos y su impacto en la salud de los seres humanos. El zinc también es particularmente importante para que las plantas de cultivo sean más tolerantes ante los diferentes factores de estrés tales como sequía, calor y salinidad.

La aplicación de fertilizantes de zinc al suelo y/o al follaje, ofrece una solución y es altamente efectiva a los problemas de deficiencia de zinc en los cultivos y en el aumento de las concentraciones de zinc en los alimentos. Esta estrategia previene en gran medida la pérdida innecesaria de producción de alimentos y ayuda a mejorar la salud pública. Por ejemplo, el enriquecimiento de los granos de arroz y trigo con zinc, puede salvar las vidas de hasta 48,000 niños anualmente en la India (Stein et al, 2007).

Para millones de personas alrededor del mundo, unos cuantos miligramos extra de zinc cada día pueden hacer la diferencia entre enfermedad o muerte y una vida saludable y productiva.

Asegurando que los cultivos tengan un suministro adecuado de zinc, podemos ayudar a tratar este problema global proporcionando beneficios económicos, sociales y de salud significativos.

Disponibilidad de Zinc en los suelos de la Región Pampeana

Varios estudios locales han investigado la disponibilidad de este micronutriente en la región más productiva de granos del país. Recientemente una revisión apuntó a recolectar evidencias y coordinarlas para explicar la prevalencia del problema en lotes de producción así como su distribución geográfica que de soporte a la abrumadora frecuencia de respuestas en maíz al agregado de este micronutriente evaluado en experimentos. Pocos experimentos hay sin embargo con soja, trigo o girasol. En cambio, dada la similar sensibilidad del arroz a la deficiencia de zinc, son bastante comunes las prácticas de aplicar Zn por recubrimiento de semillas o por pulverización, si bien la zona productora de arroz no se superpone con la de los típicos granos pampeanos.

La revisión evaluó bases de datos de análisis de suelos (Laboratorio Suelo Fértil y Tecnoagro) y foliares. Las 2780 muestras de lotes de producción, se agruparon según el nivel crítico más aceptado para el extractante usado: DTPA (1.0 mg Zn kg⁻¹). La base de datos de indicadores de nutrición provino de un relevamiento de 125, 48, 233 y 133 muestras foliares de soja, trigo, maíz y girasol respectivamente, que se compararon con los estándares de suficiencia.

La tabla 1 indica que cerca de dos tercios de los lotes de producción pueden dar respuestas a la aplicaciones de Zn (63 a 37 %), con importantes diferencias entre regiones. La Mesopotamia es la que ofrece la proporción más frecuente de deficiencias.

El relevamiento de muestras foliares indica en la tabla 2, una distribución de frecuencia que varía según el cultivo, pero sugiere que una superficie importante, sobre todo la cultivada con maíz y soja, podría haber rendido más si se hubiera satisfecho la deficiencia.

Región	Debajo del NC	Arriba de NC % of muestras	N	Laboratorio
N Buenos Aires	59	41	1353	ACA
S Santa Fe	71	29	741	ACA
SE Córdoba	75	25	129	ACA
Mesopotamia	85	15	179	TecnoAgro
Bs.As., S. Fe y Córdoba	44	56	378	TecnoAgro
Media ponderada	63	37	2780	

Tabla 1. Proporción de muestras en relación al nivel crítico de Zn disponible (1.0 mg Zn kg⁻¹ DTPA).

Cultivo (n)	Nivel Crítico mg Zn kg ⁻¹	Mediana	% < NC
Soja (125)	21	23	45
Trigo (48)	15	28	37
Maíz (233)	25	37	55
Girasol (133)	13	27	15

Tabla 2. Proporción de muestras en relación al nivel crítico de Zn foliar [Jones et al. 1990 y Blamey et al 1976 (Girasol)].

Las respuestas observadas a la aplicación de zinc se resumen en la tabla 3, y comprenden dos conjuntos de ensayos en maíz conducidos en varios sitios-años. En el primero (1997-2001) el zinc se aplicó como oxisulfato granular a la siembra (2 a 6 kg Zn ha⁻¹) en 14 localidades-año, y en el segundo conjunto de ensayos conducidos entre (2004 y 2010), se evaluó la respuesta al Zn aplicado por tres métodos diferentes: recubriendo la semilla (12), aspersiones foliares (16), y aplicados al suelos entre la siembra y V-6 (4).

Si se consideran que en cerca del 60 % del área sembrada con maíz podría obtenerse entre el 5 y el 15 % de aumento de rendimiento, el valor económico resultante podría pagar con creces un programa de estímulo al uso de este micronutriente.

Experimentos		Ferraris et al (2004-2010)			Melgar et al (1997-2001)
Método de Aplicación		Semilla (n=12)	Foliar (n=16)	Suelo (n=4)	Suelo (n=14)
(kg maíz ha-1)					
Control	- Zn	9,416	10,319	10,972	9,505
	+ Zn	9,814	11,931	11,974	10,267
Aumento de rinde		4%	16%	9%	8%

Tabla 3. Resumen de los resultados de ensayos de campo en maíz

Finalmente una buena estimación de la distribución geográfica del problema se rescata del trabajo de Rivero y Cruzate (2008) adonde los indicadores de disponibilidad fueron confrontados y comparados con la demanda calculada de Zn de los cultivos a partir del Zn exportado de los suelos como función del rendimiento de los cultivos principales y la concentración típica de Zn en el grano. Usando estadísticas oficiales de producción para estimar la exportación de Zn y sobreponiéndola con la disponibilidad, con tecnologías de SIG se generó un mapa de probabilidad de respuesta al Zn (Figura 1).

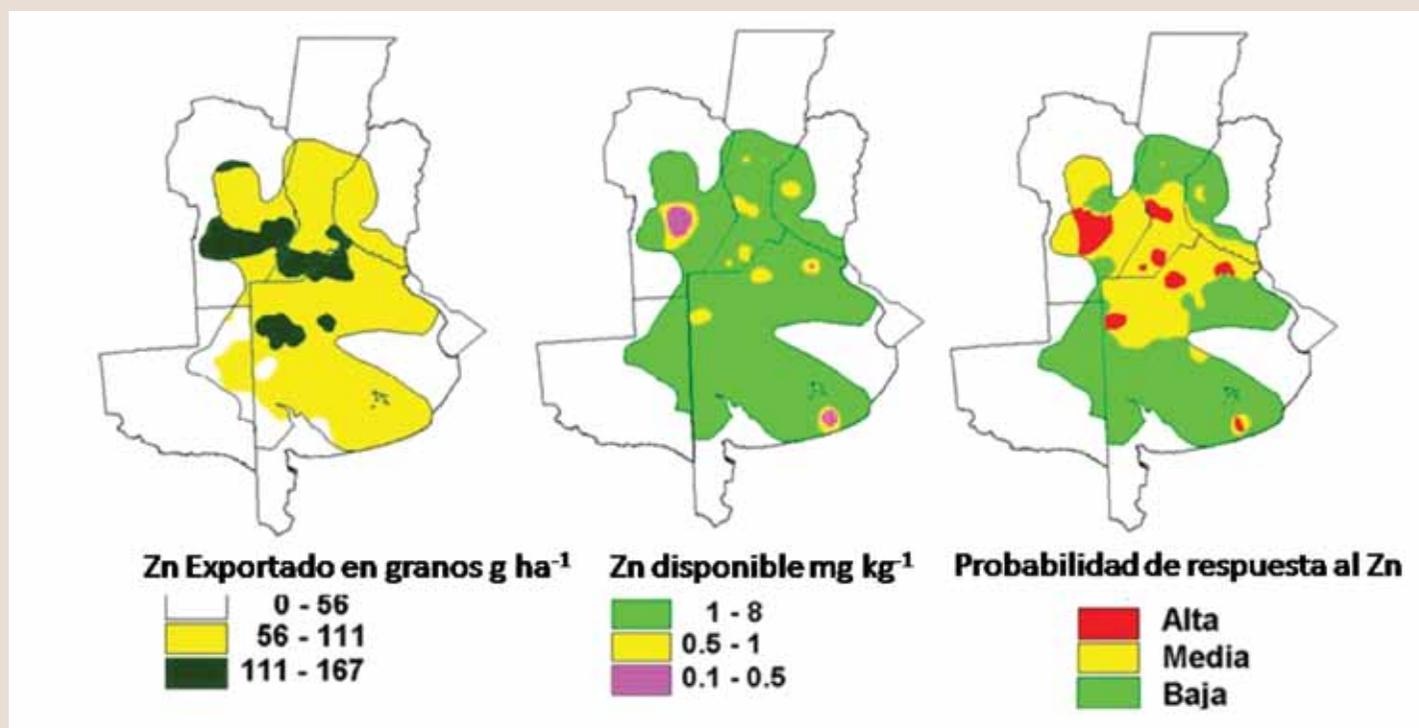


Figura 1. Mapa de probabilidad de respuesta a la aplicación de zinc (derecha) generados a partir de exportación de Zn por la producción de granos (izquierda) y la disponibilidad de Zn en el suelo en 71 muestras (centro) (Rivero et al, 2008).