

Análisis de indicadores de la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz (*Zea mays* L.) en México y América Central en el periodo 1990-2010

Armando Tasistro^{1*}

Introducción

La aplicación de nitrógeno (N) en la agricultura ha hecho posibles incrementos sustanciales en la productividad global de los cultivos y la población humana. Esto ha generado una preocupación por el uso responsable de este nutriente al grado que el manejo del N en una manera sostenible ha sido identificado como uno de los mayores retos ecológicos que enfrenta la humanidad (Cassman et al., 2002).

Como consecuencia, recientemente ha habido un aumento marcado en el interés en evaluar la eficiencia del N (Cassman et al., 2002; Dobermann, 2007), y existen varios índices que la miden, tanto en términos de producción del cultivo o N recuperado en el cultivo por unidad de N aplicado (Cassman et al., 2002; Dobermann, 2007; Novoa y Loomis, 1981; Fixen et al., 2015). Dos indicadores de eficiencia en el largo plazo comúnmente usados son la productividad parcial del factor (PPF) y el balance parcial de nutriente (BPN) (Fixen et al., 2015). La PPF atiende al análisis de la productividad de un sistema de producción de cultivos en relación a la aplicación de nutrientes; en el caso de N en maíz, la PPF_N se calcula a partir de la cantidad de grano cosechada (Y_N) y la correspondiente cantidad de N aplicada (F_N) como: $PPF_N = Y_N / F_N$. Los valores típicos de PPF_N en cereales varían entre 40 a 90 kg grano kg^{-1} N; $PPF_N > 70$ kg grano kg^{-1} N pueden atribuirse al uso de dosis de N muy bajas y/o sistemas productivos manejados muy eficientemente (Dobermann, 2005). La PPF_N se puede calcular muy fácilmente y puede ser usada razonablemente bien a escalas regional o global, aunque su precisión puede estar limitada principalmente por las incertidumbres en las cantidades de N usadas en la realidad (Dobermann, 2005).

Para un nutriente dado, el BPN mide la relación entre la cantidad removida en la parte cosechada y la aplicada al cultivo (Fixen et al., 2015). Para N en maíz, el BPN_N se expresa normalmente en base a la cantidad de N removida en el grano (A_N) y la cantidad correspondiente de N aplicada (F_N): $BPN_N = A_N / F_N$. La interpretación de los valores de BPN_N está determinada por los criterios que guíen al manejo de la fertilidad. Valores de $BPN_N < 1$ kg N kg^{-1} N indican que más N está siendo aplicado que lo que está siendo removido del sistema, lo que podría ser parte de una estrategia para elevar la fertilidad del suelo, una indicación de pérdidas de N, o que la respuesta del cultivo

al N está siendo limitada por algún otro factor. Por el otro lado, si $BPN_N > 1$ kg N kg^{-1} N se está removiendo más N que el que está siendo aplicado, lo que podría indicar que se quiere aprovechar una disponibilidad natural alta de N o un enfoque irracional en el manejo de la fertilidad (Dobermann, 2005).

En el caso de N en países en desarrollo, la visión dominante ha sido que a medida que los productores se embarcan en un programa de intensificación de su producción, se puede esperar que los valores de PPF_N disminuyan porque los rendimientos no aumentan tan rápidamente como las dosis de aplicación de N. Se han observado aumentos en PPF_N concomitantes con los de rendimientos en sistemas agrícolas avanzados donde las inversiones en investigación y transferencia de tecnología han posibilitado la adopción de sistemas avanzados de manejo y la reducción en las dosis de aplicación de N (Dobermann, 2005).

A pesar del creciente interés en años recientes en México y América Central en la eficiencia de uso de nutrientes por cultivos, hay todavía una gran escasez de datos sobre el tema. Hasta donde es conocido para el autor, este trabajo es el primero en documentar la eficiencia de uso de N — estimada por medio de la PPF_N y el BPN_N — en maíz en dicha región.

Materiales y métodos

El análisis fue hecho para el periodo 1990-2010 usando los resultados sobre el uso de N en maíz publicados por Rosas (2012) y datos sobre áreas cosechadas con maíz y rendimientos reportados por FAOSTAT (2015) para México y cinco países de América Central: Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica. Los rendimientos para el periodo 2007-2010 en Guatemala no fueron considerados debido a su patrón inexplicable en valores y variación. Para cada año se calculó la PPF_N mediante la división de los rendimientos de grano correspondientes entre las dosis de N, mientras que el BPN_N fue calculado dividiendo las cantidades correspondientes de N removidas en el grano de maíz entre las dosis de N. Las cantidades de N removidas en el grano fueron calculadas multiplicando los rendimientos de grano anuales por la concentración de N en el grano (12 g kg^{-1}) reportada por el IPNI (2015). Los precios de urea en el Mar Negro fueron obtenidos de Index Mundi (2015).

¹ Director, México y América Central, International Plant Nutrition Institute (IPNI). 3500 Parkway Lane, Suite 550, Peachtree Corners, Georgia 30092-2844, EE.UU.; Tel. +1 (770) 825-8079

* Autor responsable. Correo electrónico: atasistro@ipni.net

Resultados

Los cambios en PPF_N y BPN_N (**Figuras 1 y 2**) fueron idénticos ya que $BPN_N = PPF_N \cdot \text{concentración de N en el grano}$, como se muestra en las siguientes expresiones:

$$PPF_N = Y_N / F_N$$

$$BPN_N = A_N / F_N$$

$$A_N = Y_N \cdot \text{concentración de N en el grano}$$

$$BPN_N = PPF_N \cdot \text{concentración de N en el grano}$$

El progreso de ambos índices fluctuó marcadamente entre países (**Figuras 1 y 2**): aumentaron sostenidamente en El Salvador, México, y Costa Rica, se mantuvieron estancados en Guatemala, y exhibieron amplias variaciones tanto en Honduras como en Nicaragua. Los crecimientos en El Salvador, México, y Costa Rica están asociados con una combinación de uso de N estable o decreciente (**Figura 3**) y mayores rendimientos (**Figura 4**).

En los 20 años estudiados, las mejoras en productividad del maíz y eficiencias de uso de N en El Salvador fueron altamente significativas ($p < 0.01$), aunque se pueden distinguir dos fases. En la primera, entre 1990 y 2001, las dosis de N y los rendimientos oscilaron alrededor

de 70 kg ha^{-1} (**Figura 3**) y 2000 kg ha^{-1} (**Figura 4**), respectivamente, y por consiguiente la PPF_N (**Figura 1a**) promedió $30 \text{ kg grano kg}^{-1} \text{ N}$, y el BPN_N (**Figura 2**) varió alrededor de $0.4 \text{ kg N kg}^{-1} \text{ N}$. Después del 2001, las dosis de N descendieron y fueron más variables que en la fase previa, en tanto que los rendimientos aumentaron 50%, llegando a valores cercanos a 3000 kg ha^{-1} en 2010. Como resultado, la PPF_N promedio aumentó a $50 \text{ kg grano kg}^{-1} \text{ N}$ y el BPN_N a $0.5 \text{ kg N kg}^{-1} \text{ N}$.

Entre 1990 y 2010, los rendimientos de maíz en México alcanzaron una tasa de aumento altamente significativa ($p < 0.01$) de $63 \text{ kg grano ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (**Figura 4**). En el mismo periodo, el uso promedio de N mostró una disminución altamente significativa ($p < 0.01$) desde 112 a 92 kg N ha^{-1} en 2010 (**Figura 3**). Mayores rendimientos de maíz con menos uso de N resultó en un aumento altamente significativo ($p < 0.01$) en la PPF_N desde aproximadamente $20 \text{ kg grano kg}^{-1} \text{ N}$ hasta $36 \text{ kg grano kg}^{-1} \text{ N}$ en 2010 (**Figura 1**), y en el BPN_N desde 0.2 a $0.5 \text{ kg N kg}^{-1} \text{ N}$ (**Figura 2**).

Aunque en términos generales los rendimientos de maíz en Costa Rica tuvieron un aumento altamente significativo ($p < 0.01$), en el 2010 eran aún pequeños en comparación con los de El Salvador y México (**Figura 4**), en tanto que el uso de N permaneció

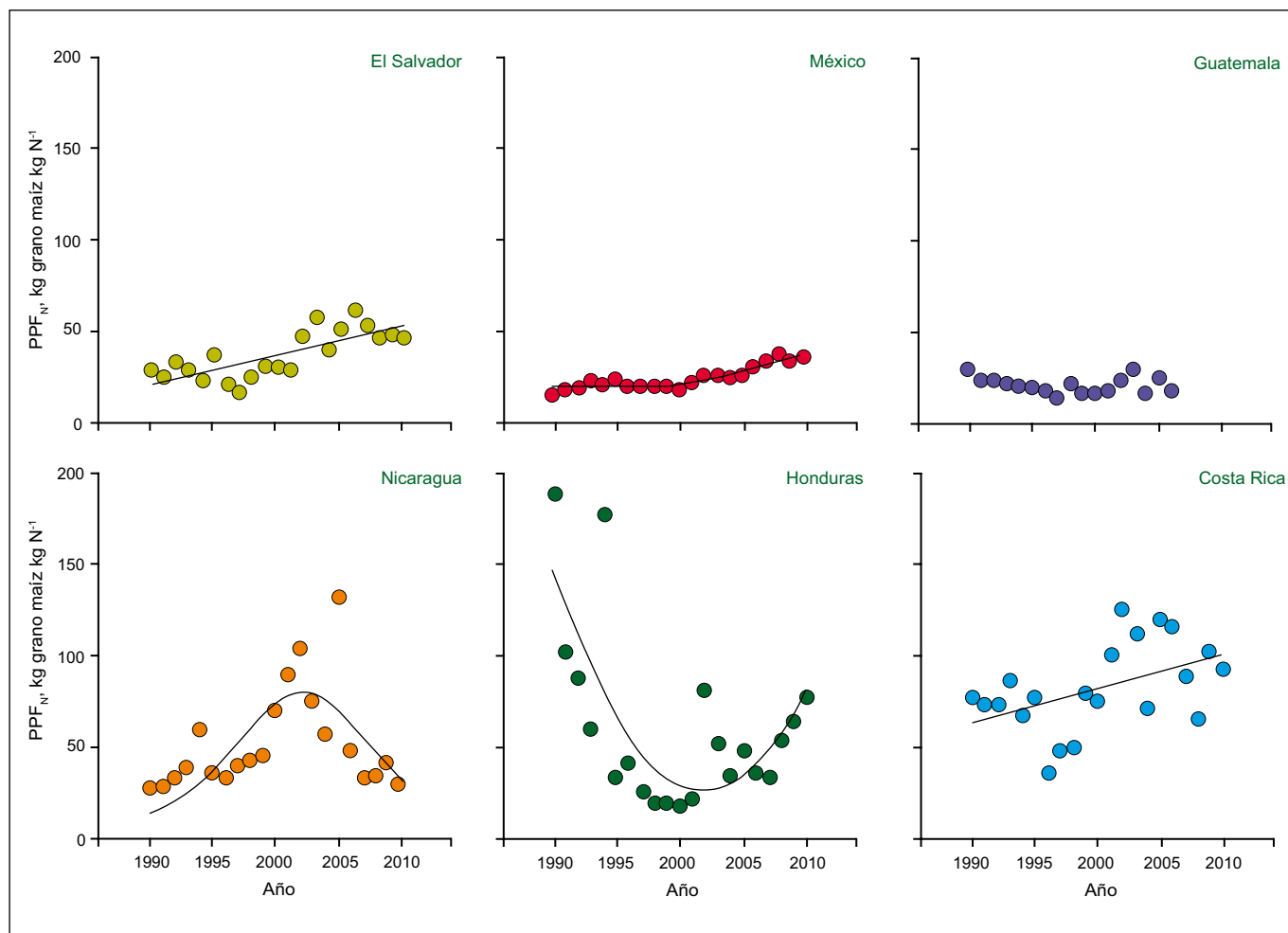


Figura 1. Cambios en la productividad parcial del factor N (PPF_N) en maíz entre 1990 y 2010 en El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, y Costa Rica.

virtualmente estable a un nivel promedio muy bajo de 25 kg ha⁻¹ durante los 20 años analizados (**Figura 3**). Por consiguiente, la PPF_N y el BPN_N crecieron significativamente ($p < 0.05$) entre 1990 y 2010, aunque con oscilaciones muy pronunciadas que variaron entre 40 a 120 kg grano kg⁻¹ N en el caso de la PPF_N (**Figura 1**), y 0.5 a 1.5 kg N kg⁻¹ N para BPN_N (**Figura 2**).

En Honduras, los rendimientos de maíz entre 1990 y 2001 fluctuaron alrededor de 1500 kg ha⁻¹ (**Figura 2b**), mientras que el uso de N aumentó 6.6 kg N ha⁻¹ año⁻¹ ($p < 0.01$), yendo desde casi 0 a 70 kg N ha⁻¹ (**Figura 3**). Esta evolución se reflejó en el descenso de la PPF_N desde casi 200 a 25 kg grano kg⁻¹ N (**Figura 1**), y en el BPN_N desde alrededor de 2.5 a 0.25 kg N kg⁻¹ N (**Figura 2**). No obstante, desde 2002 a 2010, el uso de N en maíz en Honduras disminuyó irregularmente mientras que los rendimientos tuvieron un aumento significativo ($p < 0.05$), y consecuentemente tanto la PPF_N como el BPN_N aumentaron, llegando a valores próximos a 70 kg grano kg⁻¹ N y 1.0 kg N kg⁻¹ N, respectivamente.

En general, los rendimientos de maíz en Nicaragua tuvieron un aumento altamente significativo ($p < 0.01$), aunque los valores alcanzados fueron bajos en comparación con otros países (**Figura 4**). El uso de N mostró un cambio altamente significativo disminuyendo

inicialmente desde alrededor de 70 kg ha⁻¹ en 1990 a 15 kg ha⁻¹ en 2001, y aumentando desde 2002 hasta casi 65 kg ha⁻¹ en 2010 (**Figura 3**). A medida que el uso de N disminuyó, la PPF_N se elevó desde 20 a 60 kg grano kg⁻¹ N, con valores excepcionalmente altos observados entre 2000 y 2005, seguidos por una reducción desde 2002 a 2010 (**Figura 1**), en una respuesta parabólica altamente significativa ($p < 0.01$). Los BPN_N fluctuaron entre 0.3 y 0.5 kg N kg⁻¹ N, excepto durante el periodo con una fuerte contracción en las aplicaciones de N (**Figura 2**).

Los datos de Guatemala indican estancamiento con bajos valores de PPF_N y BPN_N que fluctuaron alrededor de 20 kg grano kg⁻¹ N y 0.4 kg N kg⁻¹ N, respectivamente (**Figuras 1 y 2**). Un elemento importante en determinar esos resultados ha sido la disminución altamente significativa ($p < 0.01$) en rendimientos de maíz desde alrededor de 2000 kg ha⁻¹ en 1990 a 1500 kg ha⁻¹ en 2006 (**Figura 4**). El uso de N en maíz mostró una respuesta parabólica altamente significativa ($p < 0.01$), creciendo casi 50% entre 1990 y 2000 y decreciendo de manera muy variable con posterioridad (**Figura 3**).

El área cosechada con maíz (**Figura 5**) mostró cambios altamente significativos ($p < 0.01$): declinó y luego aumentó en Guatemala, aumentó sostenidamente en Nicaragua, disminuyó en El Salvador, México, y

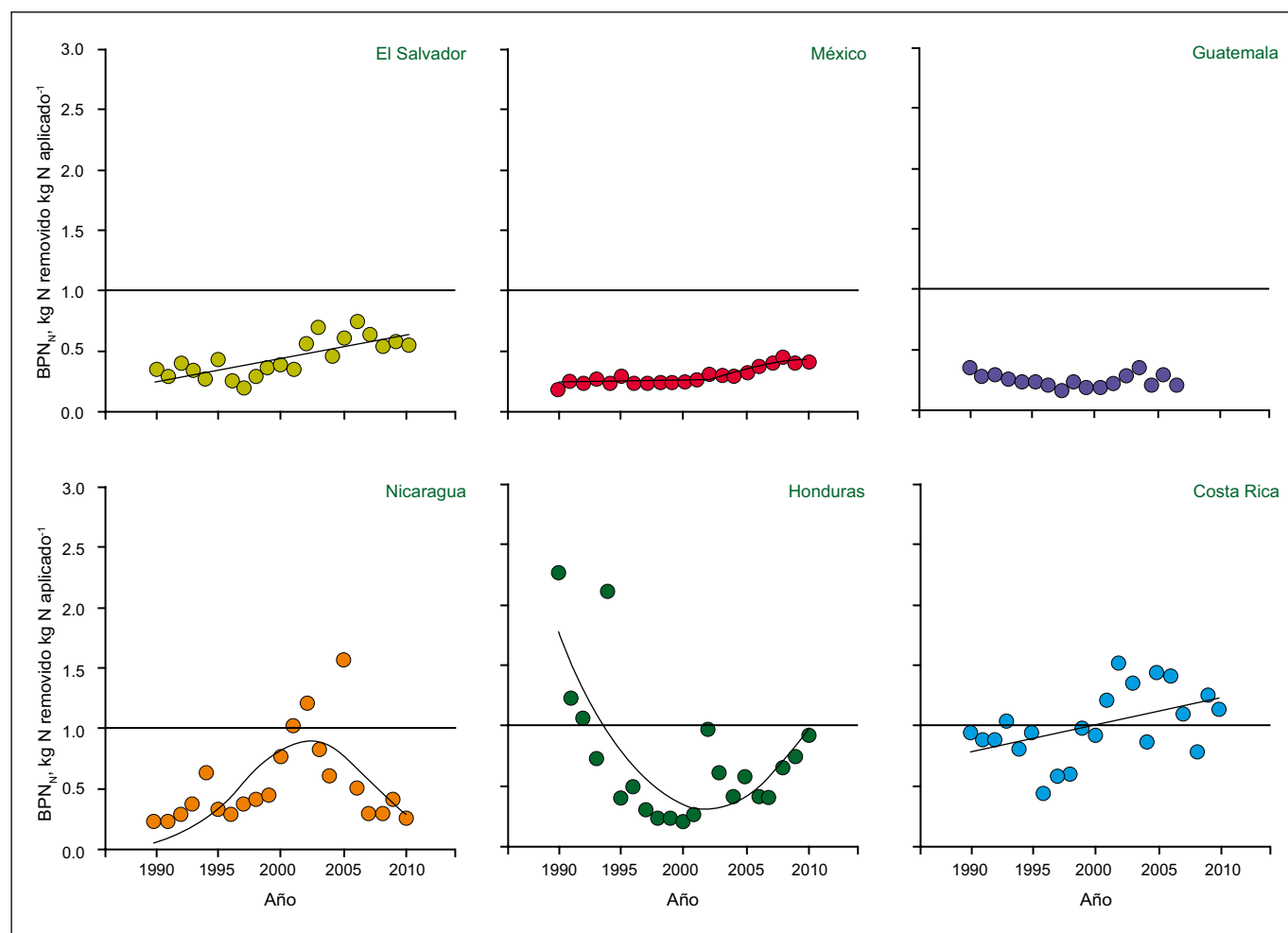


Figura 2. Cambios en el balance parcial de N (BPN_N) en maíz entre 1990 y 2010 en El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, y Costa Rica.

Honduras, y tuvo una disminución inicial seguida por una elevación después de 2005 en Costa Rica.

Discusión

El aumento en la productividad del maíz observado en la mayoría de los países estudiados ha sido en gran medida resultado de los esfuerzos en investigación y promoción de mejores tecnologías productivas, a través de los años, por organizaciones gubernamentales, privadas, e internacionales. Componentes relevantes de estas tecnologías mejoradas incluyen germoplasma de mayor potencial de rendimiento, mejor manejo de la nutrición de los cultivos, protección contra malezas, plagas, y enfermedades, sistemas de labranza conservacionistas del suelo, mejor manejo del agua, poblaciones y distribuciones de plantas acordes con las condiciones de crecimiento, técnicas de cosecha y almacenaje más eficientes, y avances en la mecanización de operaciones.

La mejoría en PPF_N en El Salvador, México, Costa Rica, y Honduras (en este último, después de un descenso inicial) contrasta con lo expresado por Dobermann (2005) quien restringe la posibilidad de aumentos continuos en la PPF_N solo a países desarrollados debido a que cuentan con los fondos, tanto en el sector público como el privado, para inversiones en investigación

y extensión en mejoramiento de cultivos, nuevos productos fertilizantes, y mejores prácticas de manejo, a niveles que exceden en gran medida los disponibles actualmente en el mundo en desarrollo. Además, según Dobermann (2005), sólo en países desarrollados se han reportado aumentos en la PPF_N simultáneamente con mayores rendimientos de cereales, que serían explicados por una combinación de suelos fértiles, condiciones climáticas favorables, y mejores prácticas de manejo de suelos y cultivos, incluyendo el manejo del N.

Los resultados del presente estudio sugieren que la elevación en la productividad del maíz, bajo un uso de N estable o decreciente, asociado con la mejoría en los índices de eficiencia de uso de N, no ha sido consecuencia solamente de circunstancias tecnológicas y ambientales, sino también de la influencia de cambios macroeconómicos y políticos.

Un factor económico de alta importancia que parece haber afectado el uso de N en maíz en la región fue el aumento en los precios internacionales de los fertilizantes nitrogenados en los primeros años del siglo 21, y que llegaron a un máximo en el 2008, cuando el precio de la urea — una fuente clave de N y uno de los fertilizantes más comúnmente usados —

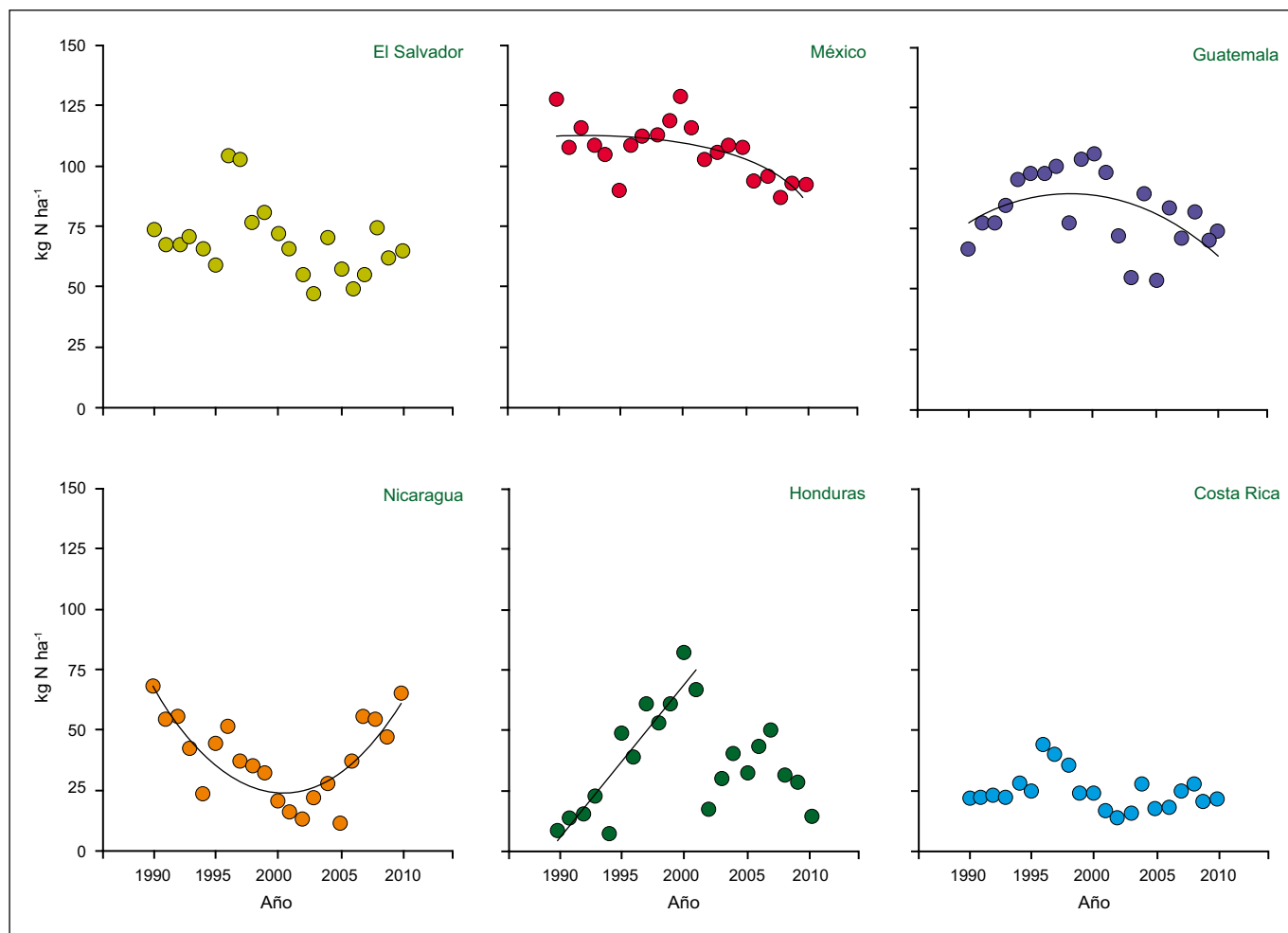


Figura 3. Cambios en la dosis media de N aplicada a maíz (kg N ha^{-1}) entre 1990 y 2010 en El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, y Costa Rica.

se multiplicó por más de cuatro veces en relación a su precio promedio en 1990 (**Figura 6**). En la medida que los precios aumentaron después del 2000, el uso de N aumentó sólo en Nicaragua, en tanto que en los demás países disminuyó o permaneció inalterado (**Figura 3**). La disminución en el uso de N fue altamente significativo en México y Guatemala, en tanto que en Honduras ocurrió un descenso marcado pero de una manera altamente variable.

Datos de agricultores en los EE.UU. muestran que la elasticidad precio de la cantidad demandada de fertilizantes nitrogenados aplicados al maíz oscila entre -1.67 y -1.87 (Williamson, 2011) de manera que la reducción en el uso de N por agricultores en los países estudiados podría verse como algo lógico si se comportasen como sus colegas estadounidenses.

Es importante hacer notar que a diferencia de la duplicación en la PPF_N , sin ganancias en productividad, observada entre 1988 y 2000 en Europa Oriental y la ex-Unión Soviética, que fue asociada a una marcada reducción en uso de fertilizante nitrogenado en cereales debida a cambios políticos y económicos (Dobermann, 2005), la caída en el uso de N en El Salvador, México, y Honduras no tuvo efectos adversos en la productividad del maíz y contribuyó a la mejoría de PPF_N y BPN_N , lo

que sugiere que la intensificación sostenible en la producción de maíz puede ser compatible con menores dosis de N. Sin embargo, en Costa Rica desde el 2000 el BPN_N ha estado por sobre 1.0 la mayor parte del tiempo, lo que indica un agotamiento potencial del N del suelo.

El caso de Nicaragua ilustra la importancia de las políticas gubernamentales para modular los cambios en el mercado. El gobierno nicaragüense implementó programas de soberanía alimentaria que incluían la importación de fertilizantes desde Venezuela y su distribución a bajos precios a agricultores pobres, lo que puede explicar que las aplicaciones de N no hubieran disminuido a pesar de los mayores precios internacionales. Por otro lado, aunque Guatemala ha tenido desde el 2000 un Programa de Entrega de Fertilizantes (PEF) patrocinado por el Gobierno, con intenciones aparentemente comparables al de Nicaragua, los resultados de este trabajo sugieren que no ha sido tan efectivo como el de dicho país.

Otro factor clave en los países estudiados fueron los acuerdos regionales de libre comercio: el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994 entre EE.UU., Canadá, y México, y el Tratado de Libre Comercio de América Central (TLCAC) en 2004 que incluye a los EE.UU., Costa Rica, El Salvador,

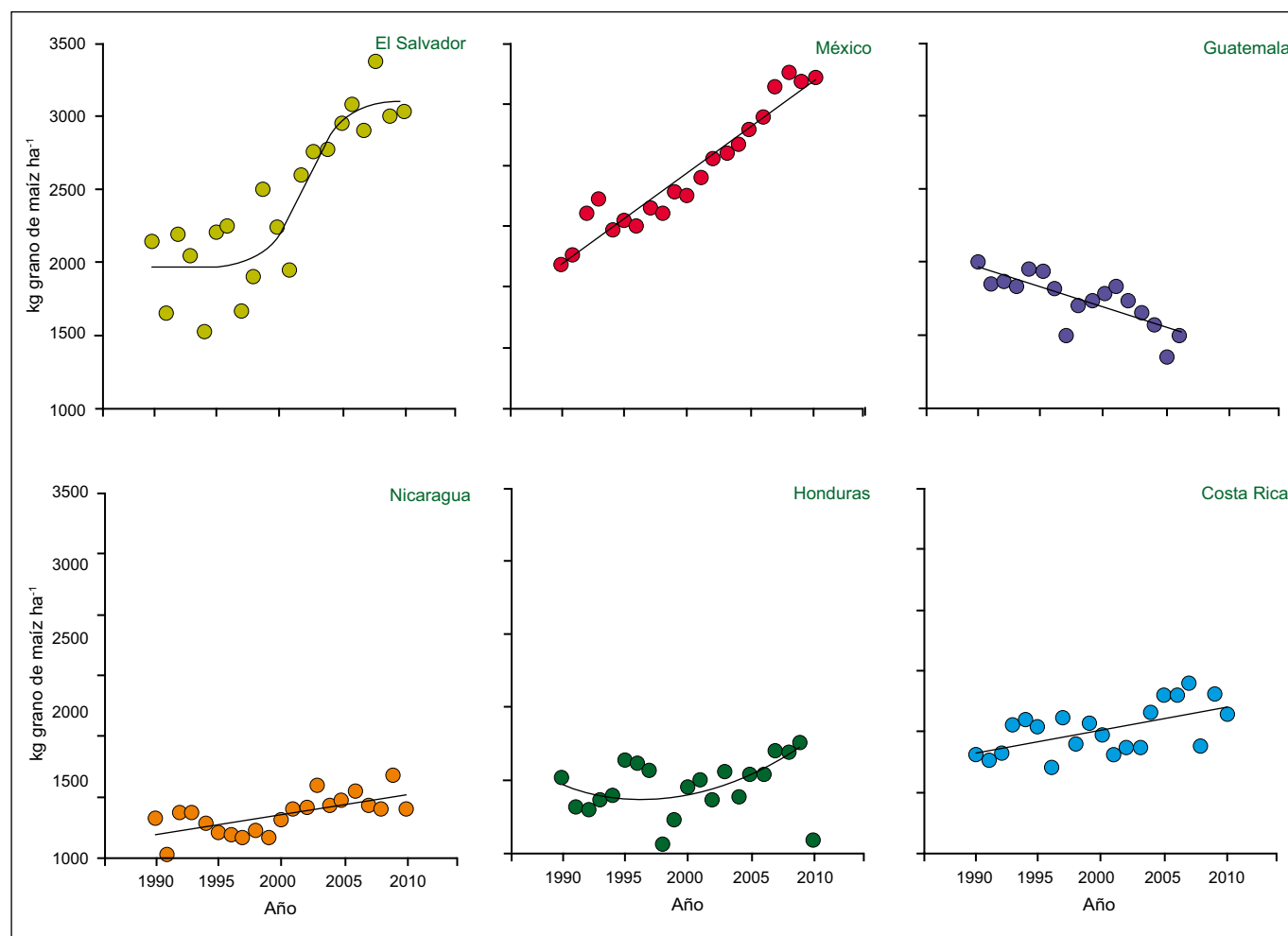


Figura 4. Cambios en el rendimiento medio de maíz (kg grano ha⁻¹) entre 1990 y 2010 en El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, y Costa Rica.

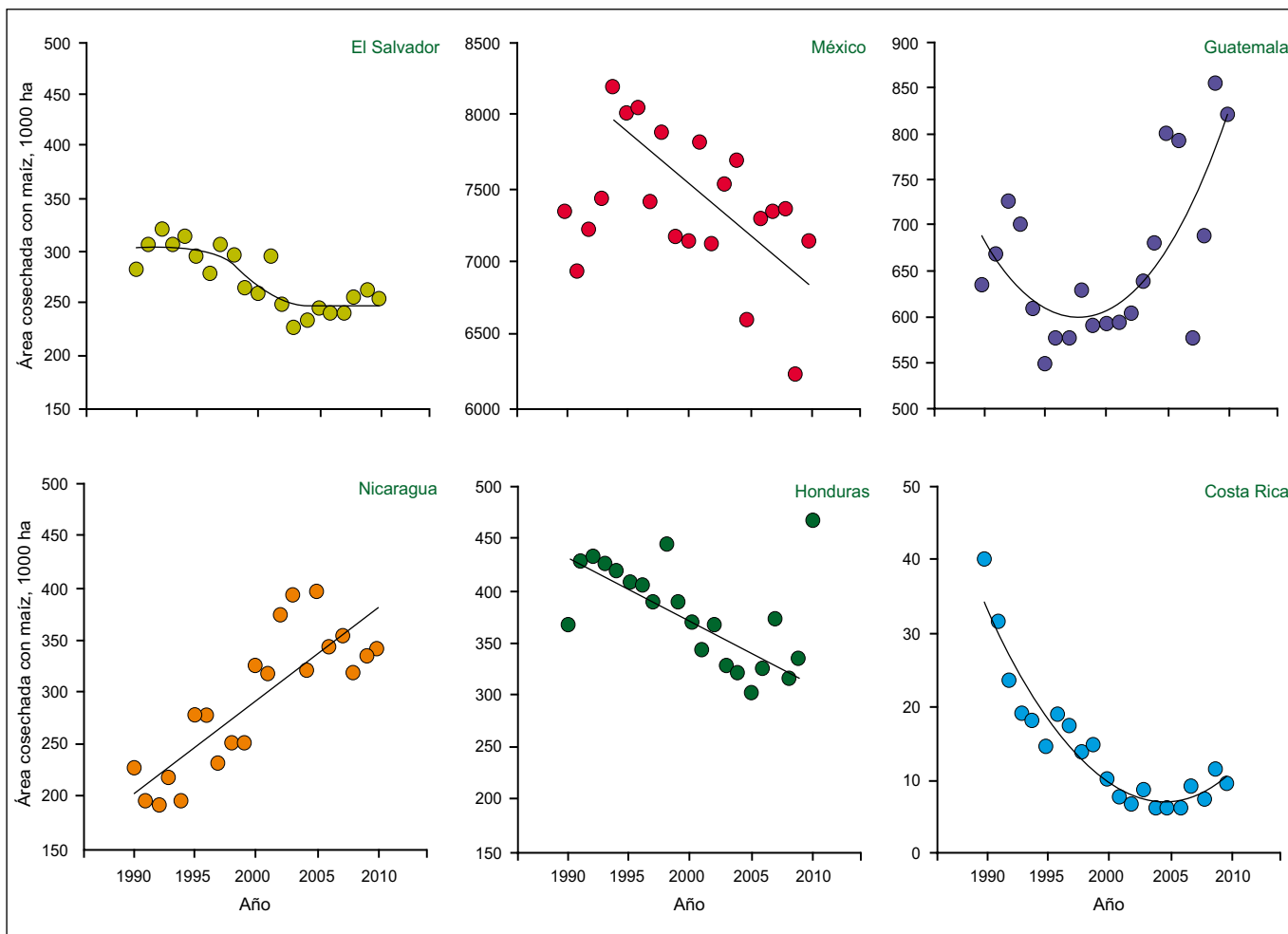


Figura 5. Cambios en el área cosechada con maíz (1000 ha) entre 1990 y 2010 en El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, y Costa Rica.

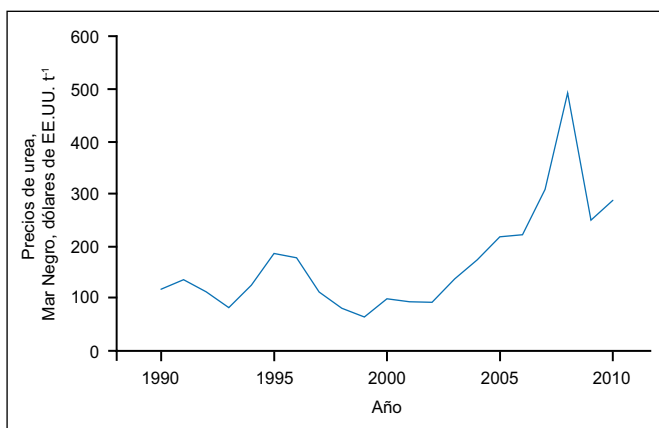


Figura 6. Variación del precio de la urea (Mar Negro) (USD t⁻¹) en el periodo 1990-2010. (Index Mundi, 2015).

Guatemala, Honduras, y Nicaragua. En el caso de México, la implementación del TLCAN trajo consigo una disminución sostenida en el área cosechada con maíz (**Figura 5**) que resultó en que una mayor proporción del cultivo pasó a cultivarse en mejores suelos, bajo riego y sistemas de manejo más modernos en las áreas maiceras de Chihuahua, la costa de Sinaloa, Chiapas, y la mayoría de Michoacán y Guanajuato. Estos cambios han contribuido a los aumentos en los rendimientos de maíz observados (Zahniser y Crago, 2009; Bellon y Hellin, 2011; Ray et al., 2013). Es posible que cambios

similares hayan ocurrido en El Salvador y Honduras, mientras que en Guatemala los cambios en uso de la tierra parecen haber favorecido el uso de mejores tierras para cultivos como la caña de azúcar, en vez del maíz. Por consiguiente, en tanto que el área maicera en Guatemala se ha expandido a tierras marginales su productividad no ha mejorado.

Conclusiones

Este primer reporte sobre la eficiencia de uso de N en maíz a nivel nacional en México, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, y Costa Rica muestra resultados que difieren de los esperados a partir de la literatura publicada. Entre 1990 y 2010, los valores de PPF_N y BPN_N mejoraron en México, El Salvador, Honduras, y Costa Rica debido a aumentos en los rendimientos de maíz y reducciones en el uso de N, algo que se consideraba posible sólo en agriculturas desarrolladas.

Las mejorías en la productividad del maíz fueron resultados de inversiones de muchos años en investigación y extensión de mejores tecnologías, y en el caso de México también de desplazamientos del cultivo del maíz hacia mejores tierras y sistemas de manejo, como consecuencia del TLCAN.

Las reducciones en el uso de N por los agricultores parecen haber sido desencadenadas por los aumentos en los precios internacionales de fertilizantes nitrogenados, aunque esta influencia fue modulada por políticas de subsidios en algunos países, especialmente en Nicaragua.

Este estudio realza la importancia del análisis de influencias de aspectos políticos y macroeconómicos sobre la eficiencia de uso de nutrientes, las que frecuentemente se dejan de lado cuando se privilegian los aspectos tecnológicos.

Bibliografía

Asociación de Investigación y Estudios Sociales (ASIES). 2012. Methodologies applied in the Program of Fertilizer Delivery in Guatemala 2000-2012; ASIES: Guatemala City, Guatemala; 12 p.

Bellon, M.R., y J. Hellin. 2011. Planting Hybrids, Keeping Landraces: Agricultural Modernization and Tradition Among Small-Scale Maize Farmers in Chiapas, Mexico. *World Development*, 39:1434-1443.

Cassman, K.G., A. Dobermann, y D.T. Walters. 2002. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *AMBIO*, 31:132-140.

Dobermann, A.R. 2005. Nitrogen Use Efficiency – State of the Art; University of Nebraska – Lincoln, Agronomy & Horticulture: Lincoln, Nebraska, USA; Faculty Publications, Paper 316, 16 p. <http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/316>

Dobermann, A.R. 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. In International Fertilizer Industry Association (IFA) International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, Brussels, Belgium, 7-9 March, 2007; International Fertilizer Industry Association (IFA): Paris, France.

FAOSTAT. 2015. Available online: <http://faostat3.fao.org/home/index.html> (accessed on 1 May 2015).

Fixen, P.E., F. Brentrup, T.W. Bruulsema, F. Garcia, R. Norton, y S. Zingore. 2015. Nutrient/fertilizer use efficiency: Measurement, current situation and trends. In *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification*; Dreshsel, P., Heffer, P., Magen, H., Mikkelsen, R., Wichelns, D. Eds.; International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), International Potash Institute (IPI).: Paris, France.

Index Mundi. 2015. Urea Monthly Price - US Dollars per Metric Ton. Available online: <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=urea&months=300> (accessed on 1 March 2015).

IPNI. 2015. Estimates of Nutrient Uptake and Removal. Available online: <http://www.ipni.net/article/IPNI-3296> (accessed on 26 March 2015).

Novoa, R. y R. Loomis. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant Soil*, 58, 177-204.

Ray, D.K., N.D. Mueller, P.C. West, and J.A. Foley. 2013. Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *PLoS ONE*, e66428.

Rosas, F. 2012. Fertilizer Use by Crop at the Country Level (1990–2010); Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University: Ames, Iowa, USA; Working Paper 12-WP 535. 16 p.

Williamson, J.M. 2011. The Role of Information and Prices in the Nitrogen Fertilizer Management Decision: New Evidence from the Agricultural Resource Management Survey. *JARE*, 36:552-572.

Zahniser, S. y Z. Crago. 2009. NAFTA at 15: Building on Free Trade; USDA ERS: Washington, DC, USA; 57 p.



Maíz creciendo en Chiapas, México