

**EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y COBERTORA SOBRE
EL RENDIMIENTO DE UNA LINEA ENDOGÁMICA DE MAÍZ**

POR

Jesús A. Espinosa Irizarry

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

en

AGRONOMÍA

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

2016

Aprobado por

David Sotomayor Ramírez, Ph.D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

James Beaver, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Elvin Román Paoli, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Elvin Román Paoli, Ph.D.
Director de Departamento

Fecha

Samuel Santana, Ph.D.
Representante de Estudios Graduados

Fecha

RESUMEN

Mejor conocimiento sobre el manejo de nitrógeno (N) en el cultivo de maíz (*Zea Mays L.*) en la costa semiárida del sur de Puerto Rico podría contribuir a la implementación de prácticas que mejoren la sostenibilidad de este sistema agrícola. Se evaluó el efecto de 60, 110 y 160 kg/ha de fertilización nitrogenada (N) sobre el rendimiento de semilla de maíz y en la acumulación de N inorgánico en el suelo en una rotación de maíz-maíz y de caupí (*Vigna unguiculata L. Walp*)-maíz (CM). El experimento se llevó a cabo en dos ciclos de verano 2011 a primavera 2012. El rendimiento de semilla no se afectó por la fertilización nitrogenada con rendimientos promedio de 1,630 y 4,243 kg/ha en 2011 y 2012, respectivamente. La rotación con CM aumentó el rendimiento de grano un 34% en el 2011, pero no en el 2012. El N inorgánico en el perfil de suelo aumentó con la fertilización nitrogenada hasta un 167% en la postcosecha del 2011, disminuyendo para la resiembra del 2012 (al punto de que ya no se reflejó el efecto de la fertilización del año anterior) y aumentando un 119% en la postcosecha del 2012. El N inorgánico en el suelo aumentó con la rotación CM y dicho efecto fue incrementado en el transcurso del experimento lo cual sugiere una mayor acumulación de N a largo plazo con la rotación CM. Los resultados sugieren que para líneas endogámicas y condiciones similares a las de este estudio, aplicaciones de N superiores a los 60 kg N/ha no aumentarán el rendimiento de semilla e incrementarán el potencial de pérdidas de N. El uso de caupí como cobertura vegetal es beneficioso aumentando los rendimientos de semilla, el contenido de N inorgánico en el perfil de suelo y la acumulación de N en el suelo.

ABSTRACT

Improved knowledge of nitrogen (N) management in maize (*Zea Mays L.*) seed cropping systems can contribute to more sustainable agronomic practices. Inbred-maize crop response and soil inorganic N accumulation as affected by fertilizer levels of 60, 110 y 160 kg N/ha on a fallow-maize rotation and on a cowpea (*Vigna unguiculata*)-maize (CM) rotation were evaluated. The experiment was conducted in two cycles from summer 2011 to spring 2012. In both years there was no significant fertilizer N effect on seed yield with mean yields of 1,630 and 4,243 kg/ha in 2011 and 2012, respectively. An increase of 34% in seed yield was observed for the corn-cowpea rotation (CM). Fertilization with N increased soil inorganic N 167% in the 2011 post-harvest. In 2012 pre-plant inorganic soil N decreased to levels in which the previous year's fertilization had no effect, and increased by 119% increase in the 2012 post-harvest. N fertilization had a short term effect on soil inorganic N but there was no impact on the long term. Soil inorganic N was higher in the CM rotation and this increased throughout the course of the experiment suggesting higher N accumulation with this rotation. These results suggest that N fertilization over 60 kg/ha will not improve seed yield and will increase N potential losses with a negative environmental impact. Cowpea cover crop rotation had benefits of increasing maize seed yields, inorganic soil N content and soil N accumulation.

DEDICATORIA

A mi familia y en especial a: mis padres Altagracia Irizarry y José A. Espinosa, mis hermanos Cheo, Gary, Gero, Luis, Kike, Aníbal, Awi, Noemí, Libo y Mela quienes de una manera u otra han influido en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios sin quien nada tengo y nada soy. ¡Él es quien hace crecer!

Al equipo de trabajo de “Dow Agrosiences” por el apoyo financiero y asistencia en el manejo agronómico del experimento. En especial a Ricardo Barnés, Marcos Acosta, Heriberto Santiago, Ismael Rivera, Edwin Torres, Christian Salcedo y Kelvin Borges.

A mi mentor el Dr. David Sotomayor por su ejemplo, dirección, atención y firmeza. Su contribución a mi desarrollo profesional es de gran valor para mí.

A los miembros del comité el Dr. Elvin Román Paoli y el Dr. James Beaver por sus valiosas sugerencias en cuanto al contenido y formato del manuscrito.

Al Dr. Raúl Machiavelli por su asesoramiento en el análisis estadístico.

A la Dra. Linda Beaver por su apoyo, orientación y consejos previo a comenzar la escuela graduada. Sus enseñanzas han sido uno de mis mayores estímulos para valorar las ciencias agrícolas y superarme.

Al Dr. Gustavo Martínez mi actual jefe por el tiempo cedido para estudio, su apoyo y consejos.

Al personal de la facultad de Ciencias Agrícolas y en especial a mi amigo Héctor Torres por toda la ayuda brindada en el trabajo de campo.

A todos los compañeros estudiantes que en diferentes momentos pusieron su granito de arena para que este trabajo pudiera lograrse: Pedro Rivera, Fernando Gonzáles, Jessica Torres, Gerson Ardila, Ángel Domenech, Alexis Tirado, Gabriel Pérez, Johani Rivera, Warys Zayas, Paloma Rodríguez y Cristina López.

A todos mis amigos por su apoyo y compañía en todos los momentos difíciles y alegres de este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
LISTA DE CUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Determinación del Nivel de Aplicación de N.....	4
Indicadores de Disponibilidad de N en el Suelo.....	6
Efecto de la Rotación con Leguminosas sobre el Nivel Óptimo de Aplicación de N	8
Efecto de la Rotación de Maíz con Leguminosas sobre el Rendimiento	9
MATERIALES Y MÉTODOS	11
Descripción de la Localidad y Diseño Experimental	11
Manejo Agronómico Durante el Periodo de Reposo.....	15
Manejo Agronómico del Maíz.....	15
Evaluación de la Extracción de N por el Caupí.....	16
Evaluación del Estado Nutricional del Maíz	17
Rendimiento y Extracción de N del Grano y Rastrojo	18
Muestreo de Suelo	20
Análisis Estadístico.....	21
RESULTADOS y DISCUSIÓN	22
Aportación de N del Caupí al maíz.....	22
Fertilidad del Suelo y Estado de Suficiencia Nutricional del Cultivo.....	23
Respuesta en Rendimiento.....	25
Extracción de N	32
Requerimiento Interno de N	33
Indicadores Agronómicos.....	37
Acumulación de N en el Perfil de Suelo (0-90 cm).....	40
Distribución de N Inorgánico en el Perfil de Suelo.....	44
Balance de N Disponible	47
CONCLUSIÓN.....	51
REFERENCIAS.....	53

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Rendimiento de la biomasa aérea y extracción de N del caupí hasta el momento de la poda de mantenimiento y hasta la exterminación.	22
Cuadro 2. Parámetros de fertilidad del suelo (0-15cm) en el predio experimental en Santa Isabel.	24
Cuadro 3. Concentración de nutrientes en la hoja indicadora para los años 2011 y 2012.....	24
Cuadro 4. Resumen de ANOVA para el efecto de nivel de N, rotación de cultivo y la interacción nivel de N x rotación de cultivo sobre parámetros agronómicos en el 2011.	28
Cuadro 5. Efecto de la rotación de cultivo sobre el rendimiento del grano y la biomasa aérea en el 2011.	29
Cuadro 6. Resumen de anova para el efecto de nivel de N, rotación de cultivo y la interacción nivel de N x rotación de cultivo sobre variables agronómicas en el 2012.....	30
Cuadro 7. Efecto de la rotación de cultivo sobre la extracción de N en el grano y la planta entera en el 2011.	32
Cuadro 8. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de N en el rastrojo para la siembra del 2012.	33
Cuadro 9. Requerimiento de N y sus componentes para líneas endogámicas en contraste con la recomendación original para maíz de Stanford (1973).....	36
Cuadro 10. Indicadores agronómicos afectados por la rotación de cultivo en el 2011 y el 2012.....	37
Cuadro 11. Indicadores agronómicos afectados por la interacción nivel de N x rotación de cultivo en el 2012.....	38
Cuadro 12. Concentración de NO ₃ ⁻ -N en la savia en el 2011 y el 2012.	39
Cuadro 13. Resumen de ANOVA para el efecto de Muestreo (A), nivel de N (B), rotación (C) y las interacciones A x B, B x C y A x B x C sobre el contenido de N inorgánico en el perfil de suelo.	41
Cuadro 14. Efecto de la interacción A x C sobre el contenido de N en el perfil de suelo (0-90 cm).	42
Cuadro 15. Efecto de la interacción A x B sobre el contenido de N en el perfil de suelo (0-90 cm).	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitación acumulada mensualmente durante las dos temporadas de estudio.	12
Figura 2. Suma térmica acumulada desde la siembra a la cosecha de cada año.	12
Figura 3. Mapa experimental para los ensayos realizados en el 2011 y 2012.	14
Figura 4. Distribución del N inorgánico en el perfil a través de los dos años de estudio. Los valores representan el promedio de los niveles de N y de la rotación.	46
Figura 5. Distribución del efecto de las rotaciones caupí-maíz (CM) y barbecho-maíz (BM) en el N inorgánico en el perfil de suelo.	46
Figura 6. Distribución del efecto de la fertilización nitrogenada sobre el N inorgánico en el perfil de suelo en el 2012.	47
Figura 7. Cambio en N disponible en el sistema suelo-planta ($\Delta N = N$ inorgánico postcosecha + extracción por la planta - N inorgánico presiembra- fertilización nitrogenada).	49
Figura 8. Extracción de N por el cultivo y cambio en N ($\Delta N = N$ inorgánico postcosecha - N inorgánico presiembra) en el perfil de suelo de 0-90 cm.	50

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays L.*) es el cultivo de mayor producción a nivel mundial (USDA, 2015). En Puerto Rico existen nueve compañías semilleras que se han establecido entre el año 1983 y el 2005. El cultivo de la semilla de maíz ocupa el 50 por ciento de la producción total de estas compañías. El área de producción de semilla de maíz de estas compañías es de aproximadamente 2,300 ha (Sotomayor Ramírez et al., 2013) y es principalmente para propósitos investigativos en el mejoramiento genético de híbridos de maíz.

Las siembras de maíz mundialmente utilizan principalmente semilla de maíz híbrido producto del cruce de líneas endogámicas. Las semillas de estas plantas híbridas no pueden ser propagadas ya que su progenie no mantendrá las mismas características que sus parentales heterocigotos. Por lo tanto, la producción de semilla de híbridos requiere la siembra de sus parentales que son líneas endogámicas (líneas puras).

Una línea endogámica es obtenida de varias generaciones de autofecundación hasta alcanzar un alto nivel de homocigosidad (Poehlman y Sleper, 1995). La progenie producida por la autofecundación en cultivos alógamos como el maíz típicamente tiene problemas de consanguinidad que resultan en plantas pequeñas, con tallos débiles, con pocas y pequeñas mazorcas y una mayor susceptibilidad a patógenos y a deficiencias nutricionales. Sin embargo, estas líneas endogámicas son el material genético necesario para los híbridos con mayor potencial de rendimiento entre combinaciones de características deseables.

El N es un nutriente esencial para las plantas debido a que forma parte de moléculas orgánicas como la clorofila, las proteínas y el ADN. Es importante determinar el nivel óptimo de aplicación de este nutriente ya que tanto una deficiencia como un exceso de N pueden tener un impacto negativo económicamente y ambientalmente. Una aplicación

excesiva significa un gasto innecesario en fertilizante y un mayor impacto en la contaminación de cuerpos de agua. En una aplicación deficiente, la planta utilizará N de las reservas del suelo el cual será exportado del sistema en la cosecha ocasionando a largo plazo un empobrecimiento de las reservas de N y una reducción en el rendimiento de semilla.

Sotomayor-Ramírez et al. (2012), reportaron la respuesta de dos líneas endogámicas a la aplicación de N y a la rotación con coberturas vegetales en Puerto Rico. La productividad parcial del factor N (PPF) y el balance parcial de N (BPN) se utilizaron como indicadores de eficiencia de uso de N (EUN) para estas dos líneas endogámicas de maíz. El PPF que es una medida del rendimiento obtenido por unidad de fertilizante aplicado y este mostró ser inferior al valor típico reportado para híbridos. El inverso del PPF indica que líneas puras requieren una mayor cantidad de N por unidad de rendimiento esperado que híbridos. Los niveles mínimos de fertilización nitrogenada en los dos ensayos de dicho estudio fueron 84 y 112 kg N ha⁻¹ y en estos niveles se alcanzaron los valores máximos del BPN (0.35 y 0.21, respectivamente). El BPN mide la cantidad de nitrógeno removido en el grano por unidad de N aplicado. En Puerto Rico el grano es la única parte de la planta de maíz que se exporta fuera del sistema en las fincas de producción de semilla. Los valores del BPN sugieren que en la producción de semilla de líneas endogámicas en Puerto Rico el N aplicado en la fertilización excede a lo que se exporta en el grano.

Para lograr una mayor ganancia económica y reducir las pérdidas de N al medio ambiente es necesario generar información que permita determinar el nivel óptimo de aplicación de N. En líneas endogámicas de maíz existen estudios relacionados al N que se han enfocado en la identificación de características genéticas para mejorar la EUN en los

híbridos de maíz (D'Andrea et al., 2006; Coque y Gallais 2007; Coque et al., 2008; Cañas et al., 2011). Sin embargo, son pocos los estudios que se enfocan en optimizar el manejo de N en sistemas de producción de líneas endogámicas (Balko y Rusell 1980; Stevens et al., 2003; Sotomayor-Ramírez et al., 2012).

Objetivo General

El propósito de esta investigación es aportar información para mejorar el manejo del N en la producción de líneas endogámicas de maíz en Puerto Rico.

Objetivos específicos:

1. Evaluar el efecto de tres niveles de N con dos tipos de rotación de cultivo sobre: (i) la respuesta en rendimiento de semilla de una línea endogámica con alto potencial de rendimiento y (ii) la acumulación y distribución del N mineral en el perfil de suelo.
2. Evaluar el potencial de predicción de varios indicadores agronómicos del estado de suficiencia de N.

REVISIÓN DE LITERATURA

Determinación del Nivel de Aplicación de N

Las universidades, el servicio de extensión agrícola y consultores agrícolas privados, utilizan diferentes enfoques para predecir el nivel óptimo de aplicación N. Estos enfoques se fundamentan en una combinación de información científica y de experiencias previas del consultor. Los enfoques más utilizados se pueden agrupar en tres categorías los que se basan en: (i) balance de masa de N, (ii) suficiencia y (iii) monitoreo durante la temporada de crecimiento (Meisinger et al. 2008a; Sotomayor-Ramírez, 2010). En el enfoque (i) se busca mantener un balance entre los aportes que se hacen al sistema y las salidas a través de la extracción por el cultivo y las pérdidas. En el enfoque (ii) el nivel óptimo se obtiene de ensayos de respuesta realizados para un suelo y un manejo agronómico en específico. Por último en el enfoque (iii) el nivel óptimo se obtiene utilizando indicadores agronómicos y edáficos que describen la disponibilidad de N en un momento específico dentro de la temporada de crecimiento y se ajusta la meta de aplicación según los indicadores. La información de estudios científicos requerida en estos enfoques puede variar de acuerdo al potencial genético del cultivar utilizado, el clima, el tipo de suelo y las prácticas agronómicas.

En Puerto Rico varios trabajos han evaluado la respuesta a la fertilización nitrogenada y otros aspectos del manejo de N en maíz. Vázquez (1961), en dos ensayos de campo evaluó la respuesta del maíz a nueve niveles de irrigación y tres niveles de N (0, 67 y 134 kg/ha). Capó (1967), desarrolló una ecuación para describir la relación entre la fertilización nitrogenada y el rendimiento de maíz. Fox et al. (1974), evaluaron: i) la

interrelación entre nivel de N (34, 67 y 134 kg N/ha), rendimiento de maíz y N inorgánico en el suelo; ii) el efecto de los niveles en el N recuperado en la biomasa del maíz; iii) la efectividad de utilizar urea de liberación controlada y iv) la efectividad de aplicar el N en la pre siembra vs aplicarlo de 4 a 5 semanas post siembra. Badillo-Feliciano et al. (1979), evaluaron la respuesta en el rendimiento de siete cultivares de maíz a dos niveles de aplicación (67 y 134 kg N/ha) y tres momentos de aplicación (todo en la siembra, $\frac{1}{4}$ en la siembra y $\frac{3}{4}$ un mes después de sembrar y todo un mes después de la siembra). Quiles-Belén et al. (1988), estudiaron el efecto de niveles de N y densidades de siembra en la respuesta en rendimiento y varias características agronómicas en tres híbridos de maíz en dos localidades en Puerto Rico. El trabajo de Sotomayor-Ramírez et al. (2012) es el único con líneas endogámicas y bajo las practicas agronómicas, el tipo de suelo y condiciones climáticas de la zona semiárida donde se encuentran la mayor parte de las compañías semilleras. Sus resultados de dos ensayos de campo mostraron un rendimiento máximo de semilla de 2,726 kg/ha y 1,447 kg/ha con aplicaciones de 84 kg N/ha y 112 kg N/ha respectivamente.

Balko y Rusell (1980), reportaron la respuesta de 10 líneas endogámicas a cuatro niveles de N en cuatro ambientes en Iowa. El rendimiento máximo se alcanzó principalmente con 60 kg N/ha. Sin embargo, la interacción línea endogámica x ambiente fue estadísticamente significativa lo que indicó que la respuesta a N varía según la línea endogámica y el ambiente. Esta interacción se debió principalmente a los ensayos realizados en uno de los ambientes donde el nivel de N para alcanzar un rendimiento máximo varió desde 60 hasta 180 kg N/ha.

Stevens, et al. (2003), reportaron la respuesta a N de tres líneas endogámicas en tres años y dos secuencias de cultivo (soya-maíz y maíz-maíz). El rendimiento máximo en promedio (incluyendo ensayos donde no hubo respuesta), se logró con 26 kg N/ha en la secuencia soya-maíz y 73 kg N/ha en la secuencia maíz-maíz. En ninguno de los ensayos se encontró respuesta con aplicaciones de N mayores de 134 kg N/ha.

Indicadores de Disponibilidad de N en el Suelo

Un indicador del estado de suficiencia de N es un parámetro agronómico o edáfico que puede ser cuantificado y relacionado a la disponibilidad N en el suelo (Havlin et. al 2005¹). Ejemplos de indicadores agronómicos son: lecturas de clorofila, verdor de la hoja, altura, concentración de nitrato en la savia y concentración de nutrientes en el tejido. En el caso de indicadores edáficos las dos pruebas más utilizadas son la concentración de NO_3^- en el perfil del suelo antes de la siembra (“pre-plant nitrate test”) y durante el desarrollo del cultivo (“pre-sidedress nitrate test”) (Havlin, 2004). Para que un indicador cumpla con su propósito debe ser calibrado en el campo por medio de ensayos de respuesta. La calibración es un proceso donde se correlaciona el valor de un indicador con el rendimiento con el nivel de aplicación de N. Los indicadores necesitan continuamente ser calibrados siempre que ocurran cambios en las prácticas de manejo o el cultivar evaluado (Havlin et. al 2005; García y Daverede 2008 y Sotomayor-Ramírez 2010).

SPAD

El Minolta SPAD-502® es un instrumento portátil que se utiliza para medir la concentración de clorofila en las hojas. Las lecturas de SPAD-502 están relacionadas al estado de suficiencia de N en maíz. No obstante se requiere calibración ya que esta relación

¹ p. 298

varía según genotipo, etapa de crecimiento y condiciones ambientales (Samborski et al., 2009). Una estandarización de la lectura de SPAD-502 puede ser hecha dividiendo el valor que se logra con un tratamiento en particular entre un valor de referencia. El valor de referencia se obtiene de una parcela con suficiente N que haya sido establecida junto al lugar donde se quiere hacer el diagnóstico. Se ha encontrado que las lecturas de SPAD-502 estandarizadas tienen una mejor relación con el estado de suficiencia de N que las lecturas sin estandarizar (Piekielek et al., 1995; Ziadi et al., 2008). Si las lecturas de SPAD-502 son tomadas tarde en la temporada de crecimiento tienen el potencial de identificar sitios con elevadas concentraciones de NO_3^- residual (Forrestal et al. 2012). Poder identificar sitios con concentraciones elevadas de NO_3^- residual ayuda a tomar precauciones post cosechas como por ejemplo utilizar coberturas vegetales para evitar que el NO_3^- en el suelo se lixivie.

Tabla de comparación de colores

El “International Rice Research Institute” ha desarrollado una tabla de colores para diagnosticar deficiencias de N en arroz (IRRI, sin fecha). García y Espinosa (2008), evaluaron esta tabla en maíz y concluyeron que la misma ayuda a afinar las dosis de N en este cultivo.

Nitrato en la savia

La concentración de NO_3^- en la savia medida con un ionómetro portátil también ha sido una herramienta eficaz para diagnosticar el estado de suficiencia de N (Randall et al. 2008²). White et al. (1996), evaluaron este indicador en maíz dulce y encontraron que tanto la concentración de NO_3^- como el rendimiento del maíz aumentaron con la fertilización nitrogenada.

² p. 930

Nitrato en el suelo

La concentración de NO_3^- en el perfil antes de la siembra (“pre plant nitrate test”) y durante el desarrollo del cultivo (“pre side dress nitrate test”) son parámetros utilizados como indicadores de la capacidad del suelo para suplir N. Estas pruebas no deben ser utilizadas en lugares donde se esperan altas tasas de lixiviación debido a que el NO_3^- puede perderse antes de ser utilizado por el cultivo (Havlin et al., 2005). La concentración de NO_3^- luego de la cosecha puede ser utilizada como indicador del N que no fue extraído por el cultivo y que por lo tanto tiene el potencial de lixiviarse (Jaynes y Colvin, 2006). No obstante, en suelos arenosos y épocas lluviosas esta prueba no es recomendable ya que el NO_3^- puede lixiviarse antes de la cosecha (Gehl et al., 2006).

Efecto de la Rotación con Leguminosas sobre el Nivel Óptimo de Aplicación de N

Las plantas leguminosas son utilizadas como coberturas vegetales en vez de barbecho por sus beneficios en la optimización del manejo de N (Andraski y Bundy, 2005). Uno de los principales beneficios del uso de leguminosas como coberturas vegetales es su aporte de N al cultivo principal (Sainju y Singh, 2001). Las leguminosas pueden obtener N a través de una relación simbiótica con bacterias fijadoras de N y extrayéndolo del N residual del cultivo anterior. Este N obtenido por la leguminosa es asimilado formando parte de las moléculas orgánicas de la planta. Esto permite que el N sea inmovilizado hasta que la cobertura sea incorporada en el suelo antes del establecimiento del cultivo principal. El N orgánico es la forma más estable y almacenable de N en el suelo (Sarrantonio, 2007). A medida que los residuos vegetativos se descomponen el N orgánico se mineraliza y se hace disponible para el cultivo principal o se inmoviliza por microorganismos en la formación de materia orgánica.

Hacer rotaciones de maíz con leguminosas tiene la ventaja de disminuir la necesidad de aplicar N por medio del fertilizante. Un consultor agrícola debe considerar esta reducción en la cantidad a aplicar dentro del enfoque de recomendación que decida utilizar. Por ejemplo en los enfoques basados en el balance de masa de N, se puede ajustar la recomendación restando un crédito por leguminosa al requisito nutricional de N (Meisinger, et al., 2008a). Este crédito puede ser ajustado de acuerdo al rendimiento alcanzado por la leguminosa (University of Manitoba, sin fecha).

Efecto de la Rotación de Maíz con Leguminosas sobre el Rendimiento

Se ha demostrado que el rendimiento en maíz cultivado continuamente (MC) disminuye año tras año versus cuando es rotado con soya *Glycine max* (L) Merr. (SM). Gentry et al. (2013), realizaron un estudio para: (i) cuantificar la pérdida en rendimiento en MC en relación a SM durante siete años, (ii) Evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la pérdida en rendimiento del MC e identificar situaciones donde añadir N puede aliviar esta pérdida en rendimiento, (iii) rastrear la pérdida en rendimiento a través del tiempo en MC y (iv) construir un modelo para identificar factores que controlaran la pérdida en rendimiento en MS. Sus resultados muestran una pérdida en rendimiento de 1.36 Mg ha^{-1} para el promedio de años en MC. El MC requirió más N que SM y los rendimientos fueron más bajos para MC que para SM en el nivel óptimo agronómico de aplicación de N. Incrementar la dosis de N generalmente no fue efectivo para disminuir la pérdida en rendimiento en MC. La pérdida en rendimiento en MC aumentó año tras año durante los siete años de estudio. Los principales factores envueltos en la pérdida de rendimiento fueron la disponibilidad de N, la calidad y cantidad de los residuos de maíz,

mayor susceptibilidad a condiciones climáticas no favorables y la interacción entre estos factores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la Localidad y Diseño Experimental

El estudio se realizó en la finca experimental de producción de semilla Mycogen Seeds Corp. en Santa Isabel, Puerto Rico. En esta compañía la producción de maíz se lleva a cabo principalmente de septiembre a abril. Durante los meses de mayo a septiembre los predios permanecen en reposo y las prácticas de manejo se concentran en la preparación del suelo y el control de malezas por medio de control químico, labranza y/o uso de caupí como cobertura vegetal. La práctica de utilizar la cobertura de caupí fuera de la temporada fue implementada cerca del 2012.

Este estudio se llevó a cabo durante dos temporadas de producción. La primera temporada comenzó con el periodo de reposo en junio de 2011 seguido por una siembra de maíz de diciembre de 2011 a abril de 2012 (en adelante la llamaré año 2011). La segunda temporada comenzó con el periodo de reposo en junio de 2012 seguido por la segunda siembra de maíz de diciembre de 2012 a abril de 2013 (en adelante la llamaré año 2012). El suelo del predio experimental pertenece al orden Mollisol, de la serie Jacaguas (*Loamy-skeletal, mixed superactive, isohyperthermic Fluventic Haplustolls*) (USDA-SCS, 1979). Los datos de precipitación y suma térmica acumulada son presentados en las figuras 1 y 2, respectivamente. La suma térmica para maíz fue calculada utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Suma térmica} = \frac{T \text{ max } ^\circ\text{C} + T \text{ min } ^\circ\text{C}}{2} - T \text{ base}$$

donde T max es la temperatura máxima diaria, T min es la temperatura mínima diaria y como temperatura base se utilizó 8 °C (E. Román, comunicación privada).

Figura 1. Precipitación acumulada mensualmente durante las dos temporadas de estudio.

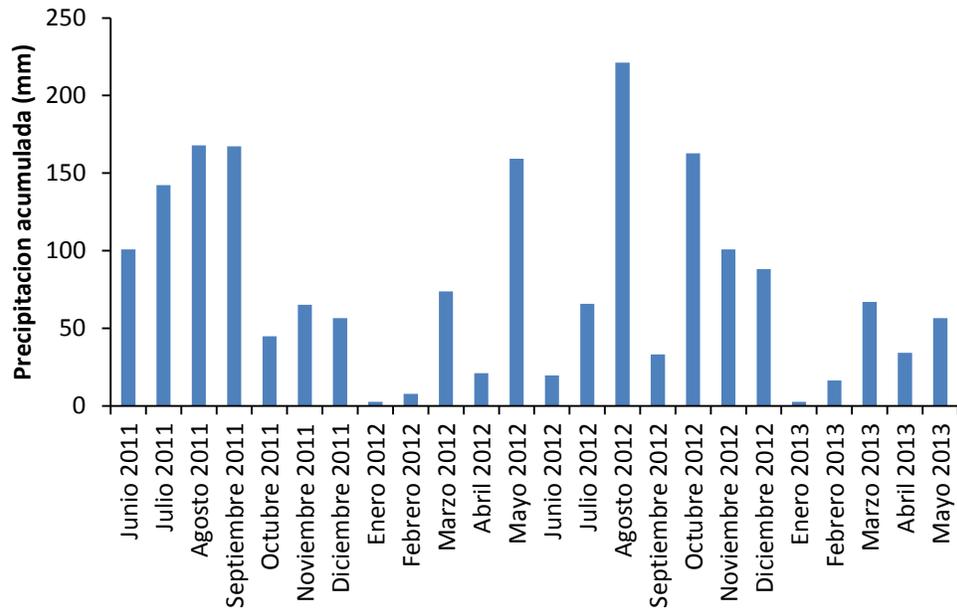
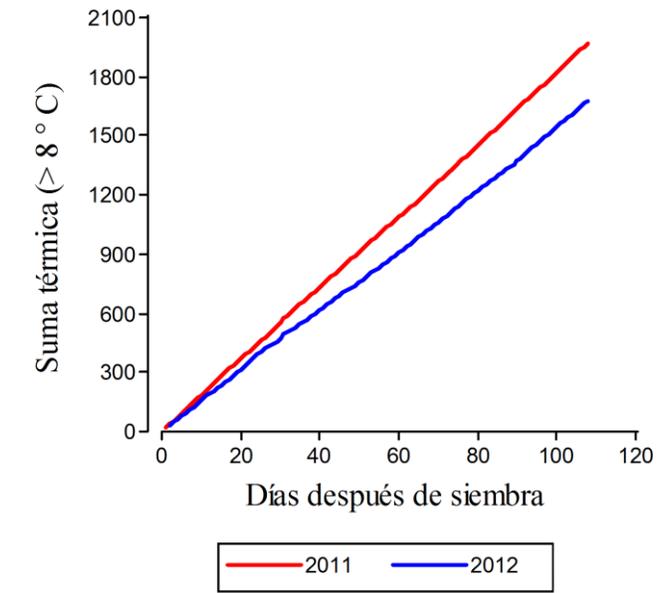


Figura 2. Suma térmica acumulada desde la siembra a la cosecha de cada año.



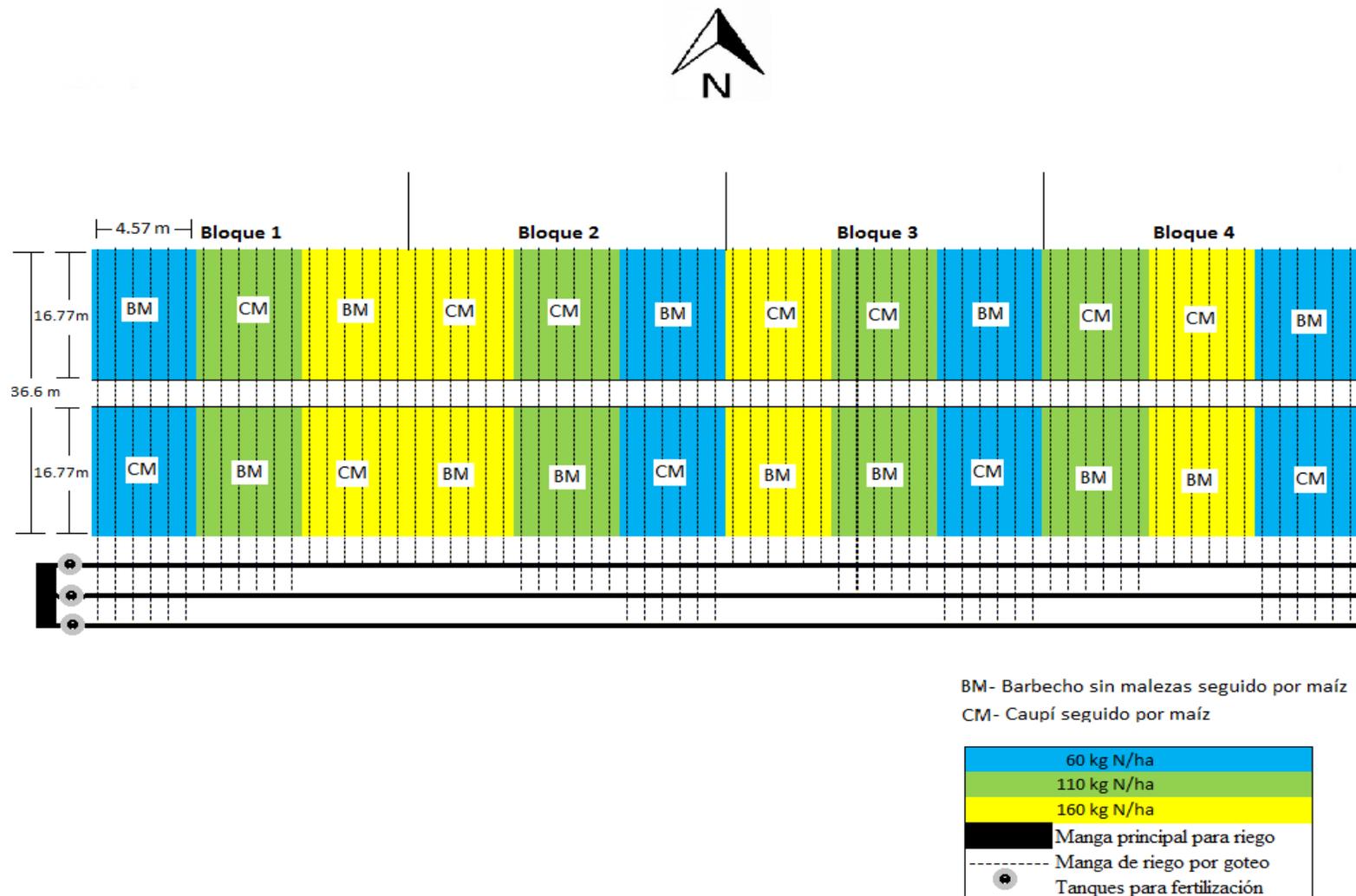
Se utilizó la línea endogámica SSH65VH, cuyo rendimiento típico reportado en Santa Isabel, P. R. es de 3,931 kg/ha (3,500 lb/acre) a una densidad de siembra de 66,718 plantas/ha (M. Acosta, Dow AgroSciences, Santa Isabel, P. R. comunicación personal). Esta línea es utilizada como hembra en la producción de híbridos comerciales, es resistente

al Glufosinato de amonio (Liberty[®]) y a Glifosato y posee el gen Bt para tolerancia a los insectos del orden lepidóptera.

El diseño experimental consistió en bloques completamente aleatorizados (DBCA) y un arreglo de parcelas divididas con cuatro repeticiones (Figura 3). Los bloques fueron establecidos de acuerdo a la distribución de malezas observadas en el predio. La diferencia en especies de yerbajos es considerada como indicador de variaciones en el suelo. Antes de la siembra abundaban yerbajos de la familia Oleraceae al oeste y de la Poaceae en el este. Los bloques 1 y 2 se establecieron en el oeste y los bloques 3 y 4 en el este. El factor evaluado en la parcela principal fue el nitrógeno y en la sub-parcela la rotación de cultivo. Las dosis de N fueron 60, 110 y 160 kg N/ha para nivel bajo, intermedio y alto, respectivamente. Las rotaciones de cultivo fueron: caupí seguido por línea pura de maíz (CM) y barbecho desnudo seguido por línea pura de maíz (BM).

El predio experimental consistió de doce parcelas principales divididas en 24 sub-parcelas. Las parcelas principales tenían un área de 167.20m² (36.59 m x 4.57 m) y fueron divididas por un borde de 3.05 m para reducir interacción entre las sub-parcelas. Las sub-parcelas tenían un área de 76.63 m² (16.77 m x 4.57 m). Durante la temporada de maíz cada parcela estaba constituida por seis hileras. De las seis hileras se utilizaron las cuatro centrales para aplicar los tratamientos de N y el resto fueron utilizadas como borde. La unidad experimental correspondía a los cuatro surcos centrales de cada sub-parcela. Para garantizar la ubicación de las parcelas se colocaron estacas permanentes a 1m de profundidad y a una distancia de 3 m de cada una de las esquinas del predio experimental.

Figura 3. Mapa experimental para los ensayos realizados en el 2011 y 2012.



Manejo Agronómico Durante el Periodo de Reposo

En las sub-parcelas con cobertura se estableció el caupí cv. 'Iron Clay' como cobertura vegetal el 24 junio de 2011 y el 1 junio de 2012. Para las mismas no hubo control de yerbajos ni plagas. En el 2012 debido a la falta de precipitación se le aplicó riego al caupí durante aproximadamente 10 días para promover la germinación. Para evitar que las semillas del caupí maduraran y germinaran voluntariamente convirtiéndose en un problema de maleza para el maíz se realizó un corte de mantenimiento. El mismo se llevó a cabo en la fecha de florecida en el 2011 (66DDS) y comenzando el llenado del grano (73 DDS) en el 2012 a una altura de 10 cm. Durante este tiempo las sub-parcelas sin cobertura (rotación BM) fueron mantenidas libres de yerbajos por medio de aplicación de herbicida (33 y 73 DDS en el 2011 y a los 28 DDS en el 2012) y labranza (18 DDS en el 2011 y a los 55 DDS en el 2012). El periodo bajo cobertura culminó a los 110 DDS en el 2011 y a los 108 DDS en el 2012. El caupí fue exterminado utilizando el herbicida glifosato para que los residuos de cobertura se degradaran antes de comenzar a preparar el terreno para la siembra y de esta manera evitar el movimiento de material fuera de las sub-parcelas.

Manejo Agronómico del Maíz

El predio fue preparado para la siembra con arado de disco y cincel. Las siembras se establecieron el 20 de diciembre de 2011 y el 19 de diciembre de 2012. En cada parcela se sembraron seis hileras de maíz a una distancia de 0.76 m. La densidad teórica de plantas en el 2011 fue de 52,631 plantas/ha y la real de 46,270 plantas/ha. La densidad teórica de plantas en el 2012 fue de 66,000 plantas/ha y la real de 79,075 plantas/ha. El requisito de riego y control de plagas del maíz se determinó de acuerdo a las recomendaciones de manejo de Mycogen Seeds Corporation. Se fertilizó en la siembra en banda con 67, 112, y

28 kg/ha de P₂O₅, K₂O y elementos menores (EM), respectivamente. Las fuentes de P, K y elementos menores fueron superfosfato triple, muriato de potasio y Five-Star-Mix®, respectivamente.

El N fue aplicado por medio del sistema de riego por goteo. La primera aplicación de este nutriente fue a los 7 días después de la siembra en cada año y consistió de 28 kg de N/ha para todo el experimento en forma de sulfato de amonio. El N restante para completar las dosis a evaluar se aplicó utilizando sulfato de amonio y nitrato de potasio en proporción 3:1 (NH₄⁺-N: NO₃⁻-N), respectivamente. En el 2011 este N restante se dividió en dos aplicaciones a los 21 y 35 días después de siembra (DDS) y en el 2012 en tres aplicaciones (23, 38 y 51 DDS).

Evaluación de la Extracción de N por el Caupí

El rendimiento de materia seca (RMS) en la biomasa aérea y extracción de N fueron evaluados antes del corte de mantenimiento y al final de la temporada bajo cubierta. El área a muestrear se determinó colocando al azar un cuadrante de 0.837 m² entre el centro de la unidad experimental y los bordes exteriores del predio experimental. La biomasa dentro del cuadrante fue cosechada a una altura de aproximadamente 10 cm. La muestra fue pesada fresca y se obtuvo una sub-muestra de entre 500 a 600 g para determinación del contenido de humedad y concentración de N total. La submuestra fue colocada en una bolsa de nilón y secada en el horno a 55 °C durante 72 horas. Finalmente la sub-muestra fue molida completamente en un molino Willey y enviada a un laboratorio comercial (MDS Harris Laboratories®) para determinar la concentración N total.

Evaluación del Estado Nutricional del Maíz

Como indicadores del estado del N en maíz se evaluaron: lecturas de SPAD, verdor de la hoja, altura, concentración de nitrato en la savia y concentración de nutrientes en el tejido. Las medidas de altura, color y SPAD fueron tomadas de acuerdo al desarrollo del cultivo (ver resultados) entre las etapas V6 a VT (Abendroth et al., 2011). La concentración de nutrientes en el tejido fue evaluada a los 51 DDS en el 2011 y a los 58 DDS en el 2012. Esta medida se utilizó tanto para determinar el estado del N como el estado nutricional en general del cultivo (P, K, Ca Mg, S, Zn, Mn, Cu, Fe y B).

Las lecturas de SPAD fueron tomadas con un metro de clorofila SPAD-502 (Minolta Corp.). El SPAD provee un valor sin unidades que se relaciona positivamente con la cantidad de clorofila (Samborski et al., 2009). En la literatura este valor se expresa en unidades de SPAD (Piekielek et al. 1995). El verdor de la hoja se midió utilizando un “IRRI Leaf Color Chart” con una escala de 1 a 4 y la altura con una regla métrica. Los muestreos para altura, color y SPAD se realizaron de forma sistemática en las hileras centrales comenzando a 5 pasos del borde exterior de la unidad experimental y eligiendo las plantas una sí y una no. En cada sub-parcela se midieron 20 plantas para lecturas de SPAD, diez para color y diez para altura. Para las lecturas de SPAD y color se utilizaron la hoja más joven completamente expandida durante las etapas vegetativas y la hoja de la mazorca durante la florecida. La medida fue tomada en el centro de la hoja entre la base y la punta y entre la vena central y el borde de la hoja. La altura fue medida desde la base del tallo hasta la punta más alta estirando todas las hojas hacia arriba.

La concentración de nitrato en la savia fue determinada por medio de un ionómetro portátil (Horiba, Spectrum Technologies, Inc.). La muestra fue tomada a 0.75 m de

distancia del borde exterior de cada unidad experimental y fueron cosechadas cinco plantas al nivel del suelo. De cada planta se cortó una sección de tallo de aproximadamente 8 cm y fue almacenada en bolsas plásticas. Todas las muestras fueron colocadas en una nevera con hielo hasta ser llevadas al laboratorio. Una vez ahí, fueron congeladas para facilitar la extracción de la savia. Al cabo de varios días de ser congeladas se obtuvo un segmento de 15 cm a partir de 2.5 cm de donde fueron cortados los tallos inicialmente. Estos segmentos a su vez fueron trozados en seis segmentos y colocados en vasos de precipitado de vidrio para ser descongelados. Una vez descongelados los segmentos se exprimieron manualmente para extraer la savia. La concentración de nitrato fue determinada según las recomendaciones del manual del ionómetro.

Rendimiento y Extracción de N del Grano y Rastrojo

Los resultados de rendimiento y extracción de N fueron expresados en kg/ha utilizando estimados de densidad de plantas. En el 2011 el estimado se realizó contando todas las plantas de las dos hileras centrales. En el 2012 se contó el número de plantas dentro de una sección de 3.3 m de cada una de las hileras centrales.

El rendimiento de biomasa de la planta conocido normalmente como rastrojo (tallo, hojas y cáscara de la mazorca) usualmente se determina tan pronto la planta alcanza la madurez fisiológica (70 – 80 DDS) para evitar pérdidas de material por senescencia. No obstante en el 2011 la medida de biomasa se determinó a los 105 DDS ya que por problemas de germinación fue necesario resembrar y no todas las plantas maduraron al mismo tiempo. En el 2012, el muestreo para determinar el rendimiento del rastrojo se realizó a los 83 DDS. El muestreo fue realizado cosechando 20 plantas en el 2011 y 10 plantas en el 2012 en uno de los surcos centrales de cada sub-parcela. Las plantas fueron

seleccionadas comenzando a cinco pasos del borde norte de la unidad experimental y cortándolas una sí y una no. Las mazorcas fueron removidas para la determinación del peso fresco. En el 2011, a partir de la muestra, se obtuvo una submuestra de cinco plantas para determinar el contenido de humedad. La submuestra fue pesada fresca y colocada en un horno a 55 °C hasta alcanzar un peso seco constante. El valor de humedad se utilizó para calcular el peso seco de la muestra y el resultado se expresó en términos de kg/ha.

En el 2012, por accidente, se perdieron los datos de peso seco de la submuestra de rastrojo utilizada para la determinación de contenido de humedad. En el 2011 el contenido de humedad fue de 69% con una desviación estándar de 3%. No obstante en el 2011 el muestreo del rastrojo se realizó a los 105 DDS y por lo tanto inferimos que la biomasa contenía menos humedad que la del 2012 que fue cosechada a los 83 DDS. En un experimento bajo condiciones similares en el 2010 (datos no presentados) la biomasa se cosechó a los 77 DDS y el estimado de humedad fue de 85% con una desviación estándar de 5%. Basado en esto, se le adjudicó un contenido de humedad de 82% a todas las muestras de rastrojo fresco del 2012.

El rendimiento del grano fue determinado a los 105 DDS en el 2011 y a los 106 DDS en el 2012. Las plantas se seleccionaron de la misma forma que para la biomasa, pero se muestrearon 20 plantas en el 2011 y 30 en el 2012. Las mazorcas cosechadas fueron secadas parcialmente en una secadora comercial y luego desgranadas. Los granos fueron contados en una contadora de semillas. En el 2011 se contaron todos los granos de las 20 plantas cosechadas y utilizando el estimado de densidad de plantas se expresó el resultado en número de granos/m². En el 2012 fue contado el número de granos en una sub-muestra de 500 g y utilizando el rendimiento de las 30 plantas cosechadas y el estimado de densidad

de plantas se expresó el resultado en número de granos/m². Luego, el grano fue colocado en un horno a 55 °C hasta llegar a un peso constante. El rendimiento se expresó basado en un valor de humedad de 15.5%. En el 2011, para expresar el rendimiento en términos de kg/ha se multiplicó el rendimiento por planta en cada parcela por la densidad de planta real de la parcela. En el 2012 se le adjudicó una densidad de 66,718 plantas/ha a todas las parcelas debido a la variación en la densidad real de plantas. La sub-muestra de biomasa y la muestra de grano fueron molidas y enviadas a MDS Harris Laboratories® para determinación de N total.

Muestreo de Suelo

El perfil de suelo fue muestreado en cada parcela para evaluar el N inorgánico. Las profundidades muestreadas fueron de 0-30, 30-60 y 60-90 cm en la siembra y la postcosecha del maíz. El muestreo se realizó un día antes de la siembra y un día después de la cosecha en el 2011 y 7 días antes de la siembra y un día después de la cosecha en el 2012. Las muestras fueron tomadas aleatoriamente por lo menos a dos pasos de los bordes de las parcelas. Para la sección de 0-30 cm se utilizó una barrena tipo sacabocado y la muestra consistió de seis a ocho sub-muestras. Para las secciones de 30-60 y 60-90 cm se utilizó una barrena tipo “bucket auger” y la muestra consistió de dos sub muestras. Este muestreo tiene limitaciones estimando el valor real de la parcela debido a la alta variabilidad espacial del N. Mesinger (1984) citado por (Meisinger et al. 2008b, p. 517) estimó que son necesarias muestras de 10 a 20 submuestras por parcela con cilindros de dos cm de diámetro para estimar el valor real de la parcela dentro de un 20% de error. El contenido de N inorgánico se expresó en kg N/ha asumiendo una densidad aparente de 1.35 g/cm³ en el perfil de 0-90 cm.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Infostat[®] (2009). Se realizó un ANOVA con arreglo de parcelas divididas para los datos agronómicos y de parcelas subdivididas para los datos de suelo cuyos supuestos de normalidad y homocedasticidad fueron verificados. De acuerdo al resultado del ANOVA para la interacción se analizaron los efectos principales o los efectos simples de los tratamientos. Para los factores en los que el ANOVA fue significativo ($p \leq 0.05$) se compararon las medias de los tratamientos utilizando la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Aportación de N del Caupí al maíz

El rendimiento y extracción de N de la biomasa aérea del caupí fue determinado previo a la poda de mantenimiento y previo a la incorporación en cada año (Cuadro 1). El rendimiento de la biomasa aérea del caupí en el 2011 hasta la poda de mantenimiento (ver materiales y métodos, p.15) a los 66 DDS fue de 4,250 kg/ha de materia seca con una concentración de N de 2.37% extrayendo cerca de 100 kg N/ha. El rebrote alcanzó un rendimiento de materia seca de 2,200 kg/ha con una concentración de N de 2.82% extrayendo aproximadamente 63 kg N /ha hasta que fue exterminado a los 109 DDS.

En el 2012, el rendimiento de la biomasa aérea del caupí hasta la poda de mantenimiento a los 74 DDS fue de 2,488 kg/ha de materia seca con una concentración de N de 2.89%, extrayendo 72 kg N/ha. El rebrote alcanzó un rendimiento de materia seca de 3,602 kg/ha con una concentración de N de 2.68% extrayendo 96 kg N /ha hasta el momento de exterminarlo a los 108 DDS.

Cuadro 1. Rendimiento de la biomasa aérea y extracción de N del caupí hasta el momento de la poda de mantenimiento y hasta la exterminación.

Momento de muestreo	Rendimiento de biomasa aérea (kg /ha)	Concentración de N en la biomasa aérea (%)	Extracción de N en la biomasa aérea (kg N /ha)
Poda ¹ 2011	4255.2	2.37	100.6
Exterminación ² 2011	2212.1	2.82	62.5
Poda 2012	2487.5	2.89	71.8
Exterminación 2012	3602.0	2.68	96.4

¹El Caupí fue podado en ambos años de estudio para evitar que produjera semillas viables que pudieran germinar y convertirse en un problema de maleza para el maíz.

² El rebrote del caupí fue exterminado con glifosato para permitir su descomposición previo a la preparación del terreno y evitar movimiento de material de las parcelas con caupí a las parcelas sin caupí.

Las raíces de caupí pueden obtener el N directamente del NH_4^+ y el NO_3^- que suple la reserva de suelo y a través de fijación biológica del N_2 . Se observó que las raíces del caupí contenían nódulos rosados en los dos años de este estudio lo cual es indicador de que

hubo fijación biológica. Un estimado bajo condiciones controladas reflejó que el caupí puede fijar hasta un 80% del N extraído (Sotomayor, datos no publicados). Si el caupí fijó un 80% del N que extrajo hasta el corte de mantenimiento y por lo menos un 50% del N que extrajo hasta que fue exterminado se puede asumir que el caupí aportó hasta 112 kg N/ha en el 2011 y hasta 106 kg N/ha en el 2012. El N obtenido por fijación biológica representa una entrada al sistema que puede compensar el N removido en la cosecha del maíz. No obstante esto va depender de una adecuada sincronización entre la tasa a la que este N se mineraliza y la extracción por el cultivo.

Fertilidad del Suelo y Estado de Suficiencia Nutricional del Cultivo

Los resultados del análisis de suelo para caracterización química (Cuadro 1) sugieren que el desarrollo del cultivo no estuvo limitado por la fertilidad del suelo de acuerdo a los niveles de suficiencia sugeridos para Puerto Rico (Sotomayor-Ramírez, 2010). Para confirmar el estado nutricional del cultivo se midió la concentración de nutrientes en la hoja indicadora. Se comparó la concentración de N, P, K, Mg, Ca, S, Zn, Mn, Cu, Fe y B (Cuadro 2) con los rangos de suficiencia sugeridos por (Campbell, 2011). Estos rangos de suficiencia fueron establecidos para la producción de híbridos de maíz en el sur este de los Estados Unidos. A pesar de que probablemente no aplican para la producción de líneas endogámicas en Puerto Rico se utilizaron como guía debido a la falta de información local. El Zn fue el único nutriente que se encontró por debajo del rango de suficiencia lo cual sugiere que pudo limitar el desarrollo del cultivo. El rango de suficiencia Zn es de 20 a 70 ppm mientras que en este estudio en el 2011 la concentración fue de 12.67 ppm y de 14.60 ppm en el 2012. Sotomayor-Ramírez et al. (2012) reportaron concentraciones de Zn de 18.3 y 16.4 ppm en los dos ensayos de su estudio.

Cuadro 2. Parámetros de fertilidad del suelo (0-15cm) en el predio experimental en Santa Isabel.

pH	OM ¹	Bray 1 P ²	Ca ³	Mg ³	K ³	Na ³	CIC ⁴	S ⁵	Fe ⁵	Mn ⁵	Zn ⁵	Cu ⁵	B ⁵
	%	ppm	-----meq/100g-----				-----ppm-----						
7.18	1.80	86.03	15.52	5.11	0.66	0.31	21.59	3.88	10.21	1.82	1.58	6.36	0.37

¹MO – Materia orgánica medida por perdida por incineración.

⁴Capacidad de intercambio catiónico, que es la suma de Ca, Mg, K, y Na.

²Fósforo extraído con 0.025 M HCL + 0.03 N NH₄F.

⁵Micronutrientes extraídos con DTPA + 0.1M TEA (pH 7.30) + 0.01M CaCl₂.

³Bases intercambiables extraídas con NH₄OAc.

Cuadro 3. Concentración de nutrientes en la hoja indicadora para los años 2011 y 2012.

Variable	Rango de ¹	2011		2012	
	suficiencia	Media	D.E.	Media	D.E.
N total (%)	3.0 - 4.0	2.79	0.10	2.73	0.18
P (%)	0.25 - 0.5	0.36	0.03	0.33	0.02
K (%)	1.8 - 3.0	2.08	0.10	2.18	0.08
Mg (%)	0.15 - 0.6	0.19	0.01	0.23	0.01
Ca (%)	0.25 - 0.8	0.41	0.02	0.51	0.04
S (%)	0.15 - 0.4	0.21	0.01	0.20	0.01
Zn ² (ppm)	20 - 70	12.67	1.46	14.60	2.02
Mn (ppm)	15 - 150	61.29	8.37	59.46	5.04
Cu (ppm)	5 - 25	12.83	0.82	11.40	1.09
Fe (ppm)	30 - 250	104.04	17.17	200.37	20.57
B (ppm)	5 - 25	15.13	1.92	10.88	2.16

¹Valores de suficiencia sugeridos por Campbell (2011).

²El Zn fue el único nutriente cuya concentración estuvo por debajo de los rangos de suficiencia establecidos por Campbell (2011).

Respuesta en Rendimiento

En el 2011, el rendimiento de grano de maíz (kg/ha) no fue afectado significativamente por la fertilización nitrogenada ($p \geq 0.05$), pero sí por el tipo de rotación ($P \leq 0.05$) (Cuadro 4). En la rotación caupí-maíz (CM) el rendimiento de grano fue un 34% más alto que la rotación barbecho-maíz (BM) (Cuadro 5). Los componentes del rendimiento (número de mazorcas, número de granos y peso del grano) tampoco respondieron a la aplicación de N y solo el número de granos respondió significativamente al tipo de rotación ($p \leq 0.05$) (Cuadro 4). El número de granos fue 24% más alto en la rotación CM (843 granos/m²) que en la rotación BM (681 granos/m²). La media general de mazorcas fue 44,141 mazorcas/ha y el peso específico del grano fue de 183 g/1,000 granos.

El rendimiento del rastrojo y el índice de cosecha no fueron afectados significativamente por la interacción entre el nivel de N y la rotación, el nivel de N y/o la rotación (Cuadro 4), aunque ambos tuvieron una tendencia a ser mayor con la rotación CM respecto a la rotación BM que fue mayor para el índice de cosecha (4% vs 13% de diferencia). El rendimiento biológico (grano + rastrojo) no fue afectado por la interacción nivel de N x rotación ni por el nivel de N, pero sí por la rotación. El rendimiento biológico fue un 19% más alto ($p \leq 0.05$) en la rotación CM que en la rotación BM (Cuadro 5).

En el 2012, el rendimiento de grano, los componentes del rendimiento de grano, el rendimiento del rastrojo, el rendimiento biológico y el índice de cosecha no fueron afectados significativamente por la interacción entre el nivel de N y la rotación, el nivel de N ni la rotación ($p > 0.05$) (Cuadro 6). Las medias generales para rendimiento de grano, número de granos, peso específico del grano, rendimiento del rastrojo y rendimiento biológico fueron 4,243 kg/ha, 2,144 granos/m², 167g/1000 granos, 8,283 kg/ha y 12,526

kg/ha, respectivamente. El número de mazorcas no fue evaluado en este año ya que casi todas las plantas tenían una sola mazorca siendo por lo tanto, la media general (66,718 mazorcas/ha) igual a la densidad de plantas experimental.

El rendimiento típico reportado en Puerto Rico para esta línea pura bajo condiciones similares es de 3,931 kg/ha a una densidad de siembra de 66,718 plantas/ha (M. Acosta, Dow AgroSciences, Santa Isabel, P. R. comunicación privada). Las medias experimentales para el rendimiento de semilla, número de mazorcas, número de granos, rendimiento del rastrojo y rendimiento biológico en el 2011 fueron claramente inferiores a las del 2012 y al rendimiento típico reportado para esta línea.

En el 2011 a través de una prueba de ELISA se confirmó que las plantas estaban infectadas con el virus del moteado del maíz (MCMV) (C. Salcedo, Dow AgroSciences, Santa Isabel, P. R. comunicación privada) y se estimó que un 40% de las plantas presentaron síntomas. La densidad de plantas en el 2011 fue 70% menor que en el 2012. En el 2011, el experimento se estableció a una densidad de plantas planificada de 52,631 plantas/ha. Sin embargo, a los 7 DDS se detectaron problemas de germinación y se realizó una resiembra manual para alcanzar la densidad planificada; pero a pesar de la resiembra la densidad real de plantas (46,270 plantas/ha) fue un 14% menor que la proyectada. La densidad teórica de plantas en el 2012 fue de 66,000 plantas/ha siendo mayor al primer año con el propósito de entresacar plantas para homogeneizar el experimento de haber problemas de germinación. El entresaque no se realizó debido a que no hubo problemas de germinación y a que el experimento lucía homogéneo. No obstante, la densidad de plantas final fue de 79,075 plantas/ha en un rango de 50,997 a 91,065 plantas/ha y con una desviación estándar de 9,270 plantas/ha. La menor densidad de plantas y la presencia de

virus en el 2011 pudieron ser la principal causa de la reducción en rendimiento en ese año. Las plantas con síntomas de virus se vieron afectadas al punto de que algunas no produjeron mazorcas.

El incremento en rendimiento en el 2011 con la rotación CM no se sostuvo en el 2012. Para que la rotación CM incrementara los rendimientos en el 2011, esta debió mitigar de alguna forma el efecto de la densidad de plantas, el ataque de virus u otro factor más limitante que estuviera presente en este año. La falta de respuesta en rendimiento en el rastrojo, el aumento en número de granos y en el índice de cosecha indica que el efecto del caupí en el 2011 estuvo asociado a la formación de grano y no a un mayor vigor de la planta.

Cuadro 4. Resumen de ANOVA para el efecto de nivel de N, rotación de cultivo y la interacción nivel de N x rotación de cultivo sobre parámetros agronómicos en el 2011.

Variable	Nivel de N (N)	Rotación	CC * N	Media	E.E.
	----- valor de P -----				
Rendimiento del grano (15 %), kg/ha	0.7943	0.0509	0.5948	n/a	n/a
Mazorcas/ha	0.5553	0.255	0.5063	44141.75	869.08
Semillas/ha	0.6367	0.0619	0.4093	7621234	462835.3
Peso del grano, g/1000 semillas	0.1581	0.1682	0.7003	183.51	3.86
Rendimiento del rastrojo seco, kg/ha	0.8738	0.3041	0.2924	1756.45	52.24
Rendimiento biológico (grano + rastrojo), kg/ha	0.8589	0.0505	0.3668	n/a	n/a
Índice de cosecha	0.5565	0.0773	0.7834	0.43	0.02
N en el grano, kg/ha	0.8193	0.056	0.6181	n/a	n/a
P en el grano, kg/ha	0.8759	0.1778	0.5355	4.5	0.33
K en el grano, kg/ha	0.8139	0.0822	0.3529	5.68	0.4
N en el rastrojo, kg/ha	0.2404	0.6109	0.3139	24	0.89
P en el rastrojo, kg/ha	0.1926	0.0293	0.1142	n/a	n/a
K en el rastrojo, kg/ha	0.2298	0.1449	0.1574	31.2	0.89
N en la planta (grano + rastrojo), kg/ha	0.6624	0.0486	0.2643	n/a	n/a
SPAD (38 DDS)	0.8562	0.2038	0.7983	46.5	0.28
SPAD (51DDS)	0.2308	0.3174	0.5875	48.76	0.29
SPAD (63 DDS)	0.8783	0.1862	0.0948	48.78	0.32
Índice de color (38 DDS) ¹	0.4404	0.1883	0.5058	3.01	0.03
Índice de color (51 DDS)	0.1503	0.1973	0.2426	3.56	0.03
Índice de color (63 DDS)	0.3875	0.8503	0.8679	3.53	0.03

(continuación en la próxima página)

Cuadro 4. Continuación.

Parámetro Evaluado	Nivel de N (N)	Rotación (CC)	CC * N	Media	E.E.
		----- valor de p -----			
Altura de la planta (43 DDS), cm	0.6322	0.0494	0.6756	n/a	n/a
Altura de la planta (51 DDS), cm	0.5637	0.1593	0.9116	132.69	0.75
Altura de la planta (63 DDS), cm	0.9354	0.0135	0.0763	n/a	n/a
Concentración de NO ₃ ⁻ en la savia (42 DDS)	0.0264	0.0346	0.3562	n/a	n/a

¹ La escala medida del indicador es del 1 al 4.

Cuadro 5. Efecto de la rotación de cultivo sobre el rendimiento del grano y la biomasa aérea en el 2011.

Rotación de cultivo	Rendimiento del grano (15.5%)	Rendimiento biológico (grano + rastrojo)
	-----kg/ha-----	
Caupí-maíz	1,837 b ¹	3,651 b
Barbecho-maíz	1,369 a	3,068 a

¹ Letras diferentes indican diferencias estadísticas entre medias dentro de cada columna.

Cuadro 6. Resumen de ANOVA para el efecto de nivel de N, rotación de cultivo y la interacción nivel de N x rotación de cultivo sobre variables agronómicas en el 2012.

Variable	N	CC	CC * N	Media	E.E.
	----- valor de p -----				
Rendimiento del grano (15 %), kg/ha	0.3380	0.7859	0.5443	4243	184.44
Semillas/m ²	0.6680	0.9660	0.3830	2143	66.10
Peso del grano, g/1000 semillas	0.0680	0.5331	0.6012	166.62	4.24
Rendimiento del rastrojo seco, kg/ha	0.9749	0.2593	0.7780	8282	114.77
Rendimiento biológico (grano + rastrojo), kg/ha	0.5604	0.7366	0.4275	12526	221.13
Índice de cosecha	0.3112	0.5208	0.7106	0.28	0.01
Extracción de N en el grano, kg/ha	0.2802	0.1202	0.5554	46.90	1.93
Extracción de P en el grano, kg/ha	0.4240	0.6474	0.5637	12.29	0.53
Extracción de K en el grano, kg/ha	0.4061	0.7154	0.6244	21.37	0.86
Concentración de N en el rastrojo, %	0.8582	0.1129	0.6402	1.32	0.02
N en el rastrojo, kg/ha	17300	0.3357	0.5021	112.85	3.33
P en el rastrojo, kg/ha	0.6179	0.3703	0.1832	19.41	0.48
K en el rastrojo, kg/ha	0.4060	0.1527	0.7291	178.42	3.03
N en el cultivo (grano + rastrojo), kg/ha	0.4049	0.0330	0.2374	168.35	3.29
SPAD (30 DDS)	0.2862	0.0495	0.3373	n/a	n/a
SPAD (42DDS)	0.7280	0.8513	0.9811	46.49	0.54
SPAD (49 DDS)	0.5857	0.3460	0.4765	40.39	0.49
SPAD (63 DDS)	0.6368	0.0356	0.1161	n/a	n/a
Índice de color (30 DDS) ¹	0.5354	0.4219	0.0393	3.56	0.01
Índice de color (37 DDS)	0.1048	0.8738	0.6074	3.62	0.01

(continuación en la próxima página)

Cuadro 6. Continuación

Variable	N	CC	CC * N	Media	E.E.
		----- valor de p -----			
Índice de color (42 DDS)	0.0254	0.2902	0.0350	n/a	n/a
Índice de color (49 DDS)	0.3910	0.0488	0.7596	3.56	0.01
Índice de color (63 DDS)	0.9341	0.5568	0.1211	3.79	0.03
Altura de la planta (37 DDS)	0.4352	0.0025	0.1016	n/a	n/a
Altura de la planta (42 DDS)	0.6326	0.0009	0.0369	n/a	n/a
Altura de la planta (49 DDS)	0.1398	0.0033	0.0324	n/a	n/a
Altura de la planta (63 DDS)	0.6341	0.3735	0.1923	160.17	0.79
Concentración de NO ₃ ⁻ en la savia (36 DDS)	0.0043	0.0093	0.2260	n/a	n/a
Concentración de NO ₃ ⁻ en la savia (63 DDS)	0.0003	0.0025	0.0681	n/a	n/a

¹ La escala medida del indicador es del 1 al 4.

Extracción de N

En el 2011 la extracción de N por la planta (grano + rastrojo) se afectó por la rotación CM ($p \leq 0.05$) y no por los niveles de N (Cuadro 4). La rotación CM aumentó la extracción de N por la planta en un 18% (Cuadro 7). De los componentes de la extracción de N por la planta solo el grano fue afectado por la rotación CM aumentando a 33% con dicha rotación. La extracción de N por el grano está compuesta de la concentración de N en la biomasa del grano y del rendimiento de grano logrado (rendimiento de grano x [N] en el grano). La concentración de N en el grano no fue afectada por la rotación CM. Por lo tanto, el aumento en extracción estuvo asociado al aumento en rendimiento que hubo con la rotación CM en ese año.

Cuadro 7. Efecto de la rotación de cultivo sobre la extracción de N en el grano y la planta entera en el 2011.

Rotación de cultivo	Extracción de N en el grano	Extracción de N por la planta (grano + rastrojo) kg/ha
	-----kg/ha-----	
Caupí-maíz	28.5 b ¹	53.0 b
Barbecho-maíz	21.4 a	44.9 a

¹ Letras diferentes indican diferencias estadísticas entre medias dentro de cada columna.

En el 2012 la extracción N por la semilla, el rastrojo y la planta no fue afectada por el nivel de N, la rotación de cultivo ni la interacción nivel de N x rotación de cultivo ($p \geq 0.05$) (Cuadro 6). Las medias experimentales de extracción de N por la semilla, el rastrojo y la planta fueron 47, 113 y 168 kg N/ha, respectivamente. La concentración de N en el rastrojo incrementó entre un 10 y un 16% con la fertilización nitrogenada (Cuadro 8).

Cuadro 8. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de N en el rastrojo para la siembra del 2012.

Tratamiento	N total
Nivel de N (kg/ha)	%
60	1.25a ¹
110	1.38b
160	1.45b

¹ Letras diferentes indican diferencias estadísticas entre medias.

Requerimiento Interno de N

El requerimiento interno de N es la cantidad de N necesaria para que la planta complete su ciclo de vida y se maximice el rendimiento. El requerimiento de fertilización es la cantidad de N que debe ser suplida para satisfacer el requerimiento interno. El requerimiento de fertilización dependerá de factores como el suelo, el riego, la lluvia, el cultivo antecesor y las pérdidas entre otros.

Stanford (1973), estimó una concentración crítica³ de N de 1.2% en la materia seca de la planta de maíz (grano y rastrojo) y expresó que al parecer la misma no es afectada por la variedad, la localidad, el clima o el nivel de rendimiento alcanzable. Basado en esta concentración crítica y un índice de cosecha de 0.5 él estimó que se necesitaría aplicar 1.2 lb de N por bu de grano con 12% de humedad para satisfacer el requerimiento interno de la planta. El resultado es que tradicionalmente se ha estimado el requerimiento interno del maíz basado en el enfoque de Stanford (1973) de fertilizar basado en una expectativa de rendimiento e índice de cosecha y una concentración en la biomasa de 1.2% (Meisinger et al. 2008a)⁴. Rodríguez y Bullock (2015), a través de un análisis microeconómico examinaron este factor y no encontraron evidencia que apoyara su amplio uso. Ellos

³ Se refiere a la concentración mínima de N en la biomasa de la planta (grano y rastrojo) para poder maximizar el rendimiento. Stanford (1973) identificó esta concentración aplicando niveles de N que resultaban en los mayores rendimientos y que no eran excesivos ni limitantes.

⁴ P. 574

argumentan que contrario a lo asumido por Stanford (1973) la concentración crítica es menor de 1.2% y varía entre y dentro de los estados de los Estados Unidos. En casos donde no se cuenta con ensayos de respuesta o indicadores de suficiencia de N calibrados para las condiciones específicas, el requerimiento interno de N estimado basado en una expectativa de rendimiento puede ser utilizado.

Los valores de extracción de N en la planta y de rendimiento de varios estudios fueron recopilados en un intento de validar preliminarmente si el requerimiento interno de N de los híbridos también aplica a líneas endogámicas (Cuadro 1). En lugar de hacer el cálculo como lo hizo Stanford (1973) se utilizó la extracción de N por la planta dividida por el rendimiento del grano con un 15.5% de humedad. Los valores de extracción y rendimiento de cada estudio se obtuvieron promediando los valores donde se alcanzó el rendimiento máximo y entre los cuales no se encontró diferencia significativa. Los valores de extracción de N en la planta por unidad de grano producido en cada uno de estos estudios fue mayor que el requerimiento interno de N de 1.2 lb N/bu.

En las líneas endogámicas la concentración de N en general fue mayor de 1.2% y el índice de cosecha fue consistentemente menor de 0.5. Por lo tanto ambas características contribuyeron a que en promedio el requerimiento de N fuera menor en líneas endogámicas. Pero podemos afirmar con más solidez que al parecer el índice de cosecha está más asociado a que las líneas endogámicas tengan un mayor requerimiento de N por unidad de rendimiento esperado.

El índice de cosecha de los estudios aquí incluidos promedió 0.3. Tollenaar et al. (2004), reportaron valores de índice de cosecha de 12 híbridos y de siete líneas endogámicas promediando 0.5 y 0.3 respectivamente. Utilizando la concentración crítica

de 1.2% reportada por Stanford (1973) y asumiendo que para líneas endogámicas el índice de cosecha en general es 0.3, el requerimiento interno sería 1.9 lb N/bu coincidiendo con el valor promedio de los dos años del presente estudio. Basado en esto preliminarmente para líneas endogámicas se podría utilizar 1.9 lb N/bu como factor en el caso de no haber otra información disponible.

Cuadro 9. Requerimiento de N y sus componentes para líneas endogámicas en contraste con la recomendación original para maíz de Stanford (1973).

Referencia:	Rendimiento		Índice de cosecha	Concentración de N			Extracción de N		Requerimiento interno de N	
	Grano kg/ha	Rastrojo 15.5% hum		Grano	Rastrojo	Promedio	Grano	Rastrojo	Grano	Planta
				-----%-----			-----kg N/ha-----		lb/bu ¹	
Este estudio 2011	1603	1756	0.44	1.8	1.4	1.6	25.0	24.0	0.9	1.7
Este estudio 2012	4243	8282	0.28	1.3	1.4	1.3	46.9	112.9	0.6	2.1
Rivera (2015)	2765	6110	0.24	1.2	1.0	1.1	29.0	61.0	0.6	1.8
Sotomayor (2012)	2726	6620	0.26	1.7	1.7	1.7	39.7	109.6	0.8	3.1
Sotomayor (2012)	1444	4567	0.21	1.4	1.1	1.3	17.2	51.3	0.7	2.6
Puerto Rico ²	2556	5467	0.29	1.5	1.3	1.4	31.6	71.8	0.7	2.3
Rasse (1999)	5387	7177	0.39	1.6	1.0	1.3	72.0	74.0	0.7	1.5
Stanford (1973)			0.50			1.2			0.6	1.2
Líneas endogámicas ³			0.30			1.2			0.6	1.9

¹Todos los valores fueron reportados en lb de N por bu de grano con 15.5 % de humedad a excepción de Stanford (1973) que asumió un 12 por ciento de humedad.

²Promedio de los trabajos realizados en Puerto Rico con líneas endogámicas.

³Para líneas endogámicas en general se asumió la concentración crítica estimada por Stanford (1973) y un índice de cosecha de 0.3 basado en el promedio de los trabajos aquí recopilados y en que Tollenar et al. (2004) también reportaron un promedio de 0.3 para siete líneas endogámicas en contraste a un promedio de 0.5 para 12 híbridos.

Indicadores Agronómicos

En el 2011 se tomaron datos de SPAD y color a los 38 (V5-V6), 51 (V8-V9) y 63 (VT) DDS y de altura a los 43 (V6), 51 (V8-V9) y 63 DDS (VT). Los valores de SPAD y color no fueron afectados por la interacción nivel de N x rotación, el nivel de N ni la rotación (Cuadro 4). La altura fue afectada solo por la rotación a los 43 DDS y 63 DDS siendo mayor en la rotación BM (Cuadro 10).

Cuadro 10. Indicadores agronómicos afectados por la rotación de cultivo en el 2011 y el 2012.

Rotación	Altura de la planta		Índice de color ²		SPAD	
	2011	2012	2012	2012	2012	2012
	43 DDS	63 DDS	37 DDS	49 DDS	30 DDS	63 DDS
	-----cm-----			escala de 3-5	unidades de SPAD	
Caupí-maíz	101.4 a ¹	158.4 b	97.57 b	3.6 b	42.90 b	47.42 b
Barbecho-maíz	105.7 b	155.7 a	92.64 a	3.5 a	41.06 a	46.21 a

¹ Letras diferentes indican diferencias estadísticas entre medias dentro de cada columna.

² Escala va del 1 al 4 (más verde).

En el 2012 se tomaron datos de SPAD, color y altura a los 42 (V6), 49 (V7-V8) y 63 DDS (VT), además a los 30 DDS (V5) se tomaron datos de SPAD y color y a los 37 DDS (V5 – V6) de color y altura. El valor de SPAD fue afectado solo por la rotación a los 30 y 63 DDS (Cuadro 6), siendo mayor en la rotación CM ($p \leq 0.05$) (Cuadro 10). El índice de color fue afectado por la interacción nivel de N x rotación a los 42 DDS y por la rotación a los 49 DDS (Cuadro 6). A los 42 DDS dentro de la rotación CM el color no se vio afectado por la fertilización nitrogenada mientras que dentro de la rotación BM se observó un incremento en intensidad del color con la fertilización nitrogenada de 3.6 con la aplicación de 60 kg N/ha a 3.8 con la aplicación de 160 kg N/ha (Cuadro 11). A los 49 DDS el color en la rotación BM fue de 3.5 y aumentó a 3.6 con la rotación CM (Cuadro 10). La altura fue afectada por la rotación a los 37 DDS y por la interacción nivel de N x rotación a los

42 y 49 DDS (Cuadro 6). A los 37 DDS las plantas fueron 5% más altas con la rotación CM (Cuadro 10). A los 42 DDS dentro de la rotación CM no hubo efecto de la fertilización nitrogenada mientras que dentro de la rotación BM las plantas fueron 3% más altas con la aplicación de 160 kg N/ha (Cuadro 11). A los 49 DDS no se le pudo atribuir un efecto significativo a la fertilización nitrogenada sobre la altura (Cuadro 11); en general la altura incrementó un 4% con la rotación CM (Cuadro 11).

Cuadro 11. Indicadores agronómicos afectados por la interacción nivel de N x rotación de cultivo en el 2012.

Rotación	Nivel de N kg N/ha	Índice de color		Altura de la planta	
		30 DDS	42 DDS	42 DDS	49 DDS
		-----escala ² -----		-----cm-----	
Caupí-maíz	60	3.59 b	3.7 a ¹	115.0 bc	132.6 bc
	110	3.59 b	3.8 b	117.1 c	137.3 c
	160	3.53 ab	3.7 ab	114.3 bc	133.5 c
Barbecho-maíz	60	3.48 a	3.6 a	109.2 a	127.6 ab
	110	3.55 ab	3.7 a	108.6 a	125.8 a
	160	3.61 b	3.8 b	113.0 b	132.6 bc

¹ Letras diferentes indican diferencias estadísticas entre medias dentro de cada columna.

² Escala va del 1 al 4 (mas verde).

El NO₃⁻ en la savia fue el indicador más sensible demostrando que tanto la fertilización nitrogenada como la rotación CM incrementaron la disponibilidad de N en ambos años ($p \leq 0.05$) (Cuadros 4 y 6). Las muestras para este indicador fueron tomadas en el 2011 a los 42 DDS y en el 2012 a los 36 y 63 DDS. La concentración de NO₃⁻ en la savia en el 2011 incrementó 54% con la aplicación de 160 kg N/ha y 43% con la rotación CM (Cuadro 12). En el 2012 a los 36 DDS la concentración NO₃⁻ en la savia incrementó entre 62 a 99% con la aplicación de 110 y 160 kg N/ha y un 42% con la rotación CM (Cuadro 12). En el 2012 a los 63 DDS, la concentración de NO₃⁻ en la savia incrementó 48% con la

aplicación de 110 kg N/ha , 79% con la aplicación de 160 kg N/ha y 28% con la rotación CM en general (Cuadro 12).

Resulta interesante la efectividad de la concentración de NO_3^- en la savia medida con el ionómetro de detectar diferencias claras en disponibilidad de N aun cuando no hubo respuesta en rendimiento a la fertilización nitrogenada. Esto sugiere que este indicador podría ser de utilidad para describir la magnitud de aplicaciones excesivas de N. El “corn stalk nitrate test” también utiliza la concentración de NO_3^- en la base del tallo para evaluar la suficiencia de N, pero en lugar de la savia se utiliza una muestra de tejido seco. Fox et al. (2001) sugieren que con esta prueba concentraciones por encima de 2000 ppm indican niveles de NO_3^- residual en el suelo con potencial de contaminación. Forrestal et al. (2012) también afirman que esta prueba podría identificar lugares con niveles altos de NO_3^- residual, pero existe incertidumbre al determinar un rango de suficiencia.

Cuadro 12. Concentración de NO_3^- -N en la savia en el 2011 y el 2012.

Tratamiento	2011		2012	
	42 DDS	36 DDS	63 DDS	
Rotación	----- NO_3^- -N ppm-----			
Caupí-maíz	710.7 b	583.0 b	794.8 b	
Barbecho-maíz	530.1 a	411.1 a	617.8 a	
Nivel de N (kg/ha)				
60	484.5 a	323.4 a	496.2 a	
110	629.9 a b	524.2 b	733.4 b	
160	746.9 b	643.5 b	889.3 c	

¹ Letras diferentes dentro de una columna, indican diferencias estadísticas entre medias.

Los resultados de los indicadores agronómicos confirman que el desarrollo del cultivo no fue limitado por el N en el 2011 y en el 2012 dentro de la rotación CM en ningún momento. Las diferencias en color y altura dentro de la rotación BM observadas en el 2012 a los 42 DDS sugieren que en ese momento el desarrollo del cultivo pudo estar siendo

limitado por el N (Cuadro 11). Sin embargo, en el momento en que se reflejaron estas diferencias fue solo cuatro días después de la penúltima aplicación de N y una última aplicación se realizó a los 51 DDS. El hecho de que a los 49 DDS y 63 DDS dejaran de observarse estas diferencias habiendo incluso un aumento general en la altura y en el NO_3^- en la savia a los 63 DDS sugiere que las últimas dos aplicaciones de N corrigieron cualquier déficit que pudiera estar presentándose.

Acumulación de N en el Perfil de Suelo (0-90 cm)

Los cambios en prácticas de manejo como las dosis de N y el tipo de rotación de cultivo modifican la reserva de N a una tasa que va disminuyendo hasta llegar a un estado estacionario. En un sistema en estado estacionario el N inorgánico al final del año se mantiene aproximadamente igual a como estuvo en el inicio del año (Meisinger et al. 2008a⁵). Para que un sistema alcance un estado estacionario a menudo se requieren muchos años dependiendo del clima, el suelo, el tipo de labranza, la dosis y fuente de N y la rotación de cultivo (Meisinger et al. 2008b⁶) y debido a lo dinámico e inestable que es el N inorgánico, cambios a corto plazo no deberían considerarse ya que podrían ser atípicos. De todos modos a continuación se analizarán las fluctuaciones del N inorgánico durante el periodo de este estudio. La intención es tener una primera aproximación de cómo los tratamientos evaluados afectan la reserva de N a través del tiempo.

Las fluctuaciones temporales del contenido de N inorgánico en el suelo fueron evaluadas en cuatro muestreos presiembra 2011, postcosecha 2011, presiembra 2012 y postcosecha del 2012 (factor A), bajo el efecto de la aplicación de 60, 110 o 160 kg N/ha (factor B) y rotación de caupí seguido por maíz (CM) o barbecho seguido por maíz (BM)

⁵ p. 566

⁶ p. 517

(factor C). La triple interacción A x B x C no fue significativa, pero si las interacciones A x B y A x C ($p < 0.05$) (Cuadro 13). Esto quiere decir que los efectos de las rotaciones y de los niveles de N deben ser considerados dentro de cada muestreo y las fluctuaciones en el contenido de N dentro de cada nivel de N y dentro de cada tipo de rotación (Cuadros 14 y 15). El efecto de la rotación sobre el contenido de N en el perfil incrementó a medida que transcurrió el tiempo (Cuadro 14). El N inorgánico con la rotación CM en relación a la rotación BM: i) tendió a aumentar 14% dentro de la presiembra 2011; ii) tendió a aumentar 21% dentro de la postcosecha 2012; iii) aumentó 65% dentro de la presiembra 2012 y iv) aumentó 89% dentro de la postcosecha 2013. El N inorgánico dentro de la rotación CM tendió alcanzar el valor más alto en la postcosecha 2012 siendo significativamente mayor que en la presiembra del 2011 y 2012 y tendiendo a ser mayor que la postcosecha del 2011. Por otro lado, con la rotación BM, el N inorgánico en la post cosecha 2011 no aumentó significativamente respecto a la presiembra del 2011 y a la del 2012 y fue significativamente menor que en la postcosecha del 2011. Cabe mencionar que siendo el 2012 el año de mayor extracción de N por el maíz se esperaba que el N inorgánico postcosecha fuera menor que en el 2011 (Halvorson et al., 2005).

Cuadro 13. Resumen de ANOVA para el efecto de Muestreo (A), nivel de N (B), rotación (C) y las interacciones A x B, B x C y A x B x C sobre el contenido de N inorgánico en el perfil de suelo.

A	B	A * B	C	B * C	A * C	A * B * C	CV	DMS ¹
0.0023	0.0004	0.0017	0.0001	0.699	0.0446	0.3907	38.93	82.20

¹Diferencia mínima significativa con la prueba LSD utilizando un nivel de significación de 0.05.

Cuadro 14. Efecto de la interacción A x C sobre el contenido de N en el perfil de suelo (0-90 cm).

Rotación (Factor C)	Muestreo (Factor A)			
	Presiembra 2011	Postcosecha 2012	Presiembra 2012	Postcosecha 2013
	-----kg N/ha-----			
Caupí-maíz	115A ¹ Y ²	216A Z	132B Y	233B Z
Barbecho-maíz	101A Y	179A Z	80A Y	123A Y

¹ Letras diferentes dentro de cada columna de la A a la B indican diferencias estadísticas entre medias del factor C.

² Letras diferentes dentro de cada fila de la Y a la Z indican diferencias estadísticas entre medias del factor A.

Cuadro 15. Efecto de la interacción A x B sobre el contenido de N en el perfil de suelo (0-90 cm).

Nivel de N (Factor B)	Muestreo (Factor A)			
	Presiembra 2011	Postcosecha 2012	Presiembra 2012	Postcosecha 2013
	-----kg N/ha-----			
Nivel de N (kg/ha)				
60	117A ¹ Y ²	143A Y	107A Y	168A Y
110	102A Y	166A Z	106A Y	138A YZ
160	106A Y	283B Z	104A Y	228A Z

¹ Letras diferentes dentro de cada columna de la A a la B indican diferencias estadísticas entre medias del factor C.

² Letras diferentes dentro de cada fila de la Y a la Z indican diferencias estadísticas entre medias del factor A.

El caupí aportó una cantidad de N similar en ambos años de acuerdo al estimado de extracción de N y fijación biológica. Por lo tanto, la tendencia a que el efecto del caupí incrementara en el segundo año podría deberse principalmente a que parte del N del primer año se sumó al aporte del segundo año. El hecho de que con la rotación CM incrementara el N inorgánico respecto a la rotación BM y a que este efecto sea mayor a través del tiempo sugiere que la rotación CM contribuirá a que la reserva de N alcance el estado estacionario con más N acumulado que con la rotación BM.

Las fluctuaciones de N inorgánico de pre siembra a post cosecha en ambos años también estuvieron asociadas a la fertilización nitrogenada. Pero, no se observó que hubiera

efecto de la fertilización del primer año en el segundo. El contenido de N de presembrado a postcosecha del 2011 tendió a aumentar 22% con la aplicación de 60 kg N/ha, aumentó 63% con la aplicación de 110 kg N/ha y aumentó 167% con la aplicación de 160 kg N/ha (Cuadro 15). De la postcosecha del primer año a la presembrado del segundo año el contenido de N inorgánico disminuyó significativamente entre 36 y 179 kg N/ha al punto de que no se observó un efecto de la fertilización nitrogenada del primer año en la presembrado del segundo. De presembrado a postcosecha del 2012 el contenido de N tendió a aumentar 57% con la aplicación de 60 kg N/ha, tendió a aumentar 30% con la aplicación de 110 kg N/ha y aumentó 119% con la aplicación de 160 kg N ha. Los resultados sugieren que la fertilización nitrogenada tuvo un efecto a corto plazo en la disponibilidad de N, pero no se acumuló a largo plazo.

La disminución en N en el suelo entre la postcosecha 2011 y la presembrado 2012 puede ser atribuida a que este se perdió y/o se inmovilizó ya que cuando se depositan residuos con una relación C:N alta como el maíz es posible que se inmovilice el N inorgánico a niveles bien bajos (Havlin et al. 2005⁷). Las pérdidas pueden ser a través de lixiviación, desnitrificación, volatilización y/o escorrentía. Pero, tratándose de que el suelo donde se realizó el experimento es aireado y de buen drenaje y el periodo de reposo coincide con la época de mayor precipitación (Figura 1) la lixiviación debió ser la principal causa de las pérdidas.

El N inmovilizado podría ser mineralizado posteriormente y ser aprovechado por la próxima siembra de maíz; pero por el contrario si se lixiviera no podría ser aprovechado causando un posible problema de acumulación en aguas subterráneas. El N incorporado en

⁷ p. 119

el suelo con el rastrojo en la postcosecha es otra potencial fuente de pérdidas si se mineraliza antes de que la siguiente siembra lo aproveche. En el caso de las líneas endogámicas por su índice de cosecha (0.3) el N devuelto al suelo en el rastrojo es relativamente mayor que en híbridos. Para la presiembra del 2012 no se encontraron residuos visibles de tejido sin descomponer por lo cual existe la posibilidad de que este N sí se mineralizara y se lixiviera o se inmovilizara. Estudios de lixiviación de N y/o que evalúen el destino del N del fertilizante con N^{15} (Stevens et al., 2005) permitirían una mejor comprensión del ciclo de N durante este periodo. De ser necesario se podrían tomar medidas de control como el uso de cobertoras no leguminosas que atrapen el N residual y lo inmovilicen hasta que sean incorporadas en la labranza presiembra.

Distribución de N Inorgánico en el Perfil de Suelo

La fracción de los primeros 30 cm del perfil de suelo contuvo siempre por lo menos un 50 por ciento del contenido de N (Figura 4). Los efectos de la rotación y de la fertilización nitrogenada reflejados en el perfil de 0 a 90 cm (Cuadros 12 y 13) tuvieron el mismo patrón dentro de la fracción de 0-30 cm (Figuras 5 y 6). Sin embargo de 30 a 60 cm y de 60 a 90 cm no se observó efecto significativo de los tratamientos. Las fracciones de 30-60 y de 60-90 cm tendieron a tener mayor contenido de N y a ser influidas por la fertilización nitrogenada en la postcosecha del 2011 (Figuras 5 y 6, respectivamente). Esto se debió probablemente a que por la baja extracción de N por el cultivo en ese año hubo mayor movimiento de N desde la fracción de 0-30 cm hasta mayores profundidades. Estos resultados sugieren que hubo poca lixiviación de N fuera del perfil dentro de la temporada de crecimiento en ambos años.

Se realizó un estimado de la evapotranspiración del cultivo durante el periodo bajo maíz utilizando datos de evaporación de la Subestación Experimental Agrícola de Juana Díaz, valores del coeficiente del evaporímetro para esta subestación experimental reportados por Harmsen et al. (2004) y valores del coeficiente del cultivo reportados por Allen et al. (1998) para maíz forrajero en regiones áridas. La evapotranspiración acumulada durante el periodo bajo maíz fue estimada en 270 mm en el 2011 y en 290 mm en el 2012. En el 2011 el aporte de agua al cultivo a través del riego fue de 315 mm y el de la precipitación fue de 85 mm. En el 2012 el aporte de agua al cultivo a través del riego fue de 325 mm y el de la precipitación fue de 115 mm. Por lo tanto el consumo de agua del cultivo fue excedido por 130 mm en el 2011 y 150 mm en el 2012. Se realizó un estimado de la capacidad del suelo de almacenar agua utilizando datos de la curva de retención de agua de la serie San Antón la cual es similar a la serie Jacaguas debido a la falta de datos para esta última (NCSS). Se estimó que el perfil de suelo a 90 cm tiene la capacidad de almacenar 297 mm de agua a capacidad de campo. Por consiguiente el exceso de agua pudo ser almacenado en el suelo sin causar pérdidas significativas por lixiviación de N inorgánico. Estos resultados son coherentes con los resultados de distribución de N inorgánico en el perfil y confirman que los efectos de la rotación y la fertilización fueron significativos solamente en los primeros 30 cm del perfil de suelo debido a que hubo poca lixiviación.

Figura 4. Distribución del N inorgánico en el perfil a través de los dos años de estudio. Los valores representan el promedio de los niveles de N y de la rotación.

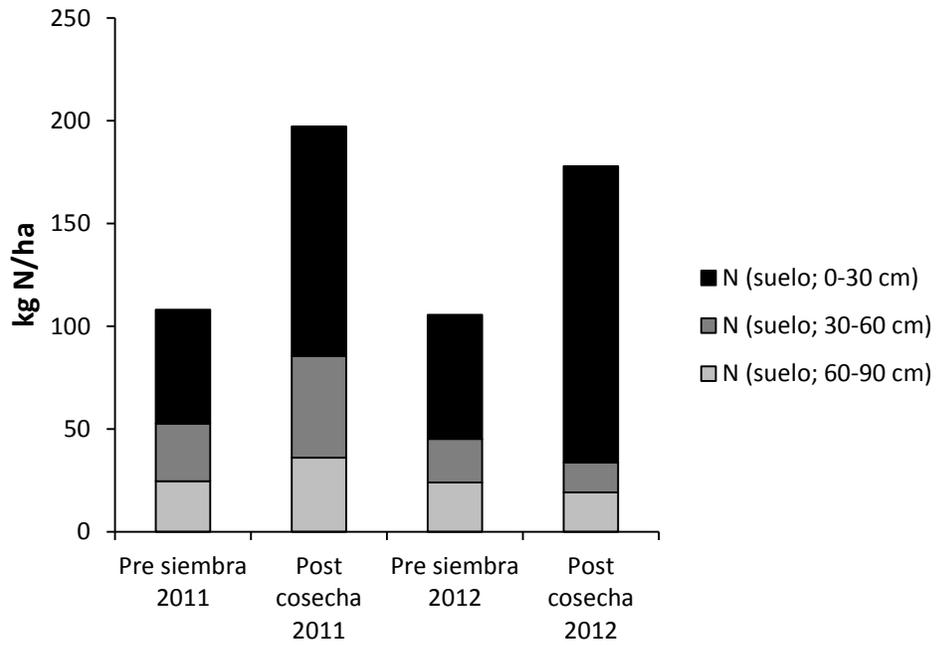


Figura 5. Distribución del efecto de las rotaciones caupí-maíz (CM) y barbecho-maíz (BM) en el N inorgánico en el perfil de suelo. Letras diferentes indican diferencias significativas dentro de la presiembra 2012 y la postcosecha 2012 para la rotación ($p \leq 0.05$). No se encontró diferencia significativa para las profundidades de 30 - 60 y 60 - 90 cm.

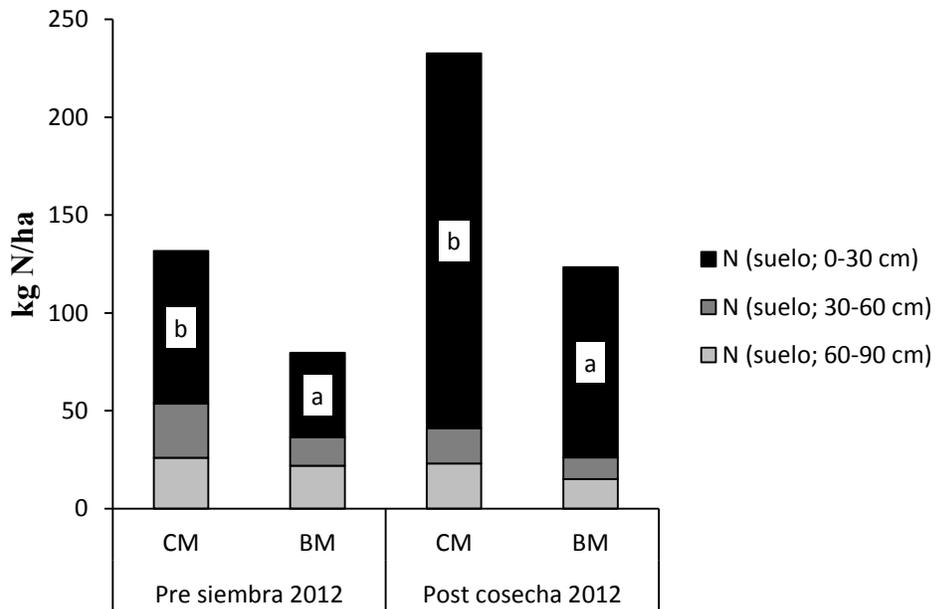
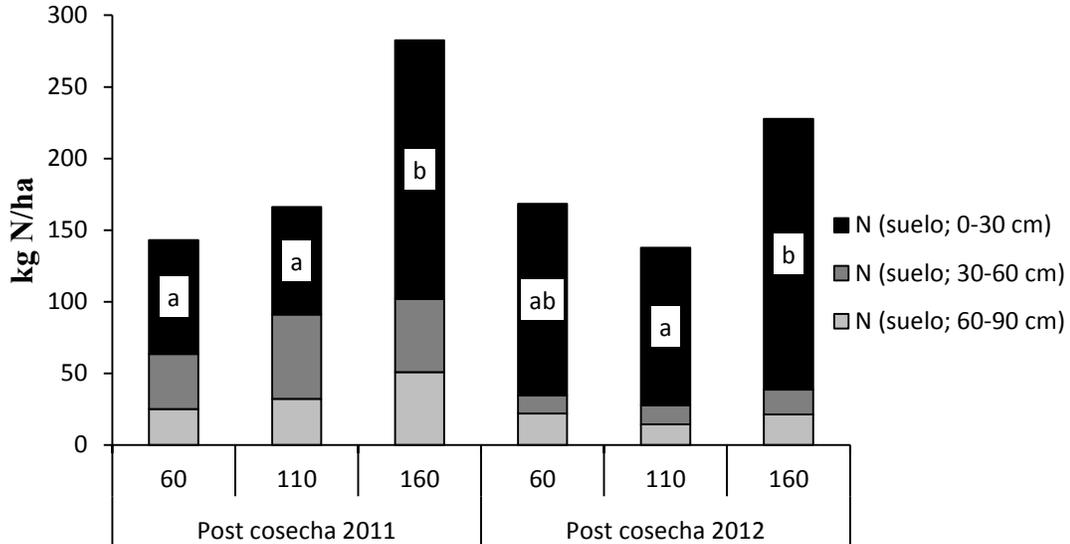


Figura 6. Distribución del efecto de la fertilización nitrogenada sobre el N inorgánico en el perfil de suelo en el 2012. Letras diferentes indican diferencias significativas dentro de la postcosecha 2011 y la postcosecha 2012 para los niveles de N ($p \leq 0.05$). No se encontró diferencia significativa para las profundidades de 30 - 60 y 60 - 90 cm.



Balace de N Disponible

El N inorgánico en el perfil de suelo presiembra y el de la fertilización nitrogenada pueden ser considerados como N disponibles para el cultivo. Basado en el principio de conservación de materia, el N disponible al inicio de la temporada debería estar al final de la temporada en el N extraído por el cultivo y el restante en el perfil de suelo. No obstante debido a que el N en el suelo tiene un comportamiento dinámico y el sistema es abierto transformaciones, pérdidas y ganancias ocurren sistemática y simultáneamente durante la temporada de crecimiento. La diferencia entre el N postcosecha (N inorgánico en el suelo postcosecha + extracción por la planta) y el N inicialmente disponible en el sistema (N inorgánico en el suelo presiembra + fertilización nitrogenada) generalmente fue positiva (Figura 7). Este cambio positivo en N (ΔN) debe ser producto de adiciones por parte de mineralización de N, N en el riego, N en la precipitación, deposición de N atmosférico y/o

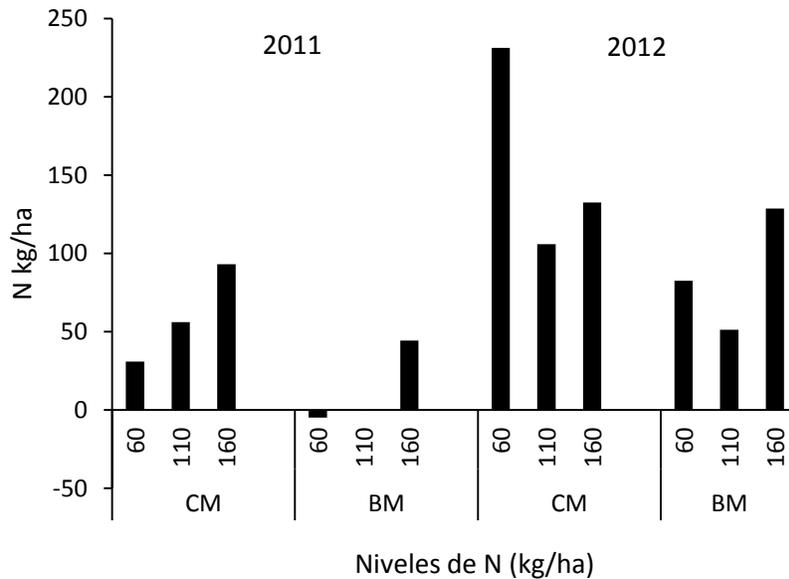
N extraído por la planta de profundidades mayores a los 90 cm que no fueron contabilizadas. En los casos donde hubo un ΔN negativo se debe a la inmovilización, asimilación en las raíces del cultivo y/o las pérdidas (factores que tampoco fueron medidos).

El ΔN fue mayor en el 2012, año en que el desarrollo del cultivo se vio favorecido, lo cual indica una mayor disponibilidad de N. En estudios de manejo de N se ha encontrado que comúnmente en el sistema suelo-planta la disponibilidad de N se ajusta al desarrollo del cultivo (Meisinger et al. 2008b, p. 570). Esta capacidad del sistema suelo-planta ha sido llamada “soil-plant N resiliency” y puede afectar las recomendaciones de N basadas en el balance de N ya que hace que el requerimiento de N del cultivo no varíe directamente con el rendimiento. También es posible que el N inorgánico residual del año anterior estuviera inmovilizado en la presiembra y se mineralizara durante la temporada bajo maíz reflejándose entonces en la post cosecha.

El ΔN también tendió a aumentar en general con la rotación CM y en el 2011 con la fertilización nitrogenada. En el caso de la rotación CM probablemente parte del N que aportó el caupí todavía no estaba disponible al inicio de la temporada de crecimiento y se mineralizó a medida que transcurrió la temporada. Se ha encontrado que la relación entre la fertilización nitrogenada y la mineralización de N es variable siendo en ocasiones positiva, negativa o no habiendo relación (Carpenter-Boggs et al., 2000). Los aportes de N en el riego, N en la precipitación y deposición de N atmosférico son uniformes a través de los diferentes niveles de N dentro de cada año. También es probable que el desarrollo radicular de las plantas no fuera afectado por la fertilización nitrogenada al igual que no fueron afectadas las partes aéreas. Por lo tanto, el hecho de que el ΔN en general tendió

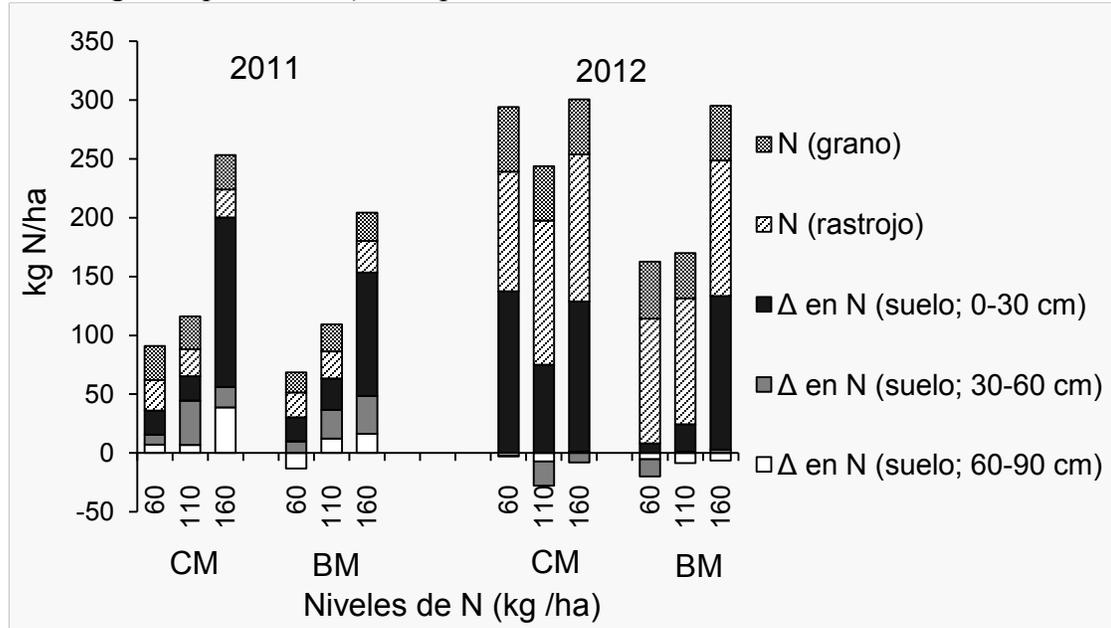
a aumentar con la fertilización nitrogenada debe ser producto de un aumento en la mineralización de N.

Figura 7. Cambio en N disponible en el sistema suelo-planta ($\Delta N = N$ inorgánico postcosecha + extracción por la planta - N inorgánico presiembra - fertilización nitrogenada).



La Figura 8 presenta una síntesis del efecto de la fertilización nitrogenada y el tipo de rotación en la extracción de N por el cultivo y el N inorgánico en el perfil de suelo. Mientras que la fertilización nitrogenada y la rotación CM en general no impactaron la extracción de N por la planta si el contenido de N en el suelo aumentó con dichos factores. Por ende mientras no hubo un aprovechamiento por el cultivo la fertilización nitrogenada y la rotación CM incrementaron el potencial de pérdidas de N. Claramente el rendimiento no se vio limitado por la oferta de N. Pero en este estudio no se evaluó la sincronización de la fertilización y la mineralización de N del caupí con la demanda del cultivo. Son necesarios estudios que evalúen la mineralización de N y el fraccionamiento y momentos de aplicación de la fertilización nitrogenada para evaluar si el desarrollo del cultivo no se ve limitado en momentos específicos durante la temporada de crecimiento.

Figura 8. Extracción de N por el cultivo y cambio en N ($\Delta N = N$ inorgánico post cosecha - N inorgánico pre siembra) en el perfil de suelo de 0-90 cm.



CONCLUSIÓN

El rendimiento de la semilla de la línea endogámica evaluada en este estudio no aumentó con aplicaciones de N superiores a los 60 kg N/ha. Si se considera la extracción máxima de N en la biomasa aérea (168 kg N/ha) con 60 kg N/ha no es suficiente para satisfacer la demanda del cultivo. Sin embargo el contenido, las fluctuaciones temporales y la distribución de N inorgánico en el perfil de suelo (0-90 cm) reflejan una alta capacidad del sistema para suplir N lo cual explica la baja respuesta a la fertilización nitrogenada.

Bajo las condiciones específicas de este estudio la preocupación es si a largo plazo la reserva del suelo se sostendrá con la aplicación continua de 60 kg N/ha. Porque aunque el exporte máximo en el grano es de 46 kg N/ha son necesarios estudios que evalúen si el exceso de N se pierde o se acumula. La fertilización nitrogenada aumentó el N inorgánico en el suelo a corto plazo pero no hubo indicaciones de que este se acumulara para que pudiera ser utilizado por cultivos posteriores. La rotación con caupí por otro lado mostró ser beneficiosa aumentando los rendimientos de semilla y tanto el contenido como la acumulación de N inorgánico en el suelo. El estimado de fijación biológica por el caupí de aproximadamente 100 kg N/ha y las tendencias de acumulación sugieren que bajo este sistema de rotación la reserva de N del suelo podría sostenerse a largo plazo. No obstante se necesitan estudios que evalúen la mineralización de N tanto del suelo como del caupí y las vías de pérdidas de N para una mejor comprensión del ciclo de N en este sistema.

Las medidas de altura, color y SPAD no respondieron a la fertilización nitrogenada en coherencia con la falta de respuesta en rendimiento. Mis observaciones validan el potencial de uso de los indicadores agronómicos de suficiencia de N y los valores aquí reportados podrían ser utilizados como niveles críticos preliminares. La concentración de

NO_3^- en la savia podría ser evaluada en estudios futuros como un indicador de la magnitud de aplicaciones excesivas de N ya que aumentó con niveles de fertilización nitrogenada superiores a la respuesta en rendimiento.

REFERENCIAS

- Abendroth, L.J., R.W. Elmore, M.J. Boyer y S.K. Marlay. 2011. Corn growth and development. PMR1009. Iowa State University.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Andraski T. W. y L. G. Bundy. 2005. Cover crop effects on corn yield response to nitrogen on an irrigated sandy soil. *Agron. J.* 97: 1239–1244.
- Badillo-Feliciano, J., M. A. Lugo-López y T. W. Scott, 1979. Influence of cultivars, N levels and time of N application on plant characters, leaf composition, and yield of corn grown on an Oxisols. *J. Agric. Univ. P. R.* 63: 273-80.
- Balko, L. G., y W. A. Russell. 1980. Response of maize inbred lines to N fertilizer. *Agron. J.* 72:723-728.
- Cañas RA, N. Amieur, I. Quilleré y B. Hirel. 2011. An integrated statistical analysis of the genetic variability of nitrogen metabolism in the ear of three maize inbred lines (*Zea mays* L.). *J. Exp. Bot.* 62: 2309–2318.
- Campbell, C. R.. 2011. Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States. *South. Coop. Bull.* 394.
- Capó B. G.. 1967. Additional evidence on the applicability of the fertilizer – yield relation. *J. Agric. Univ. P. R.* 51 (2): 97-120.
- Carpenter-Boggs, L., J. L. Pikul Jr., M. F. Vigil y W. E. Riedell. 2000. Soil nitrogen mineralization influenced by crop rotation and nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2038-2045.
- Coque M. y A. Gallais. 2007. Genetic variation for N-remobilization and post silking N-uptake in a set of maize recombinant inbred lines. *Crop Sci* 47:1787–1796
- Coque M, J. B. Martin, Veyrierias, B. Hirel y A. Gallais. 2008. Genetic variation of remobilization and postsilking N-uptake in a set of maize recombinant inbred lines. III.QTL detection and coincidences. *Theor. Appl. Genet.* 117:729-747.
- D'Andrea, K.E., M.E. Otegui, A.G. Cirilo y G. Eyherabide. 2006. Genotypic variability in morphological and physiological traits among maize inbred lines-Nitrogen responses. *Crop Sci.*, 46: 1266-1276.
- Forrestal, P.J., R.J. Kratochvil y J.J. Meisinger. 2012. Late-Season Corn Measurements to Assess Soil Residual Nitrate and Nitrogen Management. *Agron. J.* 104:148–157

- Fox, R. H., W.P. Piekielek y K. E. Macneal. 2001. Comparison of late-season diagnostic test for predicting nitrogen status of corn. *Agron. J.* 93:590-597
- Fox, R. H., H. Talleyrand y D. R. Bouldin. 1974. Nitrogen fertilization of corn and sorghum grown in oxisols and ultisols in Puerto Rico. *Agron. J.* 66 (4): 534-540
- García J. P. y J. S. Espinosa. 2008. Relación del índice de verdor con la aplicación de nitrógeno en diez híbridos de maíz. *Informaciones agronómicas*. IPNI.
[http://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/\\$webindex/4AE744385D62DC6C0525755B006B5A76/\\$file/Relaci%C3%B3n+del+Indice+de+Verdor+con+la+Aplicaci%C3%B3n+de+Nitr%C3%B3geno+en+Diez+Hibridos+de+Ma%C3%ADz.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/$webindex/4AE744385D62DC6C0525755B006B5A76/$file/Relaci%C3%B3n+del+Indice+de+Verdor+con+la+Aplicaci%C3%B3n+de+Nitr%C3%B3geno+en+Diez+Hibridos+de+Ma%C3%ADz.pdf)
- García F. O. y I. C. Daverede. 2008. Diagnóstico para recomendación de fertilización nitrogenada en cultivos de interés agronómico. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Quito, 29 – 31 de Octubre del 2008.
<http://www.secsuelo.org/XICongreso/Simposios/Nutricion/Documento/Magistrals/12.%20Dr.%20Fernando%20Garcia.pdf>
- Gehl, R.J., J.P. Schmidt, C.B. Godsey, L.D. Maddux y W.B. Gordon. 2006. Post-harvest soil nitrate in irrigated corn: Variability among eight field sites and multiple N rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1922-1931.
- Gentry L.F., M. L. Ruffo y F. E. Below. 2013. Identifying Factors Controlling the Continuous Corn yield Penalty. *Agron. J.* 105:295-303.
- Halvorson A.D., F. C. Schweissing, M. E. Bartolo y C. A. Reule. 2005. Corn response to nitrogen fertilization in a soil with high residual nitrogen. *Agron J.* 97:1222-1229.
- Havlin, J.L., S.L. Tisdale, J.D. Beaton y W.L. Nelson. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers*. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ
- InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- IRRI, Sin fecha. Using the leaf color chart (LCC) for fertilizer N management in rice.
<http://irri.org/images/stories/SSNM/lcc/lcc%20handout%2026oct06.pdf>
- Jaynes, D.B. y T.S. Colvin. 2006. Corn yield and nitrate loss in subsurface drainage from mid-season N fertilizer application. *Agron. J.* 98:1479-1487.
- Harmsen E. W., González A. Pérez y A. Winter, 2004. Re-evaluation of pan evaporation coefficients at seven locatiaons in Puerto Rico. *J. Agric. Univ. P. R.* 88 (3-4):109-122.
- Havlin, J.. 2004. Impact of management systems on fertilizer nitrogen use efficiency. En A. R. Moiser, J. K. Syers y J. R. Freney (ed.) *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. SCOPE Ser. 65. Island Press y SCOPE, Washington, DC. p. 167-178.

- Meisinger, J. J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. p. 391-416. En R.D. Hauck et al. (ed.) Nitrogen in crop production. ASA, Madison, WI.
- Meisinger, J.J., F.J. Calderon y D.S. Jekinson. 2008b. Soil nitrogen budget. En J.S. Schepers y W.R. Raun (ed.) Nitrogen in agricultural systems. Agron Monogr. 49. ASA, CSSA, y SSSA, Madison, WI. p. 505-561.
- Meisinger, J.J., J.S. Schepers y W.R. Raun. 2008a. Crop Nitrogen Requirement and Fertilization. En J.S. Schepers y W.R. Raun (ed.) Nitrogen in agricultural systems. Agron Monogr. 49. ASA, CSSA, y SSSA, Madison, WI. p. 563-612.
- NCSS (National Cooperative Soil Survey). National Cooperative Soil Survey Characterization Database. Disponible en: <http://ncsslabsdatamart.sc.gov.usda.gov/> (visitada el 9 de diciembre de 2015).
- Piekielek, W.P., R.H. Fox, J.D. Toth y K.E. Macneal. 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. Agron. J. 87:403-408.
- Poehlman J.M. y D. A. Sleeper. 1995. Breeding Field Crops. 4 th edition. Iowa State Univ. Press.
- Quiles-Belen, A., A. Sotomayor-Ríos y S. Torres-Cardona. 1988 Corn response to N applications and population densities at two locations in Puerto Rico. J. Agric. Univ. P. R. 72 (1): 127-140.
- Randall, G.W., J.A. Delgado y J.S. Schepers. 2008. Nitrogen management to protect water resources. En J.S. Schepers y W.R. Raun (ed.) Nitrogen in Agricultural Systems Agronomy Monograph 49. ASA, CSA, SSSA, Madison, WI. p. 911-945.
- Rivera Z., 2015. Manejo de fertilizante nitrogenado para la optimización del rendimiento de una línea purade maíz (*Zea mays L.*). Tesis M.S. Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, P. R..
- Rodriguez D. G. P. y D. S. Bullock. 2015. Testing the validity of Stanford's 1.2 rule for N fertilizer recommendation. ICAE Triennial Conference Milan, It. 8-14 Aug. <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/212289/2/Rodriguez-Testing%20the%20Validity%20of%20Stanfords%2012%20Rule%20for%20N%20Fertilizer%20Recommendation-260.pdf>
- Sainju U. M. y B. P. Singh, 2001. Tillage, cover crop, and kill-planting Date effects on corn yield and soil nitrogen. Agron. J. 93:878-886.
- Sainju, U. M., B. P. Singh, W. F. Whitehead y S. Wang. 2007. Accumulation and crop uptake of soil mineral nitrogen as influenced by tillage, cover crops, and nitrogen fertilization. Agron. J. 99:682-691.

- Samborski, S.M., N. Tremblay y E. Fallon. 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agron. J.* 101:800–816.
- Sarrantonio, M. 2007. Building soil fertility and tilth with cover crops, p. 16–24. In: A. Clark (ed.). *Managing cover crops profitably*. 3rd ed. Sustainable Agriculture Network, Beltsville, MD.
- Sotomayor-Ramírez, D., 2010. Conceptos para mejorar recomendaciones de fertilización: Experiencias en Puerto Rico. Simposio Internacional: Importancia del manejo de suelo y fertilización con potasa para el desarrollo agrícola sustentable de America Latina y el Caribe, San Salvador, El Salvador International Potash Institute, Asociación Salvadoreña de la Ciencia del Suelo
http://www.ipipotash.org/udocs/Sotomayor_conceptos_para_mejorar_recomendaciones_de_fertilizacion_experiencias_en_puerto_rico.pdf
- Sotomayor-Ramírez, D., J. Rivera-Zayas, R. Barnes. 2013. Fertilizer-nitrogen management to improve yields of inbred maize lines. ASA, CCSA and SSSA Annual Meeting, Tampa Fl. 3-6 Nov. Presentación oral.
<https://dl.sciencesocieties.org/publications/meetings/download/pdf/2013am/81266>
- Sotomayor-Ramírez, D., R. Huckaba, R. Barnes, R. Dorcinvil y J. Espinosa. 2012. Inbred maize response to cover crops and fertilizer-nitrogen. *J. Agric. Univ. P. R.* 96 (1-2): 37-55.
- Sotomayor-Ramírez, D., R. Huckaba, R. Barnes, R. Dorcinvil y J. Espinosa 2011. Inbred maize response to cover crops and fertilizer-N in the southern semi-arid coast of Puerto Rico. ASA-CCSA-SSSA Annual Meeting, San Antonio, TX. 16-19 Oct. Resumen.
<https://scisoc.confex.com/scisoc/2011am/webprogram/Paper65987.html>
- Stanford G., 1973. Rationale for Optimum Nitrogen Fertilization in Corn Production. *J. Environ. Qual.* 2:159-166.
- Stevens, W.B., R.G. Hoelt y W.R. Peterson. 2003. Nitrogen fertilizer requirement for inbred corn following corn or soybean. Online. *Crop Management* doi:10.1094/CM-2003-1126 01-RS.
- Tollenaar, M., A. Ahmadzadeh y E. A. Lee. 2004. Physiological basis of heterosis for grain yield in maize. *Crop Sci.* 44:2086–2094.
- University of Manitoba (Sin fecha). Fertilizer replacement value of legume green manure crops. <http://www.umanitoba.ca/outreach/naturalagriculture/articles/frv.html>
- USDA-SCS (Soil Conservation Service), 1979. Soil survey of Ponce area of southern Puerto Rico. United States Departement of Agriculture, Soil Conservation Service.

- USDA 2015. World agricultural supply and demand estimates. WASDE – 545.
<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>
- Vázquez, R., 1961. Effects of irrigation at different growth stages and of nitrogen levels on corn yields in Lajas Valley, P. R.. *J. Agric. Univ. P. R.* 45: 85-105.
- White J. M., R. V. Tyson, E. A. Hanlon, G. J. Hochmuth y C. A. Neal, 1996. Plant petiole sap testing for nitrogen and potassium in sweet corn grown on mineral soil. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 109: 149-151.
- Ziadi, N., M. Brassard, G. Belanger, A. Claessens, N. Tremblay, A.N. Cambouris, M.C. Nolin y L.E. Parent. 2008. Chlorophyll measurements and nitrogen nutrition index for the evaluation of corn nitrogen status. *Agron. J.* 100:1264–1273.